

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Miguel Vasconcelos da Silva, a88289
Diogo Miguel Cunha Fernandes, a88262
Duarte Miguel Novo Rodrigues, a88259
Francisco Lopes Salgado, a88231
João Pedro Dias Miranda, a88237
José Tomás Lima de Abreu, a88218

AWR-19
Analog Waiter Robot

Projeto integrador
Laboratórios e Práticas Integradas

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Luís Barros

ÍNDICE

Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	7
Acrónimos e Siglas	9
Capítulo 1 Introdução	11
1.1 Introdução	11
1.2 Enquadramento	11
1.3 Especificações Previstas.....	12
1.4 Planeamento	13
Capítulo 2 Desenho dos Circuitos Eletrónicos.....	15
2.1 Introdução	15
2.2 Condicionamento de Sinal.....	17
2.3 Circuito de Controlo da Velocidade dos Motores	20
2.4 Circuito de Atuação dos Sinais PWM	22
2.5 Máquina de Estados.....	24
2.6 Circuito de Alimentação	30
Capítulo 3 Simulação dos Circuitos Eletrónicos	33
3.1 Introdução	33
3.2 Condicionamento de Sinal.....	33
3.3 Circuito de Controlo da Velocidade dos Motores	34
3.4 Circuito de Atuação dos Sinais PWM	38
3.5 Máquina de Estados.....	39
Capítulo 4 Implementação dos Circuitos Eletrónicos.....	43
4.1 Introdução	43
4.2 Circuito de Condicionamento de Sinal dos Sensores e Conversor 12 V – 5 V	43
4.3 Circuito Controlo da Velocidade dos Motores e Atuação dos Sinais PWM.....	45
4.4 Circuito de Condicionamento do Botão e Máquina de Estados	46
Capítulo 5 Lista de Componentes	49
Capítulo 6 Circuito Mecânico Implementado	53
Capítulo 7 Resultados Experimentais.....	57
Capítulo 8 Análise do Produto	59
8.1 Introdução	59
8.2 Fiabilidade	59
8.3 Segurança	61
8.4 Certificação.....	62
Capítulo 9 Conclusões	65
9.1 Conclusão.....	65
9.2 Sugestões de Trabalho Futuro	66
9.2.1Possíveis Opções Alternativas para o Desenho dos Circuitos	67
9.2.2Evolução do Atual Desenho para um Sistema Baseado em Microcomputador	68
Referências	69

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Linha perpendicular de fim de percurso.....	12
Figura 1.2 - Diagrama de Gantt do planeamento inicial.....	13
Figura 1.3 - Diagrama de Gantt do planeamento revisto.	13
Figura 2.1 - <i>Array</i> de sensores QTR-8A.....	15
Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema.....	16
Figura 2.3 - Módulo Driver L298N.....	16
Figura 2.4 - Esquemático do circuito de condicionamento dos sensores a serem usados como componentes analógicos.....	17
Figura 2.5 - Esquemático do circuito de condicionamento dos sensores a serem usados como componentes digitais.....	18
Figura 2.6 - Relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada de um comparador de nível não inversor com histerese.....	19
Figura 2.7 - Circuito de <i>debounce</i> do botão de pressão (a) Botão não premido; (b) Botão premido.....	19
Figura 2.8 - Esquemático do circuito de controlo da velocidade dos motores.....	20
Figura 2.9 - <i>Pinout</i> do TL494.....	22
Figura 2.10 - Esquemático do circuito de atuação dos sinais PWM.	22
Figura 2.11 - Máquina de Moore.....	24
Figura 2.12 - Diagrama da máquina de estados.....	25
Figura 2.13 - Lógica do próximo estado.....	27
Figura 2.14 - Lógica de saída.....	27
Figura 2.15 - Desenho da máquina de estados.....	28
Figura 2.16 - Esquema do <i>flip-flop</i> J-K.....	28
Figura 2.17 - Implementação do Oscilador.....	29
Figura 2.18 - Circuito RC de <i>reset</i> e a sua resposta no tempo.....	30
Figura 2.19 - Esquema de ligação das baterias e BMS.	31
Figura 2.20 - Esquema de ligação do regulador de tensão (LM7805).....	31
Figura 3.1 - Condicionamento de sinal para os sensores a serem usados analogicamente (a) Entrada 0 V; (b) Entrada 2 V; (c) Entrada 5 V.....	33
Figura 3.2 - Condicionamento de sinal para os sensores a serem usados digitalmente (a) Entrada 0 V; (b) Entrada 2 V; (c) Entrada 5 V.....	34
Figura 3.3 - Circuito de controlo da velocidade dos motores, com $S3$ e $S6$ iguais a 0 V.....	35
Figura 3.4 - Circuito de controlo da velocidade do motor direito, com $S3$ igual a 0 V e $S6$ igual a 5 V.	35
Figura 3.5 - Circuito de controlo da velocidade do motor esquerdo, com $S3$ igual a 0 V e $S6$ igual a 5 V.	36
Figura 3.6 - Circuito de controlo da velocidade do motor direito, com $S3$ igual a 2,5 V e $S6$ igual a 0 V.	36
Figura 3.7 - Circuito de controlo da velocidade do motor esquerdo, com $S3$ igual a 2,5 V e $S6$ igual a 0 V.	37
Figura 3.8 - Circuito de atuação dos sinais PWM com entrada de 0 V.	38
Figura 3.9 - Circuito de atuação dos sinais PWM com entrada de 2,1 V.	38

Figura 3.10 - Circuito de atuação dos sinais PWM com entrada de 3,6 V.....	39
Figura 3.11 - Resposta do Oscilador de 1 kHz.....	39
Figura 3.12 – Máquina de estados no estado 0 (Parado).....	40
Figura 3.13 - Máquina de estados no estado 1 (Anda para a frente) – Botão foi pressionado.....	40
Figura 3.14 - Máquina de estados no estado 2 (Inicia a rotação para a esquerda) – $S1$ e $S8$ a nível lógico alto.	41
Figura 3.15 - Máquina de estados no estado 3 (Continua a rotação) - $S1$ e $S8$ a nível lógico baixo.	41
Figura 3.16 - Máquina de estados no estado 0 (Parado novamente) - $S5$ a nível lógico alto.	42
Figura 4.1 - Esquemático do conversor 12 V – 5 V.....	43
Figura 4.2 – Circuito que estabelece a tensão de referência do circuito comparador.....	44
Figura 4.3 - <i>Layout</i> da PCB AWR-19_SENSOR.....	44
Figura 4.4 - Representação 3D da PCB AWR-19_SENSOR.....	44
Figura 4.5 - <i>Layout</i> da PCB AWR-19_PWM.....	45
Figura 4.6 - Representação 3D da PCB AWR-19_PWM.....	45
Figura 4.7 - Circuito de <i>debounce</i>	46
Figura 4.8 - Circuito de <i>reset</i>	46
Figura 4.9 - <i>Layout</i> da PCB AWR-19_FSM.....	47
Figura 4.10 – Representação 3D da PCB AWR-19_FSM.....	47
Figura 6.1 - Desenho (à esquerda) e imagem real (à direita) do AWR (a) vista superior; (b) vista inferior; (c) vista lateral direita; (d) vista dianteira; (e) vista traseira.	55
Figura 8.1 - Marcação CE.....	62
Figura 8.2 - Símbolos de perigo: (a) perigoso para o ambiente; (b) corrosivo; (c) comburente; (d) inflamável; (e) explosivo; (f) tóxico; (g) vários perigos; (h) <i>Eletrostatic Sensitive Device - ESD</i>	63
Figura 8.3 - Símbolo WEEE.....	63

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Sensores e sua utilização.....	15
Tabela 2.2 - Tabelas de verdade do <i>driver</i> L298N (a) Controlo do Motor A; (b) Controlo do Motor B.	17
Tabela 2.3 - Tabela completa para determinação da lógica completa da máquina de estados.	26
Tabela 2.4 - Atribuição de estados.	27
Tabela 2.5 - Tabela de excitação do <i>flip-flop</i> JK.....	27
Tabela 3.1 - Simulações dos circuitos de controlo da velocidade dos motores.....	37
Tabela 5.1 - Lista de componentes.	49
Tabela 7.1 - <i>Duty cycle</i> do sinal PWM de saída em função da tensão de entrada.....	57
Tabela 8.1 - Tempo de vida dos componentes com maior probabilidade de falha, usados no AWR.	60
Tabela 9.1 - Número de horas despendidas por elemento	66

Acrónimos e Siglas

Acrónimo/Sigla	Significado
AWR	<i>Analog Waiter Robot</i> Robô Empregado de Mesa Analógico
LED	<i>Light Emitting Diode</i> Díodo Emissor de Luz
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> Modulação de Largura de Pulso
BMS	<i>Battery Management System</i> Sistema de Manutenção das Baterias
FW	<i>Forward</i> Para a Frente
BW	<i>Backwards</i> Para Trás
FWR	<i>Forward Right</i> Motor Direito para a Frente
FWL	<i>Forward Left</i> Motor Esquerdo para a Frente

	<i>Backwards Right</i>
BWR	Motor Direito para Trás
	<i>Backwards Left</i>
BWL	Motor Esquerdo para Trás
	<i>Electrostatic-Sensitive Device</i>
ESD	Equipamento Sensível à Eletricidade Estática
	<i>Printed Circuit Board</i>
PCB	Placa de Circuito Impresso
	<i>Integrated Circuit</i>
IC	Circuito Integrado
AmpOp	Amplificador Operacional
	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>
WEEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTBF	Período Médio Entre Falhas
f_{osc}	Frequência de Oscilação

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

Perante o atual panorama pandémico da Covid-19 [1] pretendeu-se, com a realização do Projeto Integrador da Unidade Curricular de LPI I do curso Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores, a implementação de uma ideia com o objetivo de impactar positivamente a vida das pessoas infetadas pela doença, bem como dos que as rodeiam. Para diminuir os contactos interpessoais, tencionou-se criar um robô que faça chegar bens essenciais a pessoas em isolamento.

A maioria das ideias nesta área tem como foco principal a saúde pública da população em geral, tais como, robôs de desinfeção [2], robôs que repõem o *stock* em hospitais [3] ou que medem a temperatura corporal através de câmaras [4]. Há menos projetos com foco individual em pessoas que tenham contraído a doença.

Na China existe um robô (*little peanut*) [5] com a mesma finalidade, que foi utilizado num hotel para entregar comida porta a porta a hóspedes com suspeita de infecção.

Tendo em consideração que uma pessoa em isolamento deve evitar o contacto com o mundo exterior, pretende-se desenvolver um produto que permita a entrega e recolha de bens essenciais de forma segura. De forma a facilitar a sua desinfeção e o seu manuseamento, o robô deverá ter superfícies lisas e uma interface simples. A versatilidade do sistema permitirá que, mesmo após o contexto pandémico, o robô possa auxiliar na distribuição de medicamentos ou outros bens essenciais em contexto hospitalar, por exemplo. O mesmo robô pode funcionar fora deste contexto, dependendo das funcionalidades requeridas.

1.2 Enquadramento

O *Analog Waiter Robot* (AWR) é um robô seguidor de linha focado na assistência a pessoas em isolamento que não podem contactar com o mundo exterior. Basta colocar no seu suporte o que se pretende fazer chegar ao paciente, colocá-lo sobre uma linha indicadora do seu trajeto, acioná-lo e este

seguirá o percurso até ao destino. Uma vez chegado ao destino, o paciente poderá recolher de forma segura os bens essenciais transportados, dando início a uma marcha de retorno ao local de origem.

1.3 Especificações Previstas

O AWR terá de se deslocar entre dois pontos, previamente definidos, com base numa linha instalada nos meios de acesso à divisão em que o paciente em questão se situa.

O robô terá de ser colocado sobre a linha com os bens essenciais (medicação e/ou alimentos), sobre este, num tabuleiro. Após estar alinhado, deverá ser ligado por um funcionário responsável, para que inicie a sua trajetória.



Figura 1.1 - Linha perpendicular de fim de percurso.

Ao chegar ao destino, demarcado com uma linha perpendicular (Figura 1.1), o AWR fará uma rotação de 180 ° sobre a linha e deverá parar de forma a que o paciente recolha os bens a si destinados. Quando o paciente desejar, poderá acionar o robô de forma a que este reinicie o seguimento da linha de volta ao ponto de partida. Como a alimentação do robô faz uso de baterias, eventualmente, terá de ser ligado à rede elétrica para ser carregado.

O tipo de desenvolvimento deste produto pode ser classificado como “misto”, uma vez que não tem necessariamente características inovadoras, mas é concebido para servir as necessidades particulares de um comprador. O produto será composto na sua totalidade por componentes ou subsistemas que são comprados “off-the-shelf”, isto é, que só precisam de ser instalados e configurados para entrarem em funcionamento.

1.4 Planeamento

Na Figura 1.2, mostra-se o diagrama de Gantt do planeamento inicial elaborado na etapa 0 deste projeto.

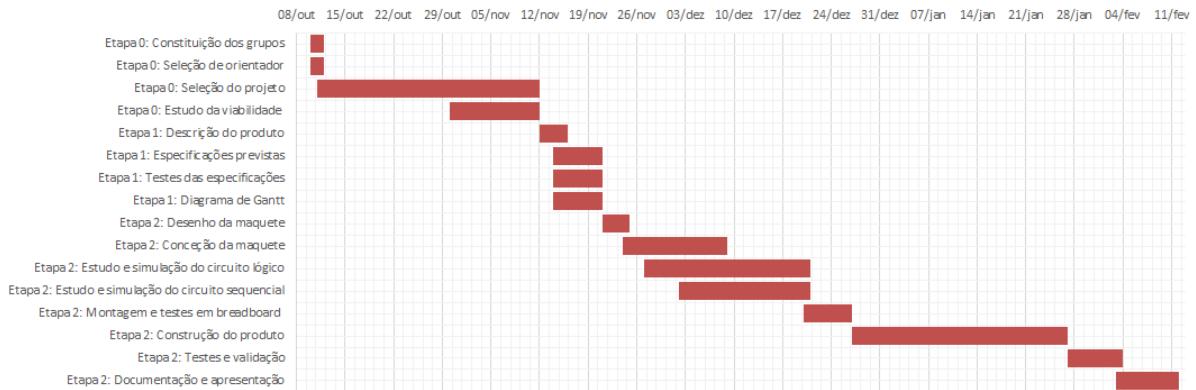


Figura 1.2 - Diagrama de Gantt do planeamento inicial.

Face ao confinamento geral [6], foi necessário reduzir a componente prática do projeto, nomeadamente a realização de ensaios experimentais e validação do produto. Foi feita uma análise mais cuidada do estudo da fiabilidade, segurança e certificação. A Figura 1.3 apresenta o diagrama de Gantt com as alterações efetuadas.

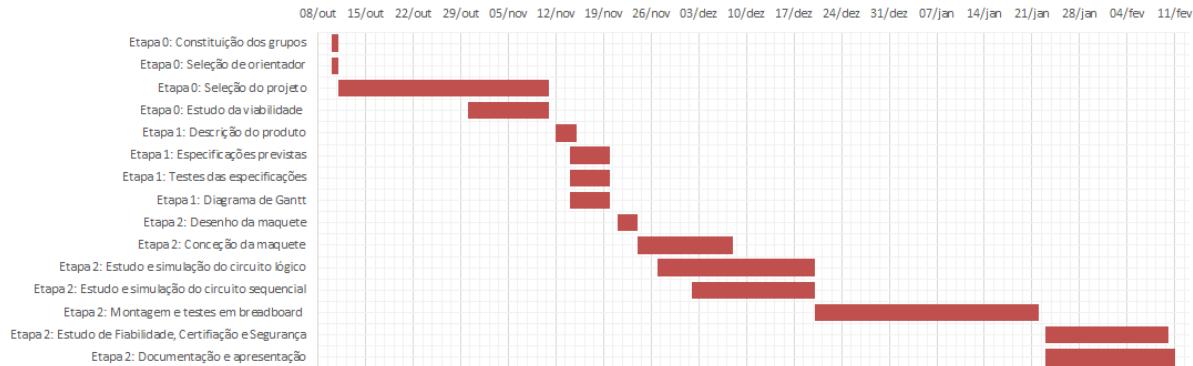


Figura 1.3 - Diagrama de Gantt do planeamento revisto.

Capítulo 2

Desenho dos Circuitos Eletrónicos

2.1 Introdução

Para o AWR seguir a linha escolheu-se o *array* de sensores QTR-8A, apresentado na Figura 2.1. Este é alimentado com 5 V e tem oito sensores analógicos que apresentam na sua saída um valor de tensão compreendido entre 0 V e 5 V. Sobre uma superfície branca, os sensores medem uma tensão de, aproximadamente, 0 V. Já quando se encontram sobre uma superfície preta, os sensores medem uma tensão de, sensivelmente, 5 V. Para as restantes cores, os sensores apresentam tensões entre estas duas gamas.

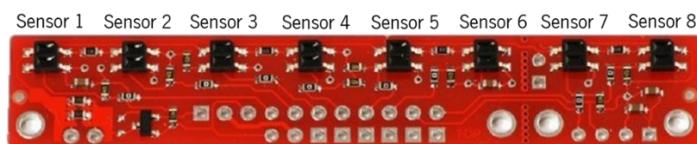


Figura 2.1 - Array de sensores QTR-8A.

A Tabela 2.1 apresenta a finalidade dos sensores do QTR-8A nos circuitos do AWR.

Tabela 2.1 - Sensores e sua utilização.

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
Máquina de Estados	-	Seguidor de linha	-	Máquina de Estados	Seguidor de linha	-	Máquina de Estados

O robô pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 2.2. As entradas do sistema são o Sensor 1, Sensor 3, Sensor 5, Sensor 6, Sensor 8 e o Botão (botão de pressão de interface com o utilizador).

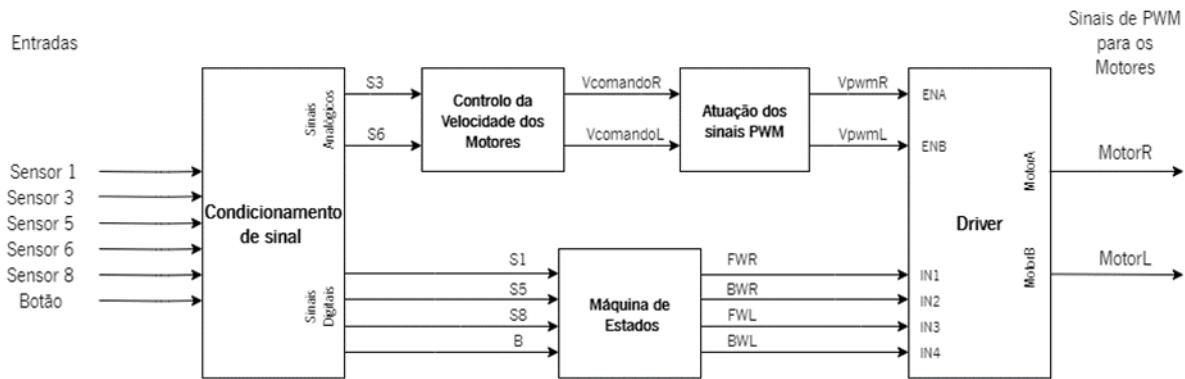


Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema.

Para os sinais de entrada poderem ser usados, têm de passar por circuitos de condicionamento de sinal, necessários para minimizar o efeito de carga do sensor, convertendo os sinais analógicos em digitais. O circuito possui ainda circuitos analógicos de *debounce* de forma a minimizar as vibrações mecânicas do botão de pressão. Assim, os sinais de entrada condicionados serão S_1 , S_3 , S_5 , S_6 , S_8 e B , respetivamente.

Os circuitos de controlo têm, como entradas, S_3 e S_6 , e produzem dois sinais contínuos, $V_{comandoR}$ e $V_{comandoL}$. Estes são usados nos circuitos de atuação que os convertem em sinais PWM, V_{pwmR} e V_{pwmL} . Em conjunto, estes dois blocos controlam a velocidade de rotação dos motores.

Paralelamente, está em funcionamento um circuito sequencial que controla o estado de funcionamento do robô – máquina de estados – cujas entradas são S_1 , S_5 , S_8 e B (sinais digitais). Este circuito tem quatro saídas – FWR , BWR , FWL , BWL – duas saídas para cada motor, sendo responsáveis pelo sentido de rotação dos mesmos.

A ação conjunta dos circuitos acima descritos permite controlar os motores. Isto apenas é possível com auxílio de um *driver*, apresentado na Figura 2.3.

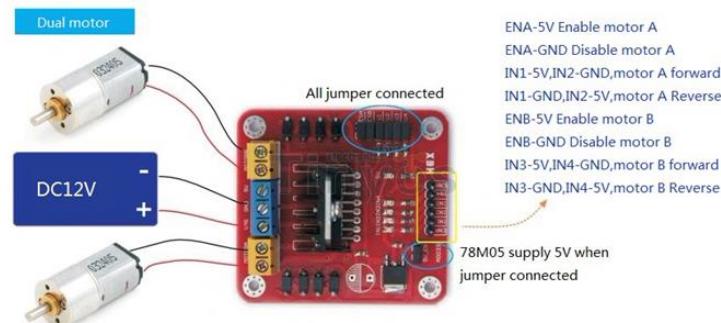


Figura 2.3 - Módulo Driver L298N.

Este *driver* possui seis entradas, três para cada motor: os sinais de ENA e ENB permitem ativar ou desativar os motores, controlando as suas velocidades de rotação. Por sua vez, os sinais de $IN1$, $IN2$,

$/N3$ e $/N4$ definem o modo de rotação de cada motor. Na Tabela 2.2 encontra-se exemplificado o modo de operação do motor em função da combinação lógica dos sinais de entrada.

Tabela 2.2 - Tabelas de verdade do *driver* L298N (a) Controlo do Motor A; (b) Controlo do Motor B.

(a)				(b)			
ENA	IN1	IN2	Motor A	ENB	IN3	IN4	Motor B
0 V	N/A	N/A	OFF	0 V	N/A	N/A	OFF
5 V	0 V	0 V	Trava	5 V	0 V	0 V	Trava
5 V	0 V	5 V	Sentido anti-horário	5 V	0 V	5 V	Sentido anti-horário
5 V	5 V	0 V	Sentido horário	5 V	5 V	0 V	Sentido horário
5 V	5 V	5 V	Trava	5 V	5 V	5 V	Trava

Assim sendo, o sinal V_{pwmR} está ligado à entrada ENA e os sinais FWR e BWR às entradas $/N1$ e $/N2$, respetivamente, controlando o motor A (motor do lado direito do robô). Da mesma forma, o sinal V_{pwmL} está ligado à entrada ENB e os sinais FWL e BWL às entradas $/N3$ e $/N4$, respetivamente, controlando o motor B (motor do lado esquerdo do robô).

2.2 Condicionamento de Sinal

Estes circuitos têm como objetivo fazer o condicionamento de sinal dos sensores de linha bem como do botão de interface com o utilizador. Ou seja, fornecer valores precisos, sem flutuações ou ruído, uma vez que são essenciais para o correto funcionamento do robô.

No circuito de condicionamento de sinal dos sensores, as saídas analógicas são obtidas através de um seguidor de tensão que tem como objetivo minimizar o efeito de carga dos sensores usados para o controlo da velocidade dos motores, como representado na Figura 2.4.

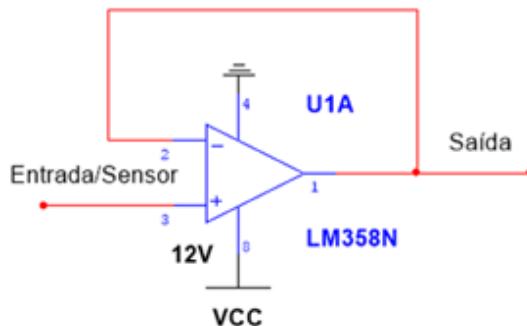


Figura 2.4 - Esquemático do circuito de condicionamento dos sensores a serem usados como componentes analógicos.

Num circuito digital apenas existem dois tipos de valores: nível lógico alto e nível lógico baixo. Atendendo às características dos circuitos integrados utilizados, é considerado nível lógico alto quando os valores de tensão atingem 2 V [7]. Deste modo, para as saídas dos sensores 1, 5 e 8 poderem ser usadas no circuito da máquina de estados é necessário transformá-las em valores digitais. Assim, estes valores são introduzidos num seguidor de tensão seguido de um circuito comparador não inversor com histerese, como ilustrado na Figura 2.5. Desta forma, o valor à saída deste comparador é 0 V para um valor de entrada mais próximo do valor de referência da cor preta, e 5 V a partir deste valor.

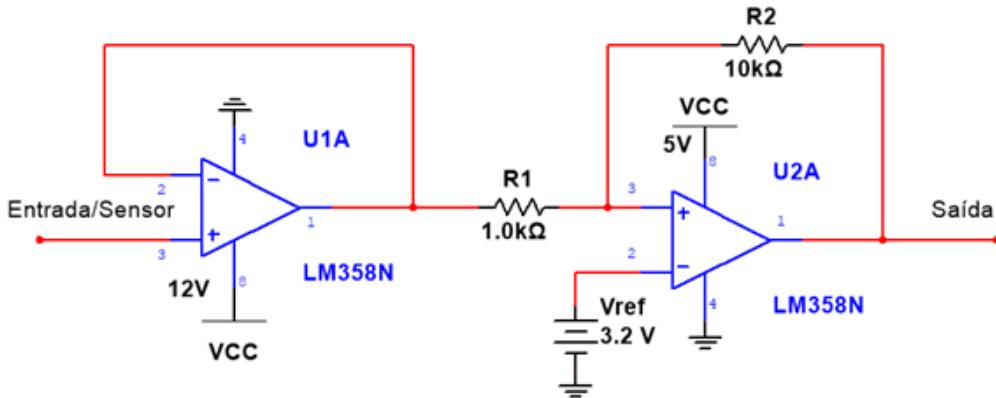


Figura 2.5 - Esquemático do circuito de condicionamento dos sensores a serem usados como componentes digitais.

A equação (2.1) permite determinar a relação entre R_1 e R_2 a partir dos valores de Δh e V_{sat} .

$$\Delta h = 2 V_{sat} \frac{R_1}{R_2} \quad (2.1)$$

Considerou-se $\Delta h = 1 V$ e um valor teórico de $V_{sat} = 5 V$, que, na prática, será ligeiramente inferior. No entanto, não é um valor crítico para o funcionamento do circuito uma vez que, tal como referido anteriormente, o nível lógico alto dos circuitos integrados é atingido a partir de um valor de tensão de 2 V. Além do mais, as medidas dos sensores nunca são ideais, pelo que os cálculos apenas são usados como referência. Após determinadas as resistências a usar e de estimado um valor para a tensão de referência, V_{ref} , esta pode ser ajustada para um valor que melhor se adapta aos resultados práticos. Na equação (2.1) substituiu-se os valores de Δh e V_{sat} , obtendo-se as equações (2.2) e (2.3).

$$\Leftrightarrow 1 = 25 \frac{R_1}{R_2} \quad (2.2)$$

$$\Leftrightarrow R_2 = 10 R_1 \quad (2.3)$$

Considerando $V_{cen} = 3,5 V$, tem-se que $V_{inf} = 3 V$ e $V_{sup} = 4 V$.

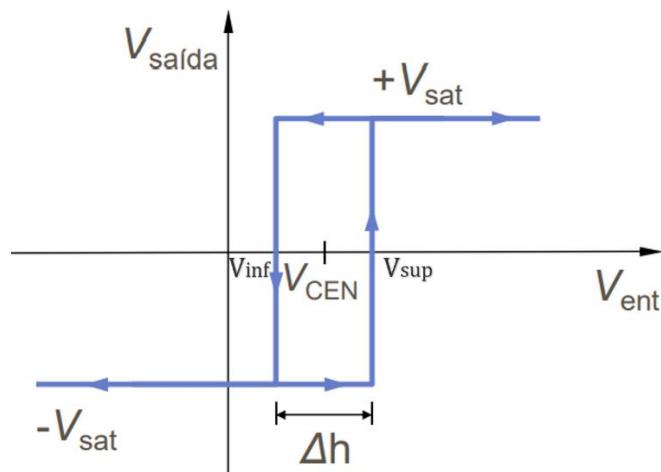


Figura 2.6 - Relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada de um comparador de nível não inversor com histerese.

Como se mostra na Figura 2.6, a saída do comparador comuta para nível lógico alto quando o valor da leitura do sensor é superior a 4 V e apenas volta a nível lógico baixo quando o valor da leitura do sensor é inferior a 3 V. Fazendo \$R_1 = 1 \text{ k}\Omega\$, obtém-se \$R_2 = 10 \text{ k}\Omega\$. Utilizaram-se as equações (2.4) a (2.7) para determinar \$V_{\text{ref}}\$.

$$V_{\text{cen}} = V_{\text{ref}} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.4)$$

$$\Leftrightarrow 3,5 = V_{\text{ref}} \frac{1 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \quad (2.5)$$

$$\Leftrightarrow V_{\text{ref}} = \frac{3,5 \cdot 10}{11} \quad (2.6)$$

$$\Leftrightarrow V_{\text{ref}} = 3,2 \text{ V} \quad (2.7)$$

Foi usado um botão de pressão para que o robô inicie a marcha. Todavia, quando uma saída provém diretamente de um botão de pressão, esta possui interferências provocadas pelas oscilações mecânicas (*bounce*) nos instantes de mudança de estado (abrir ou fechar o interruptor). Assim, na máquina de estados (subcapítulo 2.5), para garantir que a mudança de nível lógico se faça sem oscilações, torna-se necessário implementar um circuito de *debounce* como, por exemplo, o apresentado na Figura 2.7.

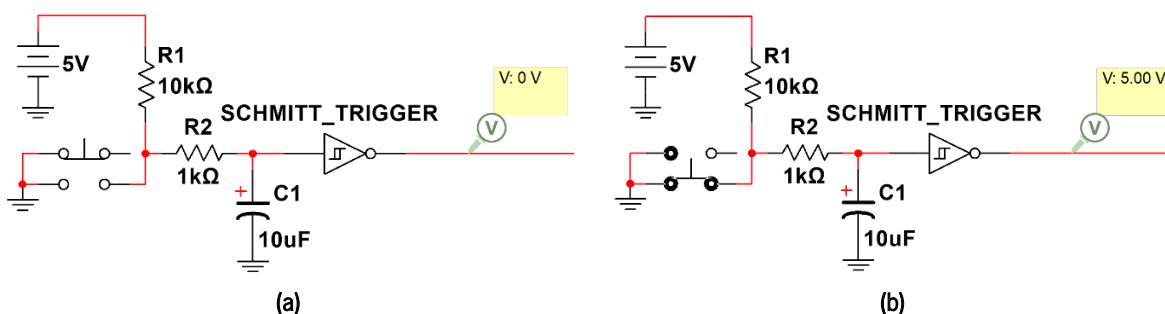


Figura 2.7 - Circuito de *debounce* do botão de pressão (a) Botão não premido; (b) Botão premido.

O condensador C_1 em conjunto com a resistência R_2 funcionam como um filtro passa-baixo com o objetivo de reduzir o ruído elétrico provocado pelas vibrações mecânicas do botão. Assim, quando o botão não está pressionado, os terminais do condensador apresentarão uma tensão de 5 V e, quando pressionado, 0 V. Posto que, num circuito sequencial, o nível lógico alto corresponde ao acionamento de uma entrada (botão, neste caso), será necessário utilizar uma lógica inversora na saída do condensador. Para isso, usou-se uma porta lógica Schmitt-Trigger (integrado 74HCT14 [7]) que funciona como um circuito comparador inversor com histerese centrado em 0 V. Assim, a imunidade ao ruído aumenta e, como o sinal é invertido, a saída do circuito estará a nível lógico alto quando o botão for pressionado.

2.3 Circuito de Controlo da Velocidade dos Motores

O controlo da velocidade de rotação dos motores está diretamente relacionado com a leitura dos valores de tensão obtidos pelo QTR-8A. Os sinais utilizados para o propósito foram os $S3$ e $S6$, como apresentado anteriormente na Figura 2.2.

Este bloco é composto por cinco estágios, como representado na Figura 2.8. Uma vez que cada motor tem de ser controlado individualmente, é necessário implementar dois circuitos que apenas diferem no facto de as entradas de um estarem trocadas em relação às entradas do outro.

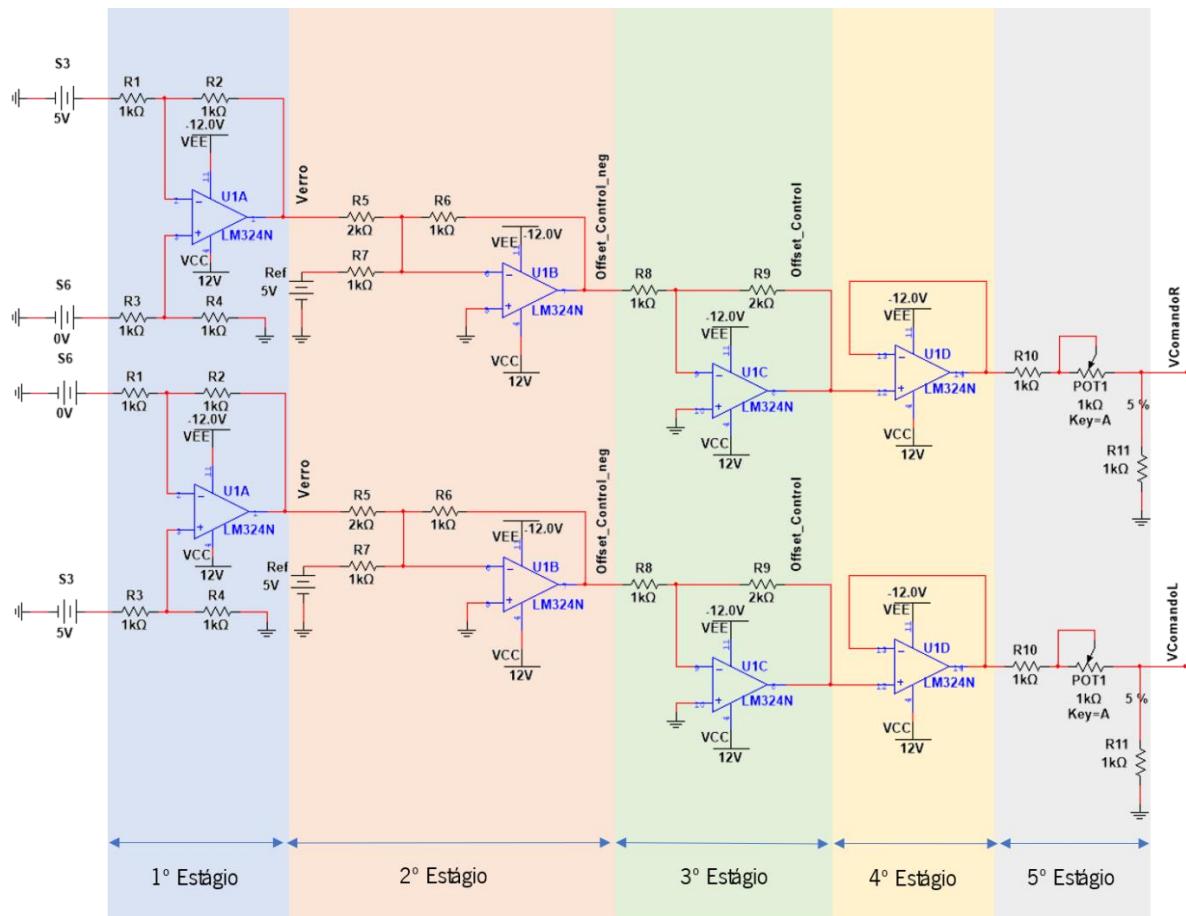


Figura 2.8 - Esquemático do circuito de controlo da velocidade dos motores.

O primeiro estágio deste bloco é um circuito subtrator e estabelece a diferença entre a tensão à entrada não inversora e a tensão à entrada inversora, ou seja, a diferença entre os valores lidos pelos dois sensores ($S3$ e $S6$). Considerando V_+ a tensão da porta não inversora do primeiro AmpOp e V_- a tensão da porta inversora chega-se à equação (2.8). Como cada um destes valores pode variar entre 0 V e 5 V, o valor da tensão de erro será, no máximo, 5 V e, no mínimo, - 5 V.

$$V_{erro} = V_+ - V_- \quad (2.8)$$

O segundo e terceiro estágios são, respetivamente, um circuito somador inversor e um circuito amplificador inversor. Em conjunto, estes dois estágios somam uma tensão de *offset* de 10 V à saída do primeiro estágio, fazendo com a que a tensão à saída do terceiro estágio tenha um valor compreendido entre 5 V e 15 V. A equação (2.9) define a tensão à saída do circuito somador inversor. As equações (2.9) a (2.14) mostram os cálculos realizados até à obtenção do valor final apresentado na equação (2.14).

$$offset_{control_{neg}} = -R_6 \left(\frac{1}{R_5} V_{erro} + \frac{1}{R_7} 5 \right) \quad (2.9)$$

$$\Leftrightarrow offset_{control_{neg}} = -1 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{2 \cdot 10^3} V_{erro} + \frac{1}{1 \cdot 10^3} 5 \right) \quad (2.10)$$

$$\Leftrightarrow offset_{control_{neg}} = -\frac{V_{erro}}{2} - 5 \quad (2.11)$$

$$offset_{control} = -\frac{R_9}{R_8} offset_{control_{neg}} \quad (2.12)$$

$$\Leftrightarrow offset_{control} = -2 offset_{control_{neg}} \quad (2.13)$$

$$\Leftrightarrow offset_{control} = V_{erro} + 10 \quad (2.14)$$

O quarto estágio é um circuito seguidor de tensão e tem como objetivo minimizar o efeito de carga do sensor, para que a entrada no circuito seguinte seja a mais estável possível.

O último estágio é um divisor de tensão. Usou-se um potenciômetro, *POT*, com o objetivo de permitir corrigir e compensar diferenças entre os resultados esperados e os resultados reais devido às tolerâncias dos componentes, bem como, conseguir um ajuste mais preciso da velocidade.

A saída dos circuitos de controlo da velocidade dos motores pode ser obtida recorrendo à equação (2.15).

$$V_{comando} = \frac{R_{11}}{POT + R_{11}} offset_{control} \quad (2.15)$$

2.4 Circuito de Atuação dos Sinais PWM

O circuito de atuação dos sinais PWM é do tipo proporcional, ou seja, a tensão de entrada deste circuito será proporcional ao valor contínuo do sinal PWM gerado.

Para gerar os sinais PWM que atuam sobre os motores, foi utilizado o IC TL494 *Pulse-Width-Modulation Control Circuit*[8]. Este circuito integrado possui um oscilador interno cuja frequência é dada pela malha R_t e C_t , com uma amplitude compreendida entre 0 V e 3,3 V. Com o auxílio da equação (2.16), é possível determinar os valores de R_t e de C_t e, assim, originar uma onda portadora interna dente de serra com a frequência pretendida.

$$f_{osc} = \frac{1}{R_t C_t} \quad (2.16)$$

A onda dente de serra é posteriormente comparada com um sinal de entrada no pino 3 (Figura 2.9). Variando o valor de entrada é possível variar o ponto de comparação e, consequentemente, o *duty cycle* do sinal de PWM resultante. O sinal de PWM é posteriormente utilizado para o controlo dos motores.

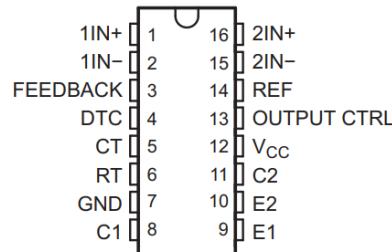


Figura 2.9 - Pinout do TL494.

O esquemático do circuito de atuação dos sinais PWM está ilustrado na Figura 2.10.

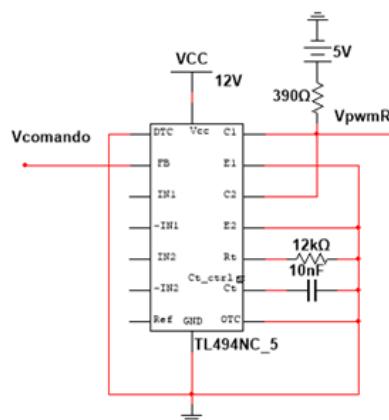


Figura 2.10 - Esquemático do circuito de atuação dos sinais PWM.

A entrada deste circuito está ligada à porta de feedback. Às entradas R_t e C_t ligou-se uma resistência de 12 kΩ e um condensador de 10 nF, respetivamente, obtendo-se uma frequência de oscilação 8,3 kHz. A saída tem uma resistência *pull-up* ligada a 5 V para que a amplitude da onda PWM gerada tenha este valor. Para calcular a resistência *pull-up*, recorreu-se ao *datasheet* do TL494 [8], do qual se retirou um valor máximo de corrente de saída de 200 mA para cada coletor do transístor. Estipulando um valor de corrente de 10 mA e sabendo que os transístores estão em paralelo e que a tensão nos seus coletores é de 1,1 V. Fazendo uso da Lei de Ohm, da equação (2.17) à equação (2.20), calculou-se o valor da resistência de *pull-up*.

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad (2.17)$$

$$\Leftrightarrow I_R = \frac{5 - 1,1}{R} \quad (2.18)$$

$$\Leftrightarrow R = \frac{3,9}{10 \cdot 10^{-3}} \quad (2.19)$$

$$\Leftrightarrow R = 390 \Omega \quad (2.20)$$

Da equação (2.21) à equação (2.23), calculou-se a potência dissipada pela resistência *pull-up*.

$$P = I^2 R \quad (2.21)$$

$$\Leftrightarrow P = (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 390 \quad (2.22)$$

$$\Leftrightarrow P = 0,039 \text{ W} \quad (2.23)$$

Uma vez que são utilizadas resistências de 1/4 W e que o valor calculado na equação (2.23) é inferior ao valor máximo admitido pela resistência (0,25 W), este valor pode ser utilizado.

2.5 Máquina de Estados

De forma a ser possível controlar o estado de funcionamento do robô, ou seja, fazê-lo seguir a linha, parar ou rodar 180 °, desenvolveu-se uma máquina de estados sequencial síncrona, mais especificamente uma máquina de Moore, representada na Figura 2.11, já que as suas saídas dependem apenas do estado atual.

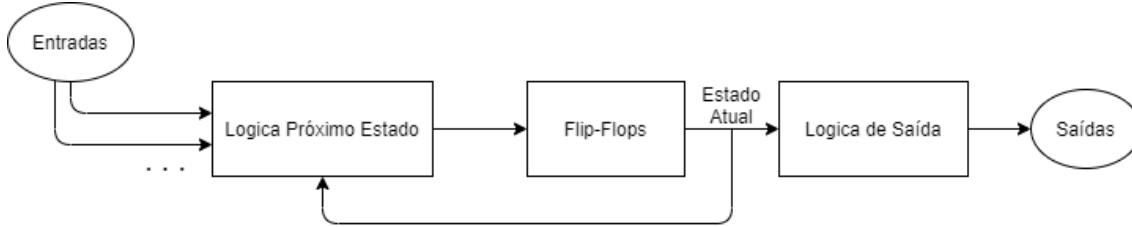


Figura 2.11 - Máquina de Moore.

Numa máquina de estados, o objetivo é determinar a “Lógica do Próximo Estado” e a “Lógica de Saída” do circuito. Como apresentado, a “Lógica de saída” depende apenas do estado atual. Já a “Lógica do Próximo Estado” depende do estado atual e das entradas do circuito.

O robô deve parar sobre uma linha horizontal colocada no final do percurso e, nesse momento, o robô deve dar uma volta de 180 ° sobre o seu eixo. Após o acionamento de um botão, o robô deve reiniciar a marcha seguindo a linha em direção oposta.

De modo a detetar a linha no final do percurso, usaram-se os dois sensores das pontas do *array* de sensores (Sensor 1 e Sensor 8). Usou-se também um sensor do centro do QTR-8A (Sensor 5) de forma a interromper a rotação quando este encontrar a linha preta. Nesse momento, o robô poderá ser acionado através de um botão de pressão (Botão) para que este volte a seguir a linha.

Os motores são controlados por meio do módulo *driverL298N* [9], podendo estar parados, a rodar no sentido horário ou no sentido anti-horário. Para isso, na máquina de estados existem duas saídas para cada motor, sendo que uma controla o movimento no sentido horário e outra no sentido anti-horário. Como o robô usa dois motores, existem quatro saídas, que quando estão ativas (nível lógico alto) despoletam as seguintes respostas:

- *FWR* – motor da direita roda no sentido horário (*Forward Right*);
- *FWL* – motor da esquerda roda no sentido horário (*Forward Left*);
- *BWR* – motor da direita roda no sentido anti-horário (*Backwards Right*);
- *BWL* – motor da esquerda roda no sentido anti-horário (*Backwards Left*).

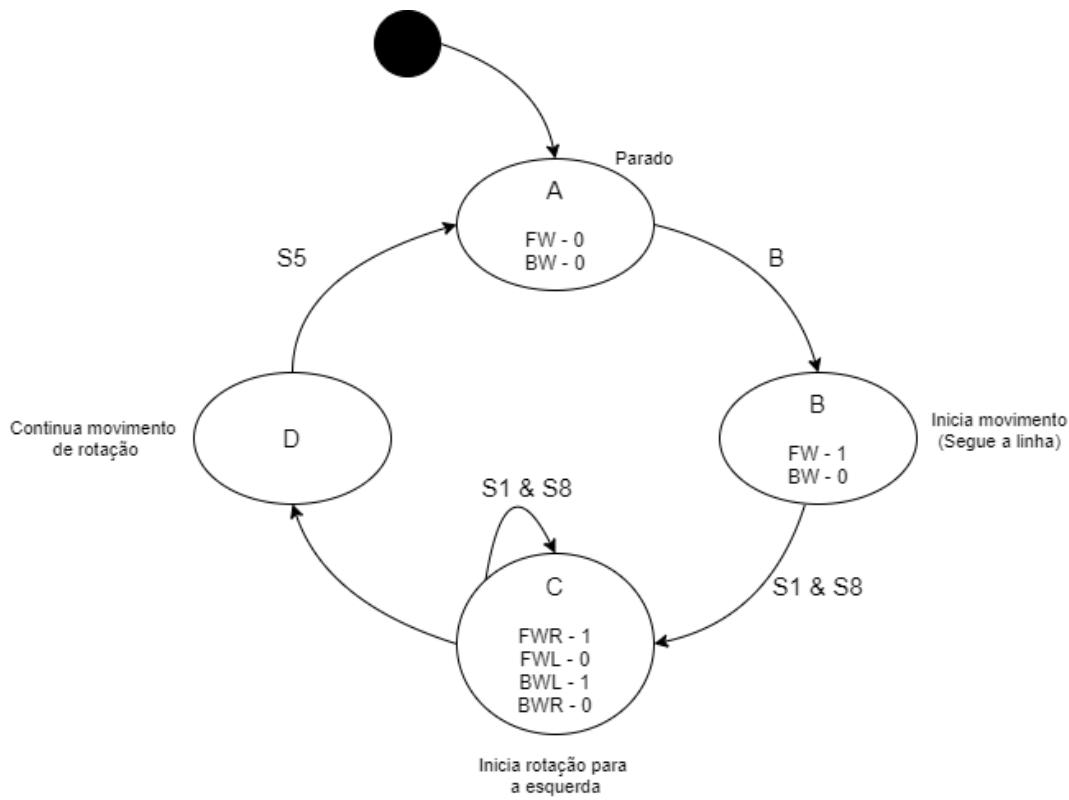


Figura 2.12 - Diagrama da máquina de estados.

Na Figura 2.12, mostra-se o diagrama da máquina de estados, usada para controlar o modo de funcionamento do robô. FW representa os valores de FWR e FWL . BW representa os valores de BWR e BWL .

Inicialmente, no estado “A”, o robô está parado ($FW = 0$ e $BW = 0$), e espera pelo acionamento do botão para iniciar a marcha. Após o acionamento do botão, B a nível lógico alto, no estado “B” o robô inicia a sua trajetória, seguindo a linha com os dois motores a rodar no sentido horário ($FW = 1$ e $BW = 0$). Quando o *array* de sensores estiver posicionado sobre a linha horizontal preta (fim do trajeto), $S1$ e $S8$ estarão a nível lógico alto, e ocorrerá a transição para o estado “C”. Neste estado, o robô inicia a rotação para a esquerda ($FWR = 1$, $FWL = 0$, $BWR = 0$ e $BWL = 1$) e não transita de estado enquanto $S1$ e $S8$ estiverem a nível lógico alto, isto é, enquanto o *array* de sensores estiver sobre a linha horizontal. Quando o *array* de sensores sair desta, $S1$ e $S8$ estarão a nível lógico baixo, avançando para o estado “D”, no qual o robô continua a rotação, mantendo as suas saídas até que o sensor 5 esteja sobre a linha vertical, com $S5$ a nível lógico alto. Assim posicionado, o robô volta ao estado inicial.

De forma a implementar a máquina de estados, de acordo com o diagrama de estados, determinou-se toda a lógica necessária, construindo a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Tabela completa para determinação da lógica completa da máquina de estados.

B1	B0	S1	S5	S8	B	E	E*	B1*	B0*	Jb	Kb	Ja	Ka	FWR	BWR	FWL	BWL
0	0	0	0	0	0	A	A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0		A	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1		B	0	1	0	X	1	X	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	B	B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	1		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	0		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	0		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1		C	1	0	1	X	X	1	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0		C	1	0	1	X	X	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	1	1	0	1		B	0	1	0	X	X	0	1	0	1	0
0	1	1	1	1	0		C	1	0	1	X	X	1	1	0	1	0
0	1	1	1	1	1		C	1	0	1	X	X	1	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	C	D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	0	1	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	0	1	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	0	1	1	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	0	0	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	0	1	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	0	1	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	1	0	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	1	0	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	0	1	1	1	1		D	1	1	X	0	1	X	1	0	0	1
1	1	0	0	0	0	D	D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1		D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	0	0	1	0		D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	0	1	0	0		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	0	1	0	1		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	0	1	1	0		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	0	1	1	1		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	1	0	0	0		D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1		D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0		D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	1		D	1	1	X	0	X	0	1	0	0	1
1	1	1	1	0	0		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	1	1	0	1		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	1		A	0	0	X	1	X	1	1	0	0	1

Adicionaram-se duas colunas que indicam os bits do estado atual (*B1* e *B0*) e também as entradas da máquina de estados (*S1*, *S5*, *S8* e *B*). Como existem quatro entradas, há dezasseis (2^4) combinações possíveis para cada estado, o que resulta em sessenta e quatro possibilidades no total ($2^{4+2} = 64$) que será o número de linhas da Tabela 2.3.

A seguir, “ E ” representa o estado atual e “ E'' ” o estado seguinte. “ $B1''$ ” e “ $B0''$ ” representam os bits do estado seguinte. Estas colunas devem ser preenchidas de acordo com a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Atribuição de estados.

B1	B0	E
0	0	A
0	1	B
1	0	C
1	1	D

Sabendo que cada *flip-flop* permite a existência de dois estados e que existem quatro estados (A – D), selecionaram-se dois *flip-flops* do tipo J-K, que apresentam a tabela de excitação - Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Tabela de excitação do *flip-flop* JK.

Q	Q*	J	K
0	0	0	X
0	1	1	X
1	0	X	1
1	1	X	0

De acordo com esta tabela, foram preenchidas as colunas “ J ” e “ K ” para cada *flip-flop* (J_a e K_a , relativo a $B0$; J_b e K_b , relativo a $B1$). Para este efeito, determinou-se a lógica do próximo estado, em função das quatro entradas da máquina de estados, simplificada através de mapas de *Karnaugh*. Resolveram-se quatro mapas de *Karnaugh* (um para cada entrada J e K dos *flip-flops*) e obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 2.13.

Ja	$B1'.B + B1.(S1' + S8')$	Jb	$B0.(S1.S8)$
Ka	$B1.S5 + B1'.(S1.S8)$	Kb	$B0.S5$

Figura 2.13 - Lógica do próximo estado.

Adicionaram-se as colunas das saídas (FWR , FWL , BWR e BWL), as quais foram preenchidas de acordo com o estado atual. Para cada uma destas determinou-se a lógica de saída, que também foi simplificada através de mapas de *Karnaugh*. Os resultados obtidos foram os da Figura 2.14.

FWR	$B1 + B0$	FWL	$B1'.B0$
BWR	0	BWL	$B1$

Figura 2.14 - Lógica de saída.

Para implementar as expressões lógicas calculadas foram usados integrados da família HCT [10]. Esta família de integrados apresenta elevada impedância de entrada, e dessa forma, não afetam a parte do circuito onde estão conectadas.

De acordo com a lógica determinada, desenhou-se o circuito que implementa a máquina de estados (Figura 2.15).

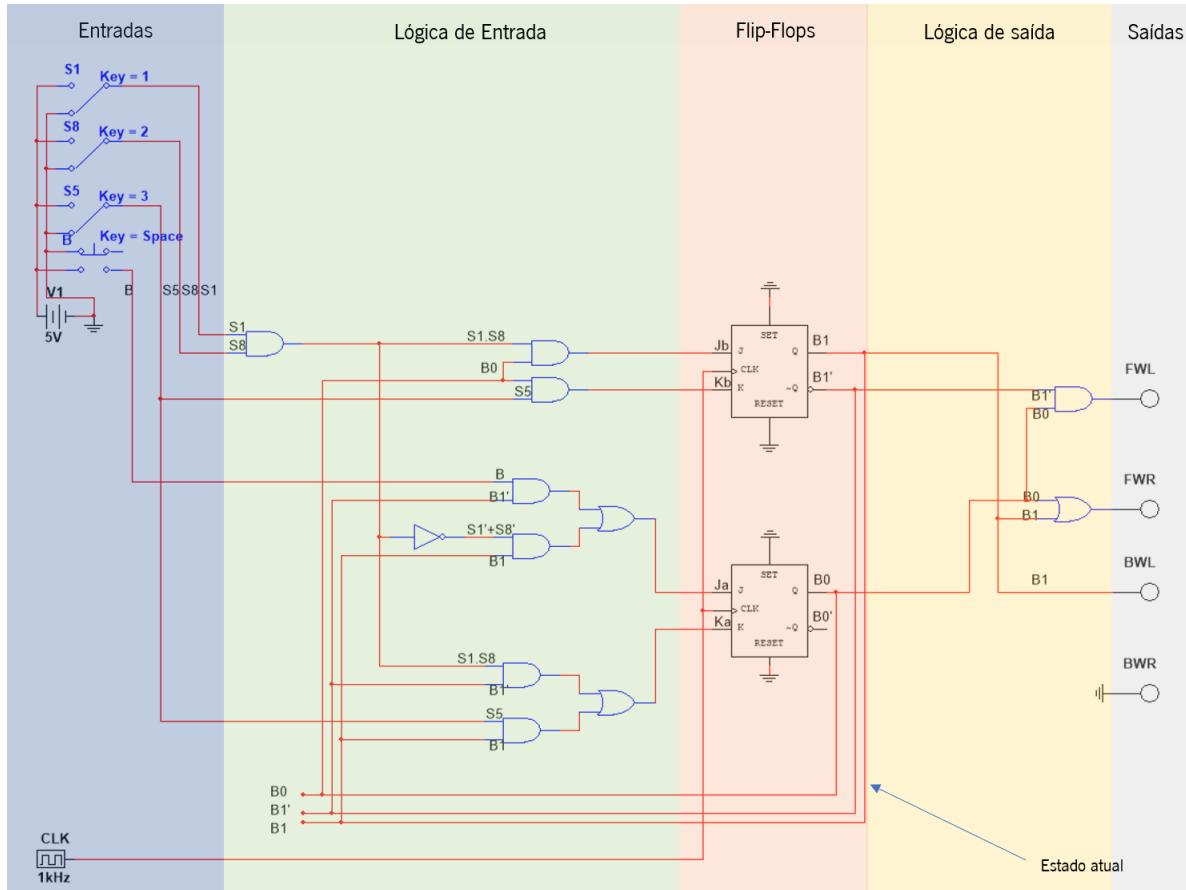


Figura 2.15 - Desenho da máquina de estados.

Tal como mostra a Figura 2.16, cada *flip-flop* J-K necessita de um sinal *clock* como entrada. O *clock* é um sinal em forma de onda quadrada com um *duty cycle* de, idealmente, 50 %. Dá-se uma transição entre estados sempre que, a cada pulso de *clock*, uma das entradas (J ou K) estiver a nível lógico alto.

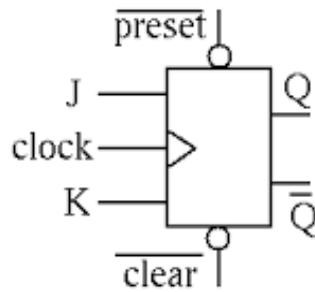


Figura 2.16 - Esquema do *flip-flop* J-K.

Para este efeito, implementou-se um oscilador usando o integrado NE555 numa montagem como multivibrador astável, como se apresenta na Figura 2.17. O condensador C_1 carrega até $\frac{2}{3} V_{cc}$ através

das resistências R_A e R_B (saída = 1). Quando C_1 atinge este valor, irá descarregar por R_B (saída=0), até uma tensão de $\frac{1}{3} V_{cc}$, e o ciclo repete-se.

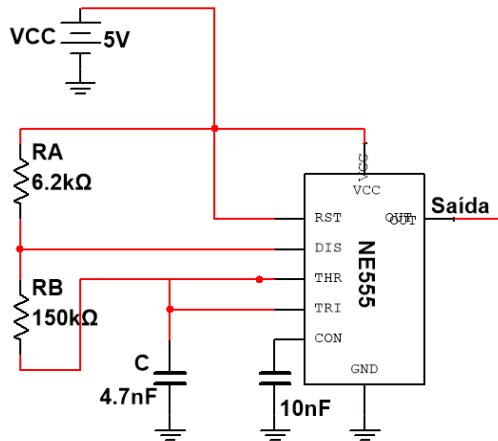


Figura 2.17 - Implementação do Oscilador.

Através dos seguintes cálculos, apresentados da equação (2.24) à equação (2.36), dimensionaram-se os componentes para obter uma onda quadrada de frequência 1 kHz com um *duty cycle* de 50 %, aproximadamente.

$$T_{ON} = 0,693 (R_A + R_B) C \quad T_{OFF} = 0,693 (R_B) C \quad (2.24)$$

$$\text{Duty - cycle} = 50 \% \quad (2.25)$$

$$\Leftrightarrow T_{ON} = T_{OFF} \quad (2.26)$$

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \quad (2.27)$$

$$\Leftrightarrow T = 0,693 (R_A + 2R_B) C \quad (2.28)$$

$$\Leftrightarrow f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow f = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B) C} \quad (2.29)$$

Para $f = 1 \text{ kHz}$ e $C = 4,7 \text{ nF}$:

$$(R_A + 2R_B) = 306383 \quad (2.30)$$

$$\text{Duty - cycle} = 1 - \frac{R_B}{R_A + 2R_B} \quad (2.31)$$

$$\Leftrightarrow R_B = 0,5 (R_A + 2R_B) \quad (2.32)$$

$$\Leftrightarrow R_B = 0,5 \times 306383 \quad (2.33)$$

$$\Leftrightarrow R_B = 153,2 \text{ k}\Omega \quad (2.34)$$

$$(R_A + 2R_B) = 306383 \quad (2.35)$$

$$\Leftrightarrow R_A = 6,4 \text{ k}\Omega \quad (2.36)$$

Foram selecionados os valores *standard* das resistências (Série E24) e do condensador (Série E12) mais próximos dos obtidos:

$$R_A = 6,2 \text{ k}\Omega \quad R_B = 150 \text{ k}\Omega \quad C = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$$

As entradas *Clear* dos *flip-flops* J-K utilizados são ativas a nível lógico baixo, isto é, se ligarmos esta entrada ao *ground*, ocorrerá um *reset* no *flip-flop* e a sua saída “*Q*” virá a nível lógico baixo, independentemente das suas entradas *J* e *K*. Assim, se na máquina de estados as entradas *Clear* forem ligadas ao *GND*, *B0* e *B1* ficarão a nível lógico baixo.

Experimentalmente, verificou-se que, quando alimentados, os *flip-flops* mantêm as saídas do estado anterior. Para que o robô inicie no primeiro estado de funcionamento (estado “A”), utilizou-se um circuito para efetuar um *reset* aos *flip-flops*, tal como mostra a Figura 2.18 (a).

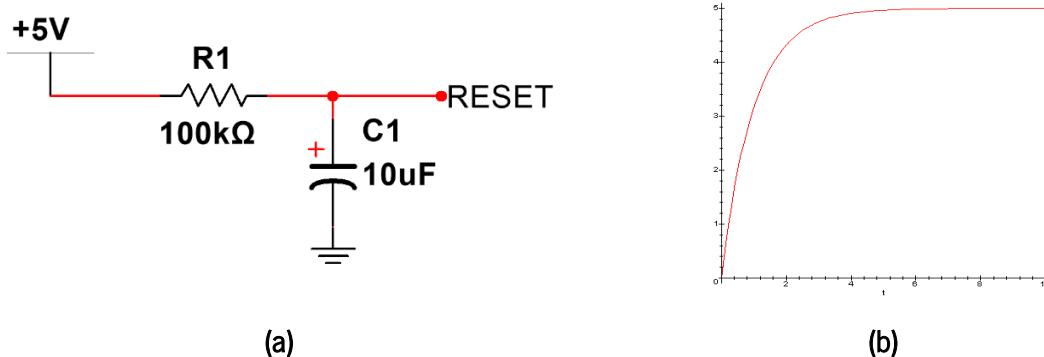


Figura 2.18 - Circuito RC de *reset* e a sua resposta no tempo.

Sabendo que a saída deste circuito estará a nível lógico baixo enquanto o condensador não carregar, a entrada *reset* dos *flip-flops* estará também a nível lógico baixo, o que resulta na ação de *reset*. Assim, logo que se alimentar a máquina de estados, os *flip-flops* apresentarão nas saídas “*Q*” o nível lógico baixo que representa o primeiro estado de funcionamento do robô. Após o condensador carregar (Figura 2.18 (b)), a entrada *reset* estará a nível lógico alto durante o resto do tempo de funcionamento, não provocando um *reset* indesejado.

2.6 Circuito de Alimentação

Para alimentar os circuitos é necessária uma alimentação simétrica de + 12 V e - 12 V. Foram utilizadas baterias recarregáveis LI-ION de 3,7 V [11], sendo, por isso, necessárias seis células. Para proteção das baterias e evitar problemas nos circuitos foram usados dois dispositivos de BMS [12], ligados tal como mostra a Figura 2.19.

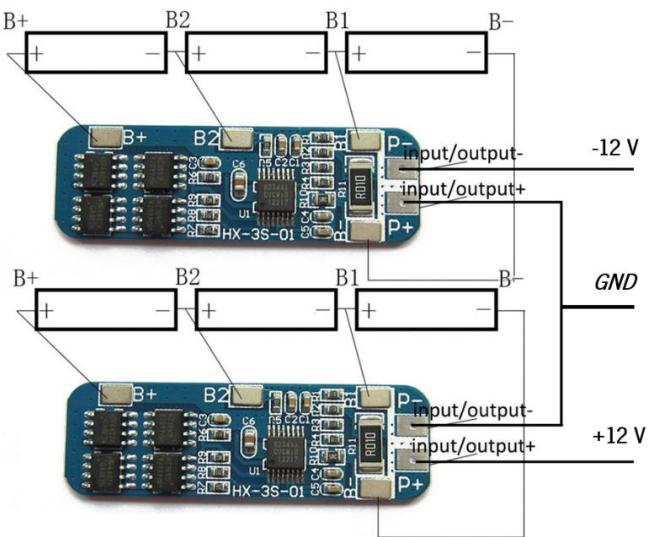


Figura 2.19 - Esquema de ligação das baterias e BMS.

Cada motor usado no AWR consome uma corrente de 580 mA [13] e como este possui dois motores, a corrente total do par será 1160 mA. Assumindo que os restantes circuitos do robô consomem 30 % deste valor, conclui-se que os circuitos consomem no total 1508 mA. Visto que cada célula possui 2200 mAh e considerando que esta tem um rendimento de 80 %, então estão disponíveis 1760 mAh. Assim, a autonomia da bateria será de 1 hora e 10 minutos. Caso a autonomia não seja suficiente, poderão ser adicionadas mais células em paralelo com as existentes.

De forma a obter tensões de 5 V, necessárias em alguns circuitos do AWR, usou-se um regulador de tensão fixa (LM7805 [14]), alimentado com a tensão proveniente das baterias (+ 12 V). Este componente debita uma corrente máxima de 1,5 A, que é suficiente para alimentar todos os componentes que necessitam de + 5 V.

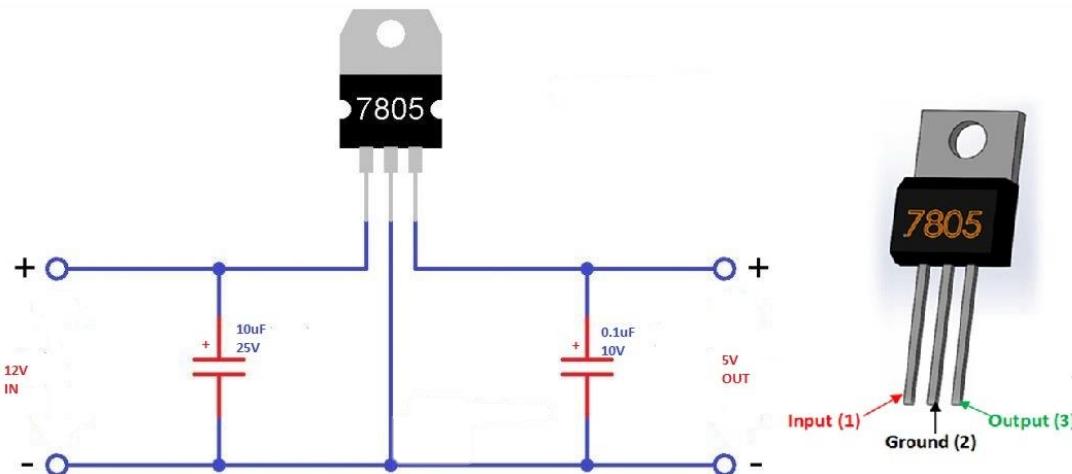


Figura 2.20 - Esquema de ligação do regulador de tensão (LM7805).

Capítulo 3

Simulação dos Circuitos Eletrónicos

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as simulações dos circuitos de condicionamento de sinal, controlo da velocidade dos motores, circuito de atuação dos sinais PWM e máquina de estados, realizadas no simulador *Multisim*.

3.2 Condicionamento de Sinal

A Figura 3.1 mostra o circuito de condicionamento dos sensores a serem usados como componentes analógicos. Como se pode constatar, a tensão de saída é igual à tensão de entrada salvo limitações reais dos AmpOps.

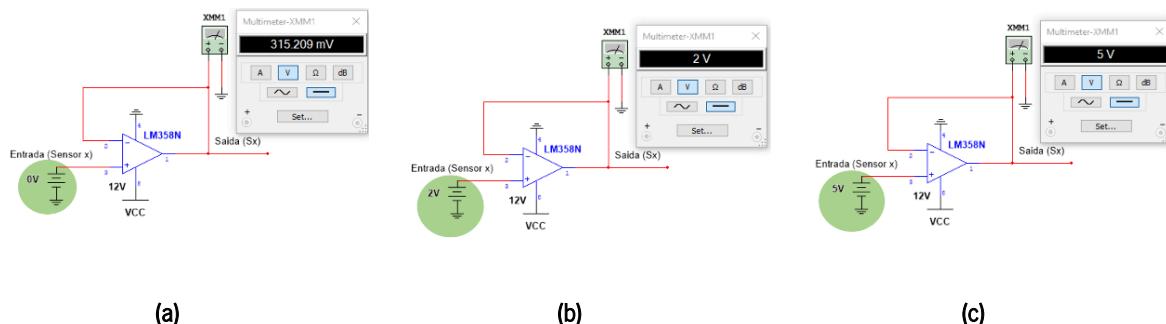


Figura 3.1 - Condicionamento de sinal para os sensores a serem usados analiticamente (a) Entrada 0 V; (b) Entrada 2 V; (c) Entrada 5 V.

A Figura 3.2 mostra o circuito de condicionamento dos sensores a serem usados como componentes digitais. Como se pode observar, ao contrário do que se passa para os sinais analógicos, a saída não é igual à entrada. A saída tem um valor próximo de 0 V enquanto a entrada for menor do que 3,6 V. Se a tensão de entrada for maior do que 3,6 V, a saída comutará, passando a ter o valor da tensão de saturação do AmpOp. Este valor comutará para um valor próximo de 0 V assim que a tensão de entrada atinja 3 V.

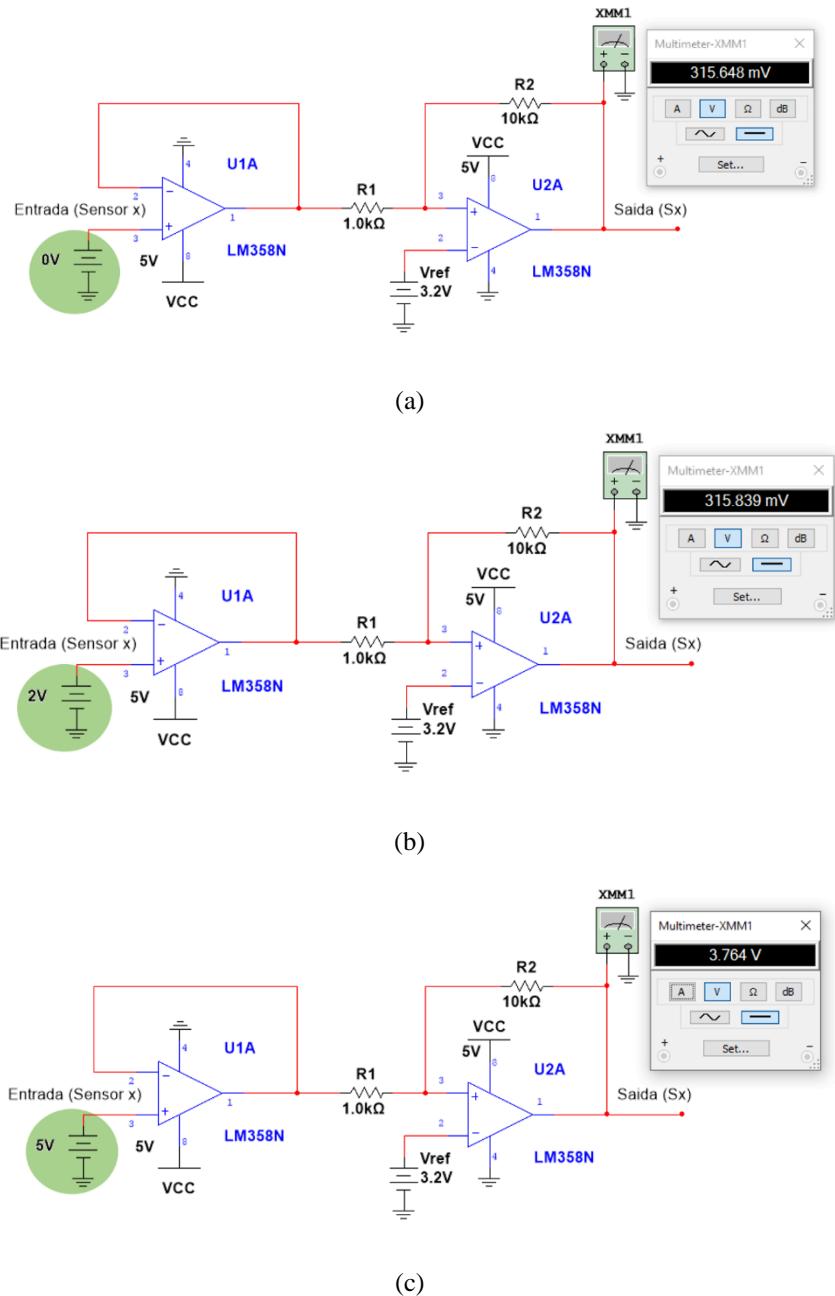


Figura 3.2 - Condicionamento de sinal para os sensores a serem usados digitalmente (a) Entrada 0 V; (b) Entrada 2 V; (c) Entrada 5 V.

3.3 Circuito de Controlo da Velocidade dos Motores

Nas figuras deste subcapítulo (Figura 3.3, Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.6), os multímetros $XMM1$, $XMM2$, $XMM3$ e $XMM4$ mostram as tensões V_{erro} , $Offset_{Control_{neg}}$, $Offset_{Control}$ e $V_{comando}$, respetivamente, e podem ser calculadas pelas equações (2.8), (2.11), (2.14) e (2.15), pela mesma ordem. Para efeitos de simulação, assume-se que a superfície ao redor da linha preta é branca e que a leitura dos sensores é ideal.

Na Figura 3.3, apresentam-se os circuitos de controlo da velocidade dos motores, quando os sensores 3 e 6 se encontram fora da linha, ou seja, $S3$ e $S6$ têm valor 0 V.

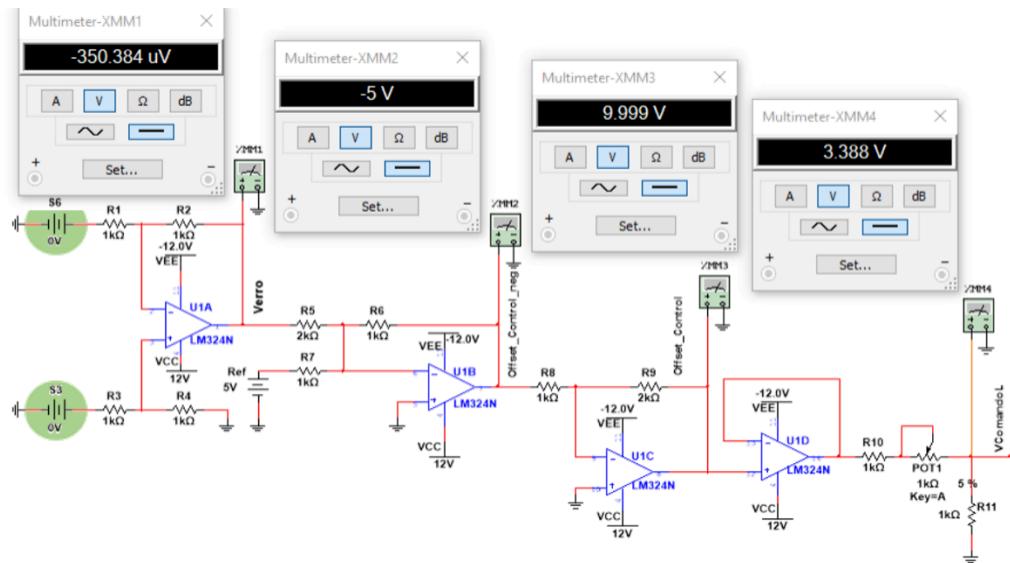


Figura 3.3 - Circuito de controlo da velocidade dos motores, com S_3 e S_6 iguais a 0 V.

Na Figura 3.4 e Figura 3.5, apresentam-se os circuitos de controlo da velocidade dos motores, quando o sensor 3 se encontra fora da linha e o sensor 6 sobre a linha. Assim, a entrada $S3$ tem valor de 0 V e $S6$ de 5 V.

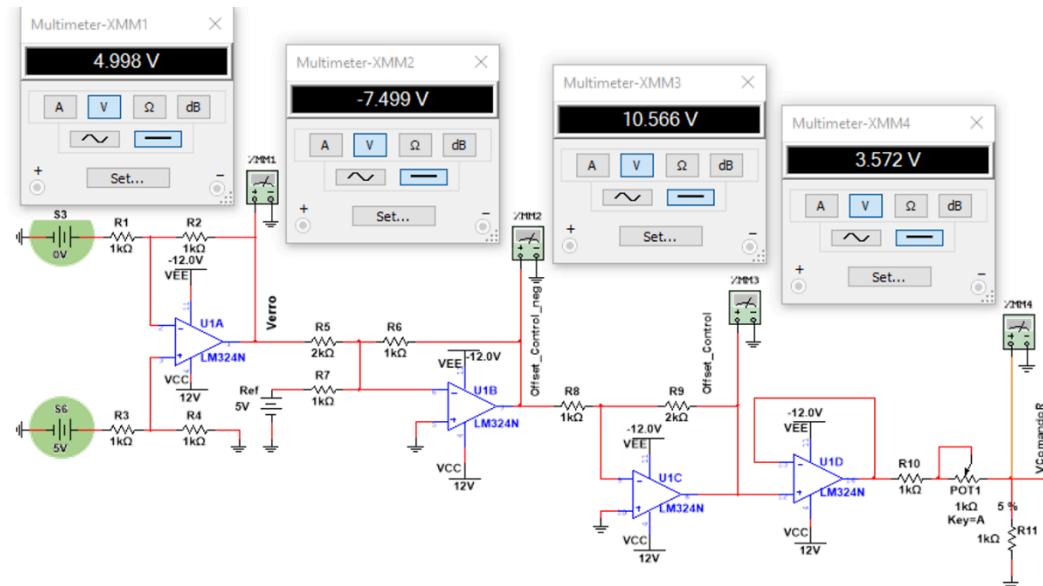


Figura 3.4 - Circuito de controlo da velocidade do motor direito, com S_3 igual a 0 V e S_6 igual a 5 V.

O valor de $Offset_{Control}$ está limitado pela saturação do AmpOp.

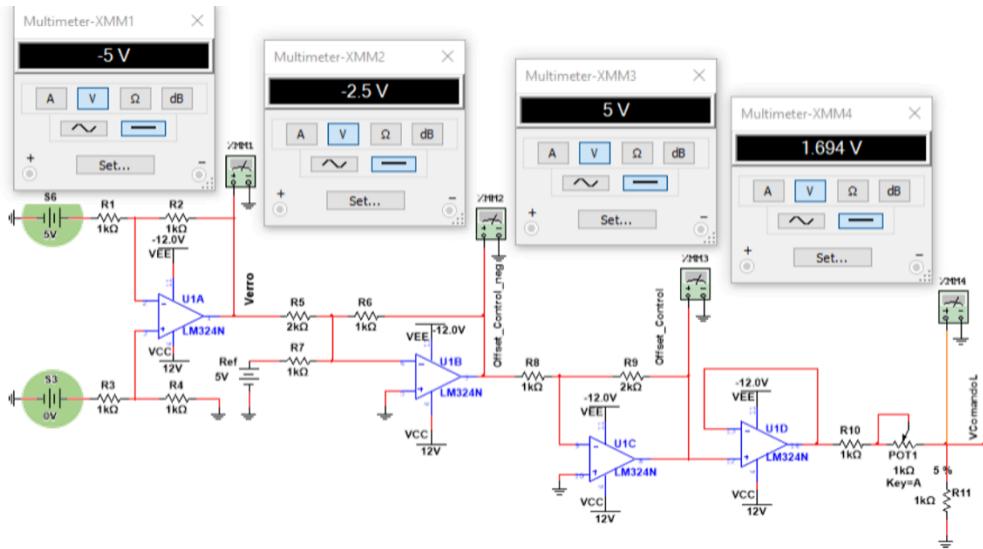


Figura 3.5 - Circuito de controlo da velocidade do motor esquerdo, com $S3$ igual a 0 V e $S6$ igual a 5 V.

Na Figura 3.6 e Figura 3.7, apresentam-se os circuitos de controlo da velocidade dos motores, quando o sensor 3 se encontra entre a linha preta e a superfície branca e o sensor 6 fora da linha. Assim, a entrada $S3$ tem valor de 2,5 V e $S6$ de 0 V.

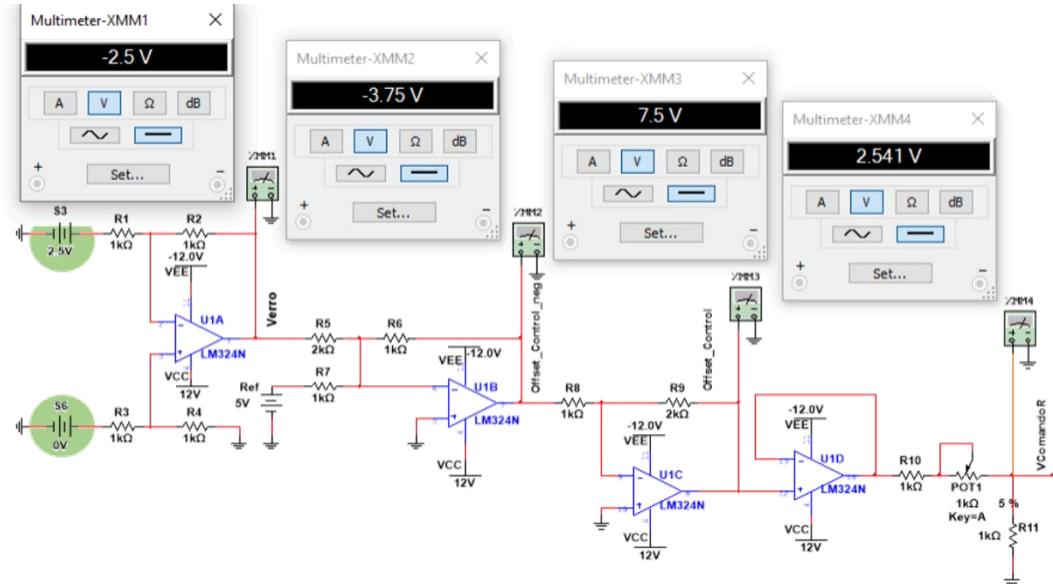


Figura 3.6 - Circuito de controlo da velocidade do motor direito, com $S3$ igual a 2,5 V e $S6$ igual a 0 V.

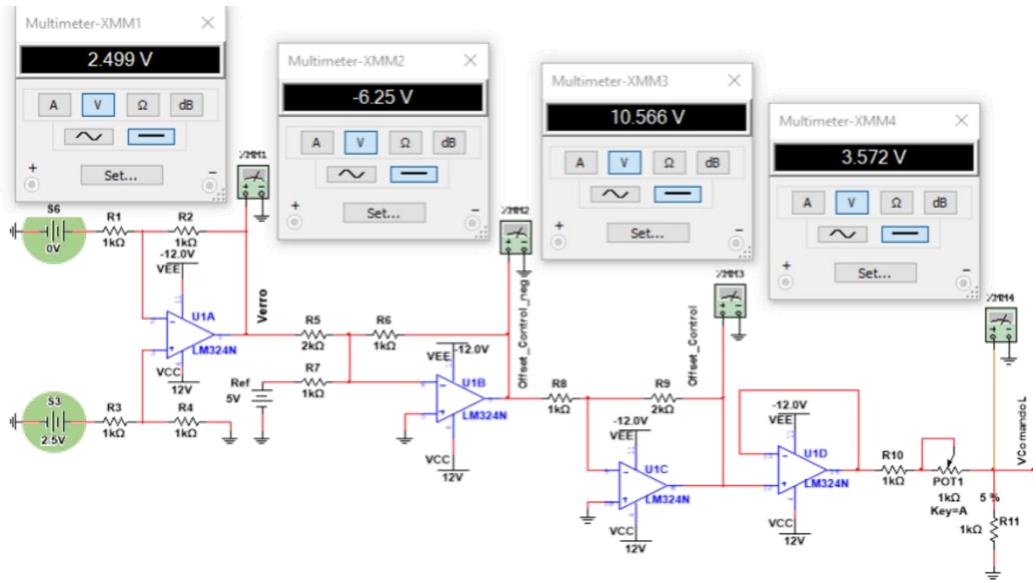


Figura 3.7 - Circuito de controlo da velocidade do motor esquerdo, com $S3$ igual a 2,5 V e $S6$ igual a 0 V.

O valor de $Offset_{Control}$ está limitado pela saturação do AmpOp.

Os resultados obtidos nas simulações estão sintetizados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Simulações dos circuitos de controlo da velocidade dos motores.

$S3$	$S6$	Lado	XMM1	XMM2	XMM3	XMM4	Ação
0 V	0 V	R	- 350,4 μ V	- 5,0 V	- 10,0 V	3,4 V	++
		L	- 350,4 μ V	- 5,0 V	- 10,0 V	3,4 V	++
0 V	5 V	R	5,0 V	- 7,5 V	10,6 V	3,6 V	+++
		L	- 5,0 V	- 2,5 V	5,0 V	1,7 V	+
2,5 V	0 V	R	- 2,5 V	- 3,8 V	7,5 V	2,5 V	+
		L	2,5 V	- 6,3 V	10,6 V	3,6 V	+++

Nota:

- R Right (direita)
- L Left (esquerda)
- + velocidade do motor reduzida
- ++ velocidade do motor moderada
- +++ velocidade do motor alta

3.4 Circuito de Atuação dos Sinais PWM

Na Figura 3.8 pode-se observar no osciloscópio a forma de onda do sinal de saída, V_{PWM} , quando a entrada $V_{comando}$ tem valor de 0 V. O valor de *duty cycle* do sinal de saída é, praticamente, 0 %.

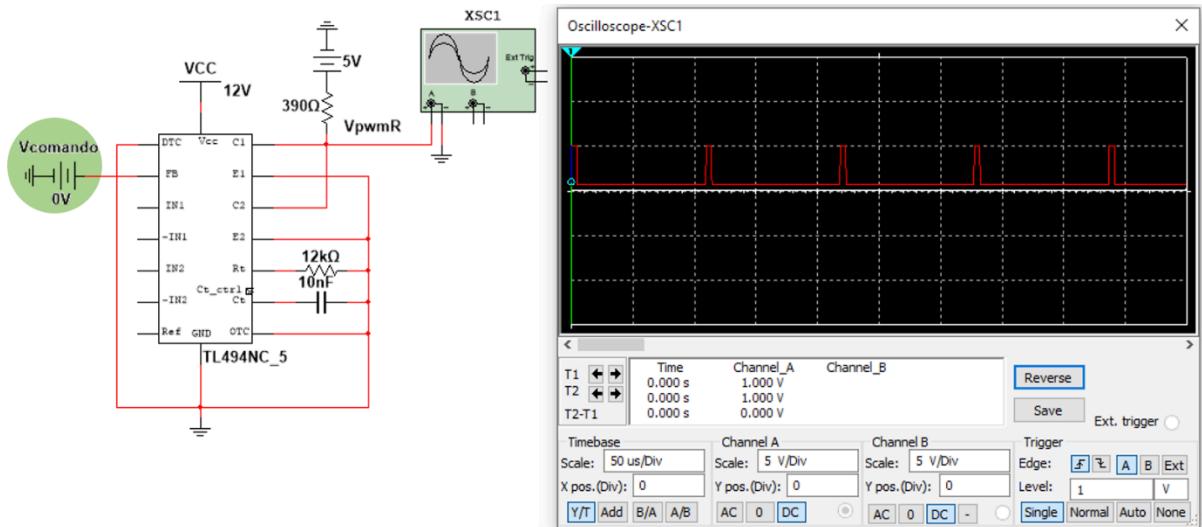


Figura 3.8 - Circuito de atuação dos sinais PWM com entrada de 0 V.

Na Figura 3.9 pode-se observar no osciloscópio a forma de onda do sinal de saída, V_{PWM} , quando a entrada $V_{comando}$ tem valor de 2,1 V. O valor de *duty cycle* do sinal de saída ronda os 50 %.

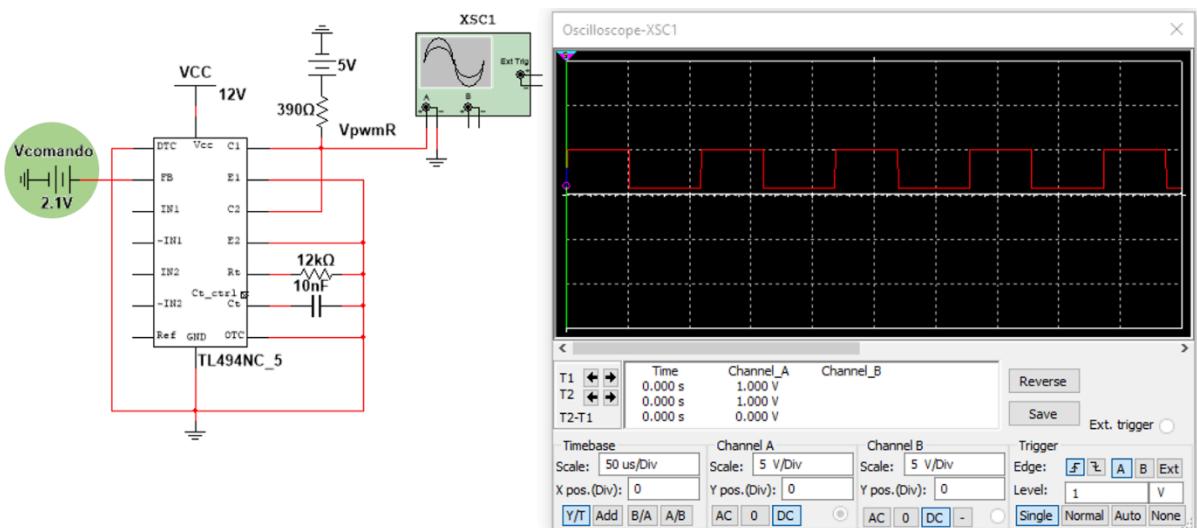


Figura 3.9 - Circuito de atuação dos sinais PWM com entrada de 2,1 V.

Na Figura 3.10 pode-se observar no osciloscópio a forma de onda do sinal de saída, V_{PWM} , quando a entrada $V_{comando}$ tem valor de 3,6 V. O valor de *duty cycle* do sinal de saída é de 97 %.

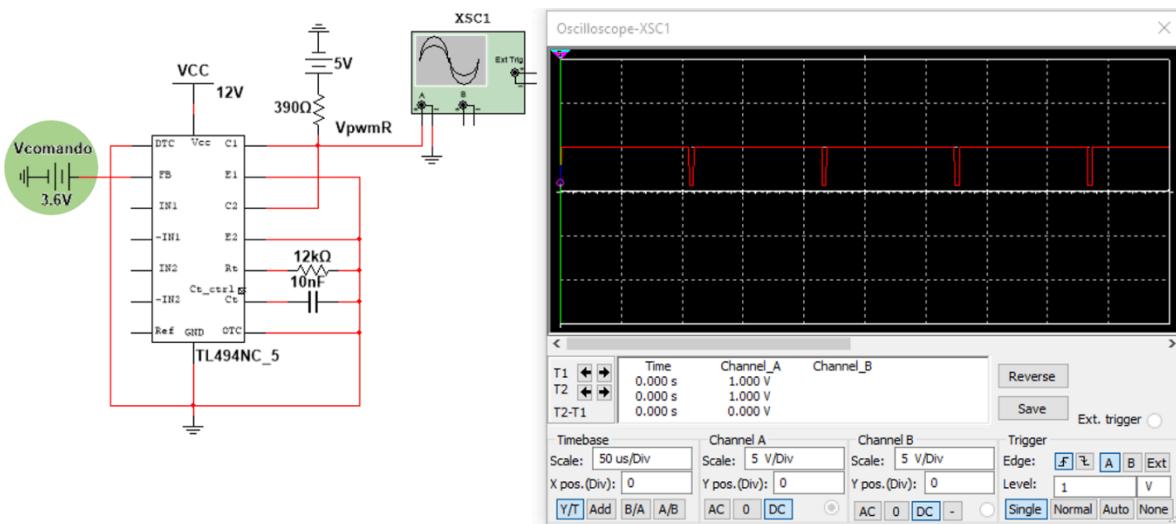


Figura 3.10 - Circuito de atuação dos sinais PWM com entrada de 3,6 V.

Conclui-se que quanto maior o valor à entrada do circuito, maior o *duty cycle* do sinal de saída, ou seja, maior o valor contínuo do sinal de PWM gerado, logo maior vai ser a velocidade de rotação do motor.

3.5 Máquina de Estados

O circuito de *clock*, baseado na montagem com o IC NE555, é usado na máquina de estados e foi simulado através da ferramenta TINA, apresentando a seguinte resposta (Figura 3.11):

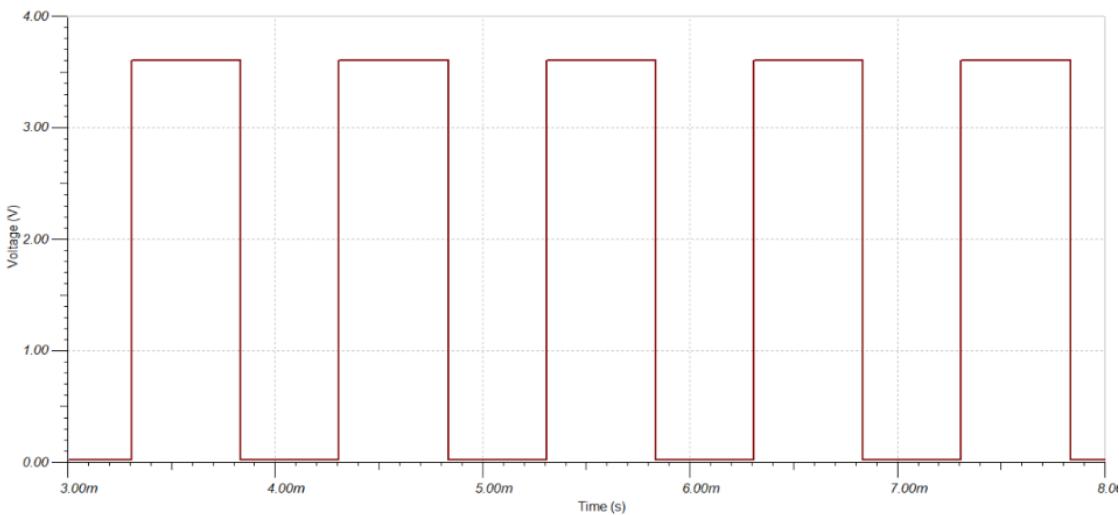


Figura 3.11 - Resposta do Oscilador de 1 kHz.

Inicialmente, no estado 0, o robô está parado, pelo que todas as saídas da máquina de estados estão a nível lógico baixo, como mostra a Figura 3.12.

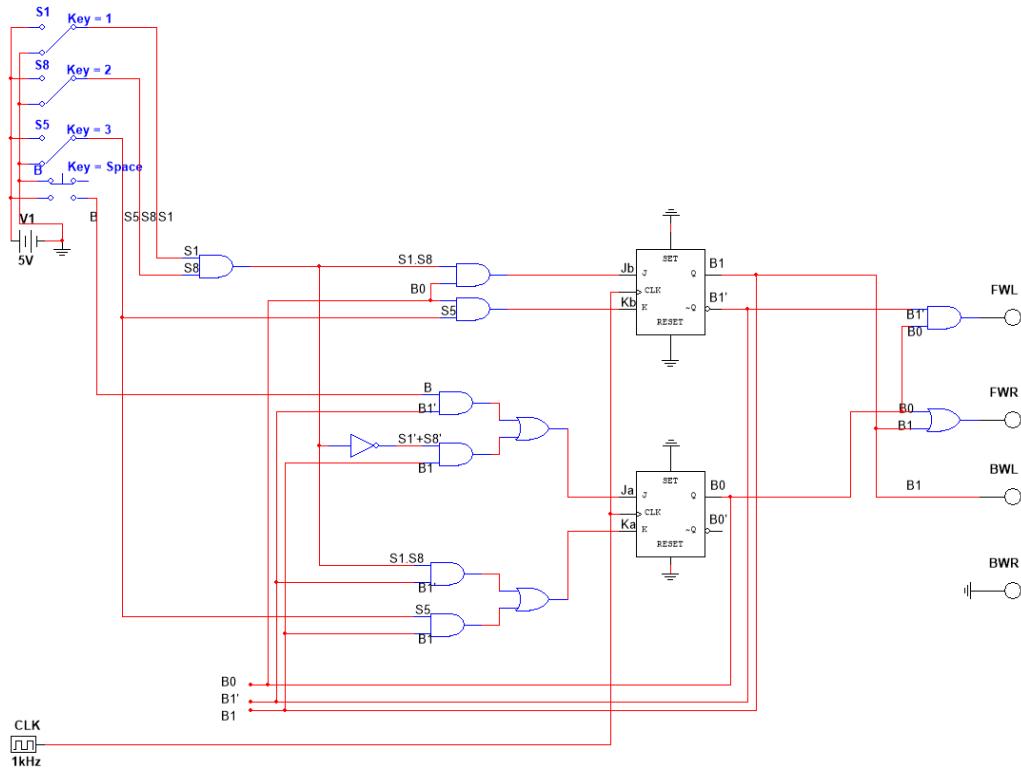


Figura 3.12 – Máquina de estados no estado 0 (Parado).

Após pressionar o botão, a máquina de estados avança para o estado 1 com as saídas *FWL* e *FWR* ativas, fazendo com que o robô inicie o movimento, seguindo a linha preta, como mostra a Figura 3.13.

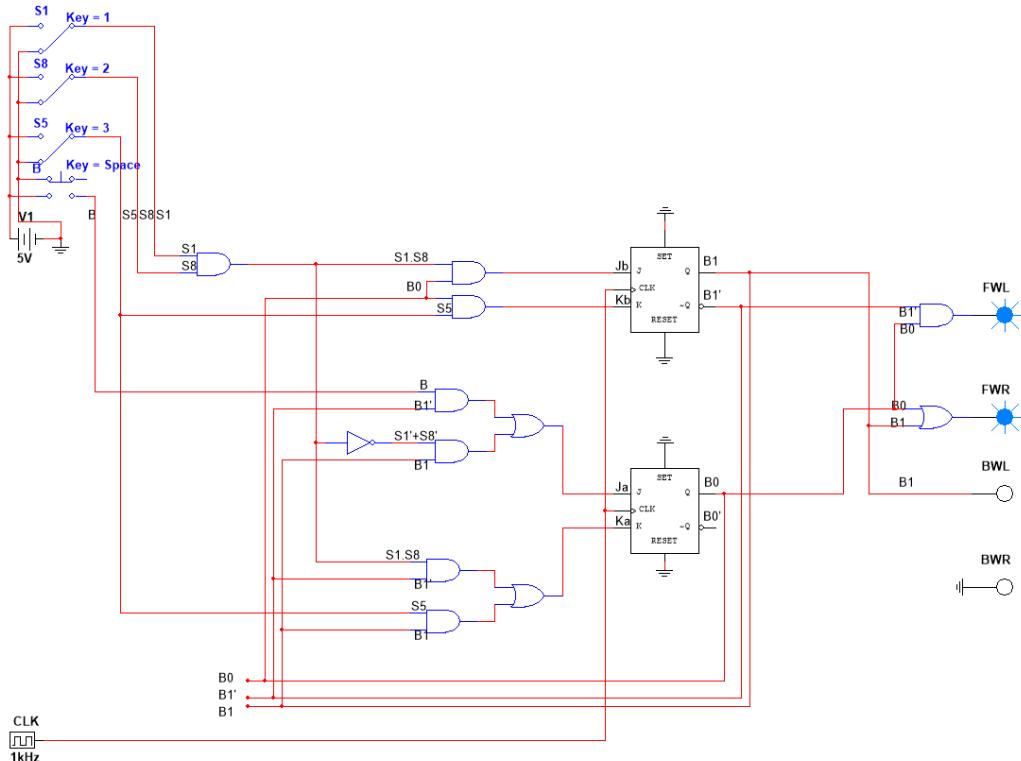


Figura 3.13 - Máquina de estados no estado 1 (Anda para a frente) – Botão foi pressionado.

O robô continua o seu movimento até encontrar a linha horizontal de fim de percurso. Nesse momento, $S1$ e $S8$ estão a nível lógico alto, fazendo a máquina de estados avançar para o estado 2. Neste estado, o robô inicia o movimento de rotação sobre o seu eixo, para a esquerda, com FWR e BWL a nível lógico alto, como apresentado na Figura 3.14.

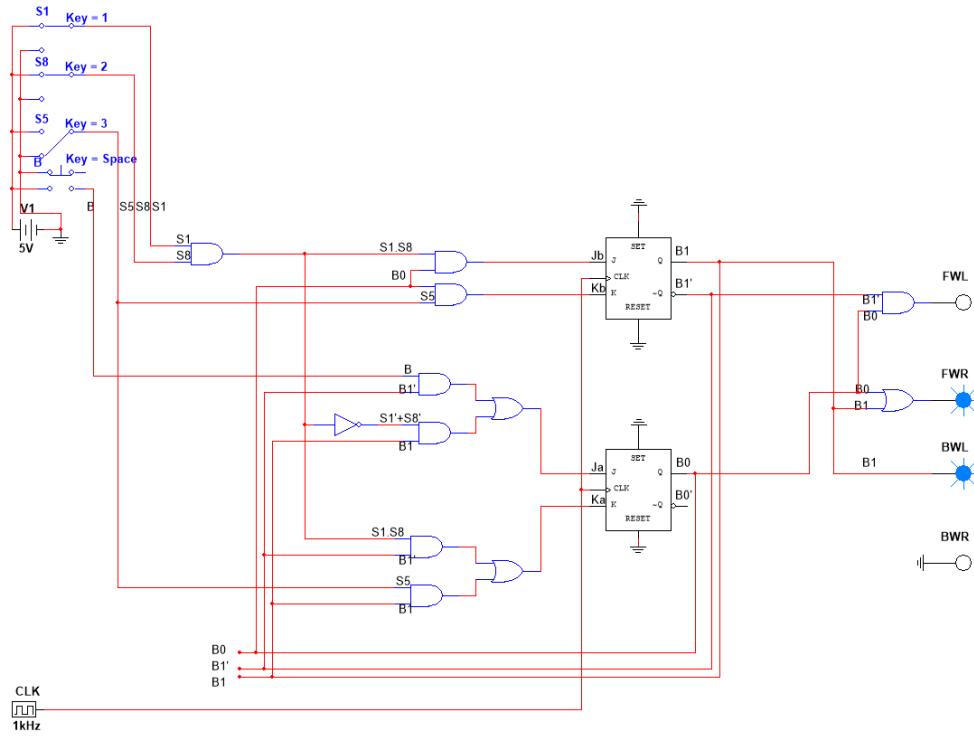


Figura 3.14 - Máquina de estados no estado 2 (Inicia a rotação para a esquerda) – $S1$ e $S8$ a nível lógico alto.

A máquina de estados avança para o estado 3 quando $S1$ e $S8$ voltam a nível lógico baixo (Figura 3.15). Neste estado, as saídas da máquina de estados continuam iguais às saídas do estado 2.

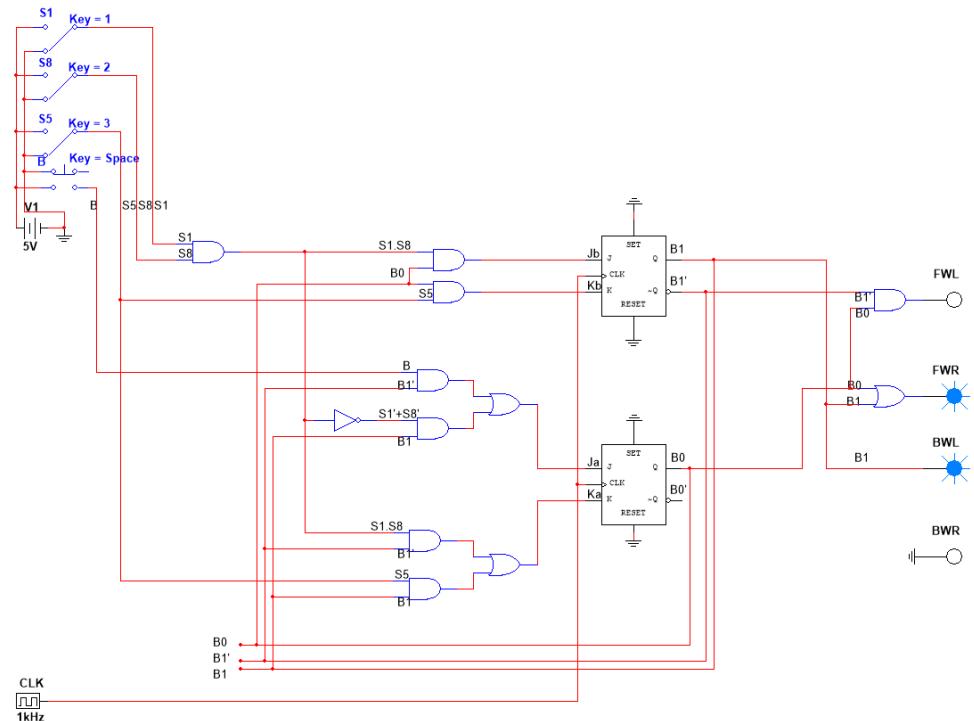


Figura 3.15 - Máquina de estados no estado 3 (Continua a rotação) - $S1$ e $S8$ a nível lógico baixo.

O robô continua o seu movimento de rotação até que o sensor 5 esteja sobre a linha vertical (S_5 a nível lógico alto), perfazendo uma rotação de 180° . Nesse momento, a máquina de estados volta ao estado 0 e o robô para, como mostra a Figura 3.16.

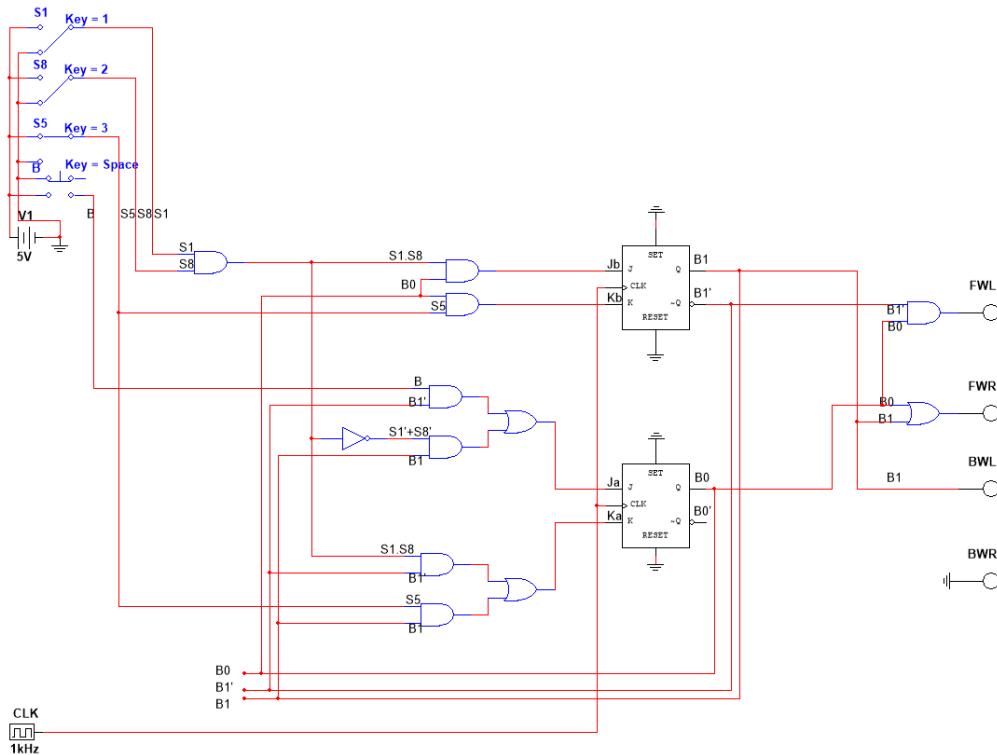


Figura 3.16 - Máquina de estados no estado 0 (Parado novamente) - S_5 a nível lógico alto.

Assim, verifica-se o bom funcionamento do circuito dimensionado.

Capítulo 4

Implementação dos Circuitos Eletrónicos

4.1 Introdução

O produto final deve apresentar circuitos mais fiáveis e compactos. Uma implementação em PCB é uma boa abordagem para cumprir estes requisitos. Usaram-se os *softwares* PADS Logic e PADS Layout para construção do esquemático e *design* das PCBs e o KiCad para a sua visualização em 3D.

Foram desenvolvidas três PCBs: AWR-19_SENSOR que implementa o circuito de condicionamento de sinal dos sensores e converte 12 V em 5 V; AWR-19_PWM que implementa o circuito de controlo da velocidade dos motores e atuação dos sinais PWM; AWR-19_FSM que implementa o circuito de condicionamento do botão e a máquina de estados. De forma a conferir maior estabilidade e robustez às alimentações dos ICs utilizados nas PCBs, é necessário o uso de um condensador de desacoplamento por cada alimentação de cada circuito integrado.

4.2 Circuito de Condicionamento de Sinal dos Sensores e Conversor 12 V – 5 V

Esta PCB, além de possuir os circuitos de condicionamento de sinal dos sensores também possui um circuito responsável por converter uma tensão de + 12 V numa tensão de + 5 V, sendo o esquema apresentado na Figura 4.1.

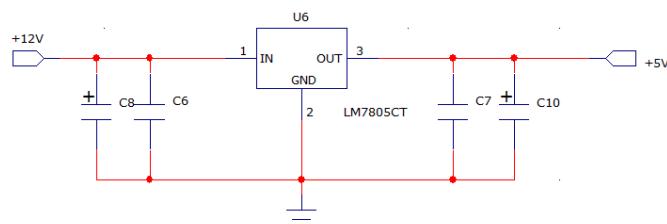


Figura 4.1 - Esquemático do conversor 12 V – 5 V.

A tensão de referência (V_{Ref}) é obtida por um divisor de tensão com um potenciómetro, como mostra a Figura 4.2.

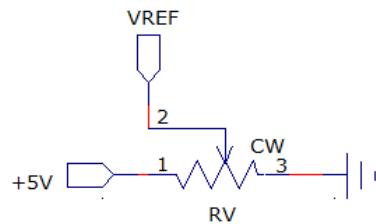


Figura 4.2 – Circuito que estabelece a tensão de referência do circuito comparador.

Esta PCB, denominada AWR-19_SENSOR, tem o seu *layout* apresentado na Figura 4.3 e a sua representação 3D na Figura 4.4.

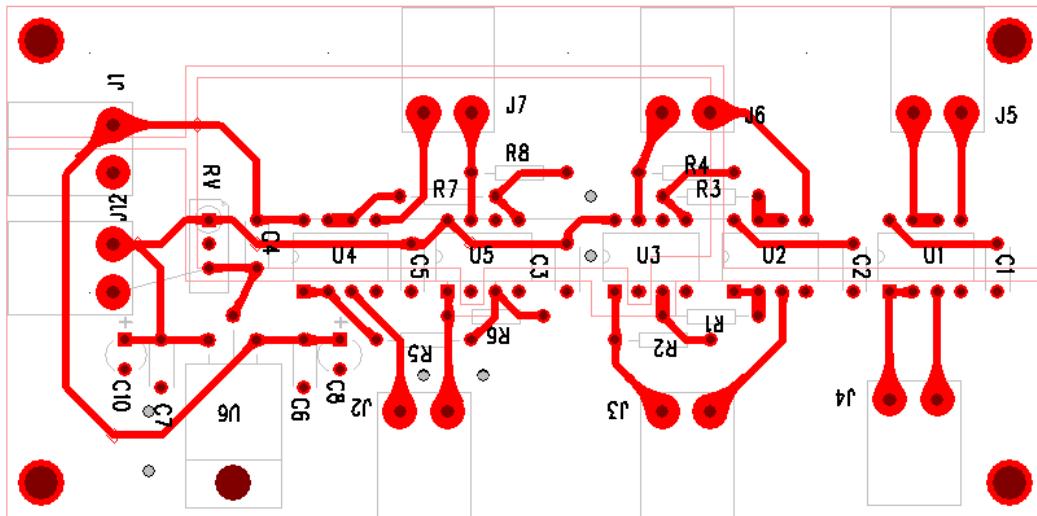


Figura 4.3 - *Layout* da PCB AWR-19_SENSOR.

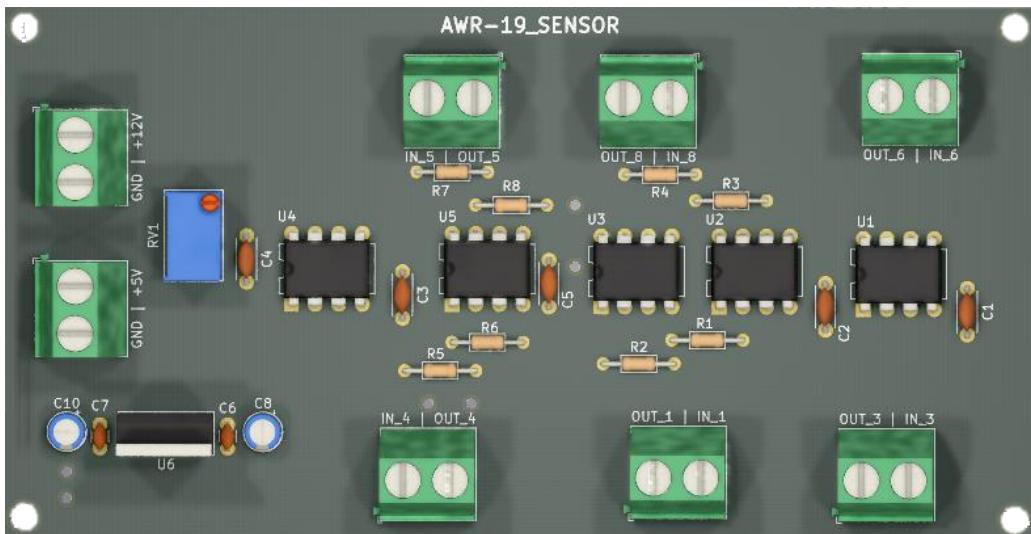


Figura 4.4 - Representação 3D da PCB AWR-19_SENSOR.

Na Figura 4.4 é possível ver que a PCB tem um conector de dois pinos de entrada com +12 V e *GND*. Como o sinal de 5 V tem o objetivo de alimentar outros circuitos além deste, este sinal está ligado a um conector de saída de dois pinos com *GND*. As entradas dos sensores e as suas saídas condicionadas estão organizadas em conectores de dois pinos, contendo cada um deles a entrada e a saída respetiva.

4.3 Circuito Controlo da Velocidade dos Motores e Atuação dos Sinais PWM

A PCB que engloba os circuitos de controlo da velocidade dos motores e atuação dos sinais PWM, denominada AWR-19_PWM, tem o seu *layout* apresentado na Figura 4.5 e a sua representação 3D na Figura 4.6. Possui um conector de quatro pinos para alimentação, com as tensões + 12 V, - 12 V, + 5 V e *GND* (conector *J1*). Existem, ainda, duas entradas para os sensores (conector *J2*) e duas saídas para os motores (conector *J3*).

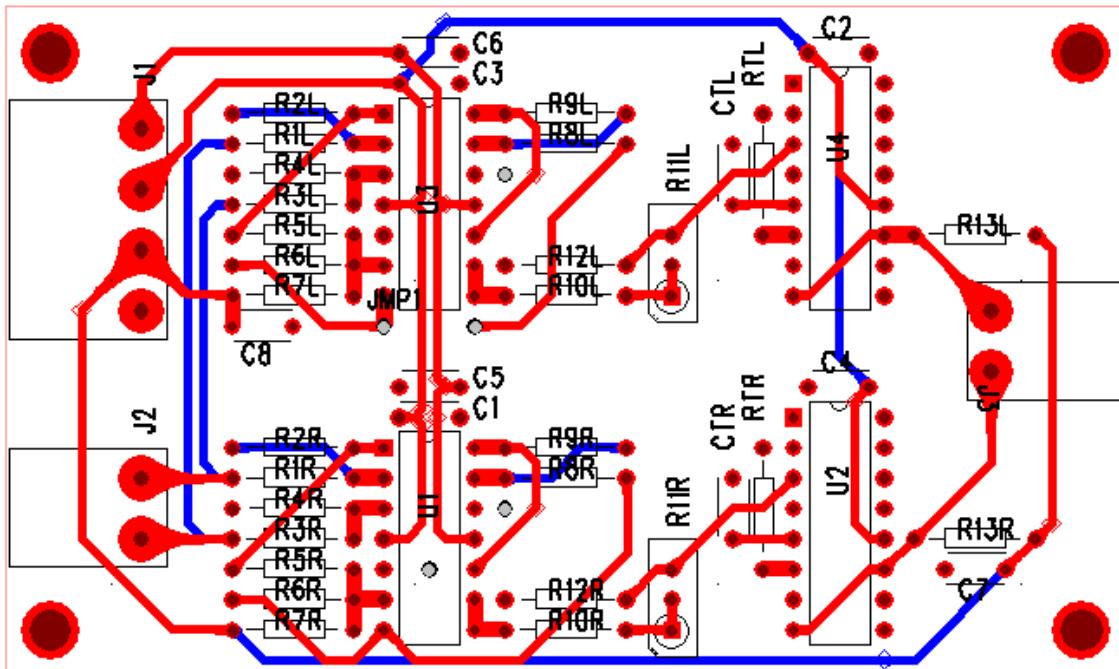


Figura 4.5 - *Layout* da PCB AWR-19_PWM.

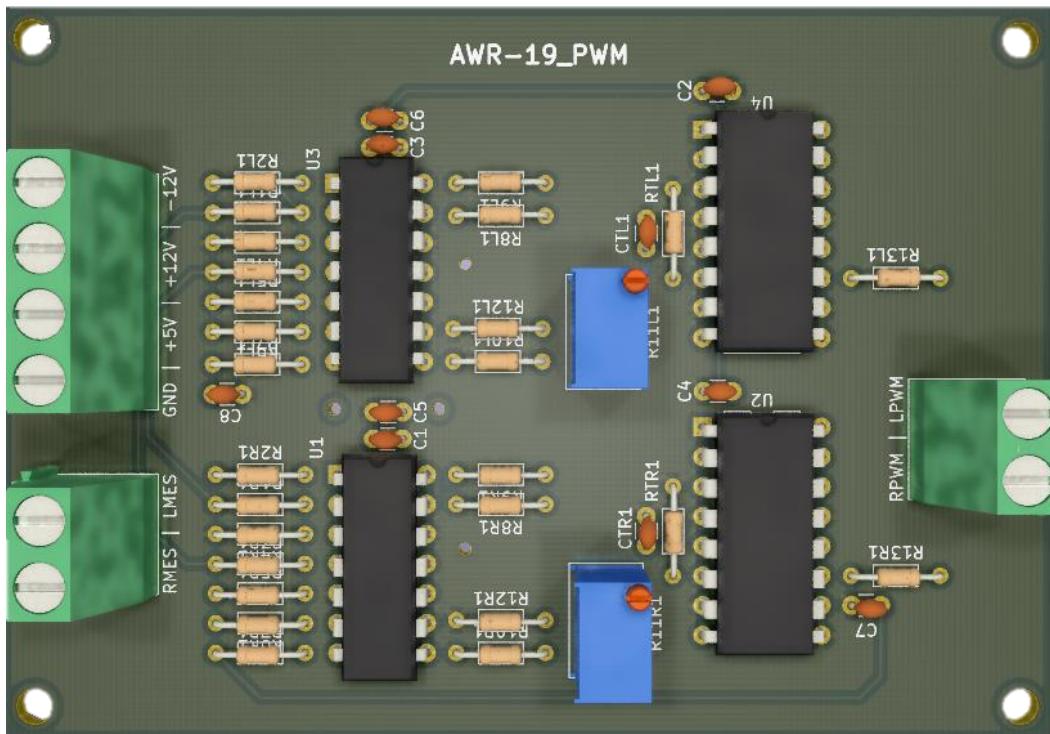


Figura 4.6 - Representação 3D da PCB AWR-19_PWM.

4.4 Circuito de Condicionamento do Botão e Máquina de Estados

Tal como foi visto no subcapítulo 2.5, o botão precisa de um circuito de *debounce*, apresentado na Figura 4.7. Além disso, acrescentou-se outro botão (*B2*) que auxilia na tarefa de testes experimentais ao circuito. O sinal de saída deste circuito, o sinal *B*, é o sinal condicionado do botão, que será usado no circuito da máquina de estados, como mostrado na Figura 2.15 no subcapítulo 2.5.

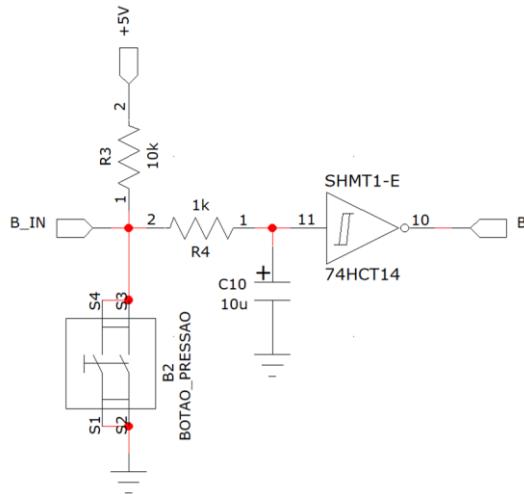


Figura 4.7 - Circuito de *debounce*.

Na Figura 4.8, foi acrescentado ao circuito de *reset*, visto no subcapítulo 2.5, um botão de pressão (*B1*) que permite, sempre que necessário, em testes experimentais, fazer *reset* à máquina de estados. O conector *J9* possibilita o uso de um outro botão.

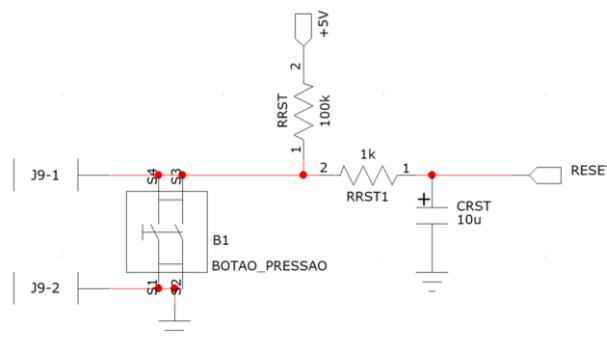


Figura 4.8 - Circuito de *reset*.

A PCB que implementa a máquina de estados e o circuito de condicionamento do botão, denominada AWR-19_FSM, tem o seu *layout* apresentado na Figura 4.9 e a sua representação 3D na Figura 4.10.

De forma a alimentar os circuitos da máquina de estados, é necessário um conector de dois pinos, com + 5 V e *GND* (conector *J1*). Para as entradas da máquina de estados foram usados dois conectores separados, o conector *J3* para os sensores (*S1*, *S5* e *S8*) e o conector *J8* para o botão (*B_IM*). Para garantir o encapsulamento do robô, utilizou-se um botão na parte exterior da sua armadura, sendo, para isso,

necessário conectar esse botão ao circuito da máquina de estados. Para as quatro saídas (*FWL*, *FWR*, *BWL* e *BWR*) destes circuitos foi usado o conector *J2*.

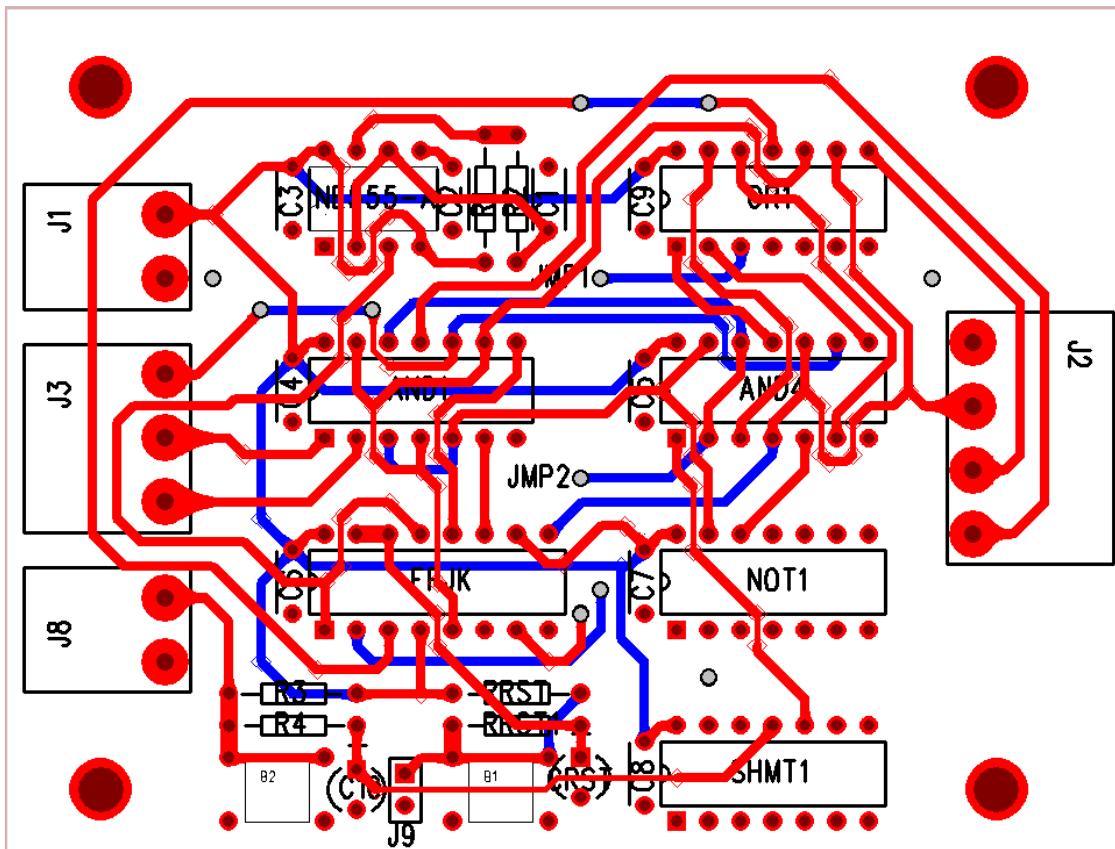


Figura 4.9 - Layout da PCB AWR-19_FSM.

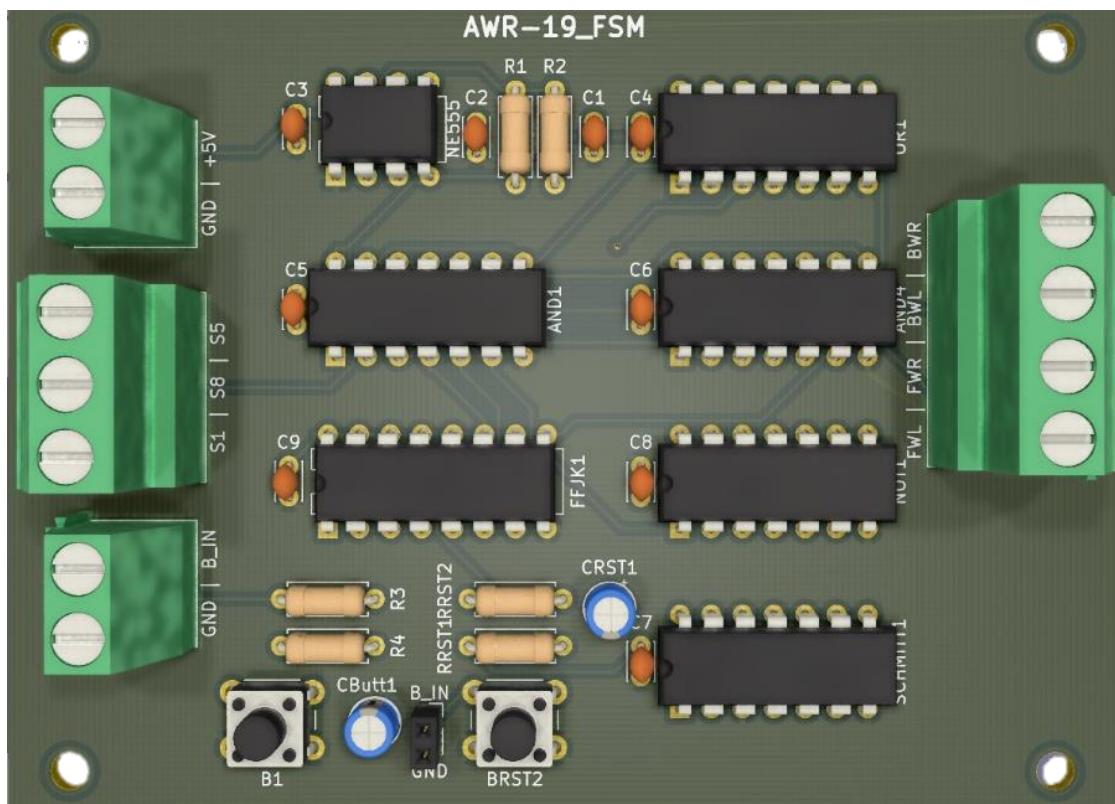


Figura 4.10 – Representação 3D da PCB AWR-19_FSM.

Capítulo 5

Listade Componentes

Na Tabela 5.1, listam-se todos os componentes usados para o AWR, bem como a quantidade e o preço associado.

Tabela 5.1 - Lista de componentes.

	Material	Loja	Quantidade	Preço unitário	Preço total	
1	Motor Bot'n Roll ONE 300 rpm		Bot'n Roll	2	17,50 €	35,00 €
2	Par de rodas Bot'n Roll ONE A (D67 mm)		Bot'n Roll	1	11,50 €	11,50 €
3	Par de hubs Bot'n Roll ONE A		Bot'n Roll	1	4,50 €	4,50 €
4	Rodas livres (D25 mm)		Leroy Merlin	2	1,69 €	3,38 €
5	Módulo <i>driver</i> de motores L298N		Bot'n Roll	1	12,90 €	12,90 €
6	QTR-8A		Bot'n Roll	1	19,90 €	19,90 €
7	Suporte para uma pilha 18650 c/fios		Bot'n Roll	6	0,85 €	5,10 €

	Material		Loja	Quantidade	Preço unitário	Preço total
8	BMS para proteção baterias 18650 3S 12,6 V 20 A		Bot'n Roll	2	5,50 €	11,00 €
9	Pilha LI-ION 18650 3,7 V 2200 mAh 18X65 mm – 22 A		Bot'n Roll	6	3,90 €	23,40 €
10	LM7805		Bot'n Roll	1	0,50 €	0,50 €
11	TL494		Aquário	2	1,70 €	3,40 €
12	LM324		Aquário	2	1,95 €	3,90 €
13	LM358		Aquário	5	0,74 €	3,70 €
14	74HCT04		Mauser	1	0,92 €	0,92 €
15	74HCT08		Mauser	2	0,90 €	1,80 €
16	74HCT14		Mauser	1	0,61 €	0,61 €
17	74HCT32		Mauser	1	0,48 €	0,48 €
18	74HCT112		Mauser	1	1,32 €	1,32 €

	Material		Loja	Quantidade	Preço unitário	Preço total
19	NE555P		Aquário	1	0,32 €	0,32 €
20	Bloco terminal 2 pinos		Aquário	17	0,80 €	13,60 €
21	Bloco terminal 3 pinos		Aquário	1	1,00 €	1,00 €
22	Potenciômetro <i>trimmer</i> multivolta		Aquário	2	2,20 €	4,40 €
23	Resistência		Bot'n Roll	34	0,05 €	1,70 €
24	Condensador cerâmico		Aquário	28	0,10 €	2,80 €
25	Condensador eletrolítico		Aquário	4	0,25 €	1,00 €
26	Botão de pressão		Bot'n Roll	2	0,15 €	0,30 €
27	Botão de painel 12 mm		Bot'n Roll	1	0,60 €	0,60 €
28	Bloco terminal 12 conetores		Gmlux	3	0,40 €	1,20 €
29	Alumínio 2 mm		-	-	-	35,00 €

	Material	Loja	Quantidade	Preço unitário	Preço total	
30	Placa madeira		-	1	-	5,00 €
31	Placa de acrílico policarbonato		-	1	-	10,00 €
32	Parafuso 5 mm		Ferritrofa	28	0,05 €	1,40 €
33	Parafuso 3 mm		Ferritrofa	12	0,05 €	0,60 €
34	Porca com asas 5 mm		Ferritrofa	6	0,10 €	0,60 €
35	Porca 5 mm		Ferritrofa	22	0,05 €	1,10 €
36	Rebites		Ferritrofa	18	0,10 €	1,80 €
37	Anilhas		Ferritrofa	12	0,01 €	0,12 €
38	<i>Jumpers</i>		Bot'n Roll	pack	2,00 €	2,00 €
Total:					227,85 €	

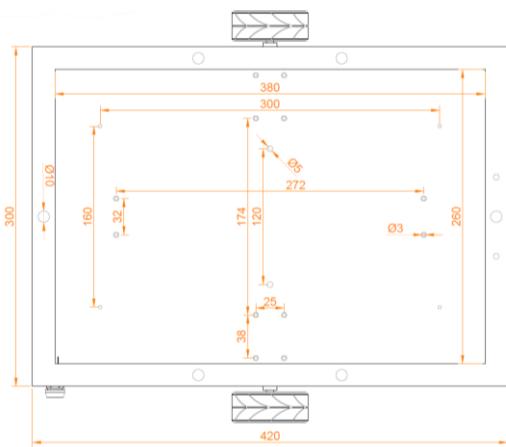
Capítulo 6

Círculo Mecânico Implementado

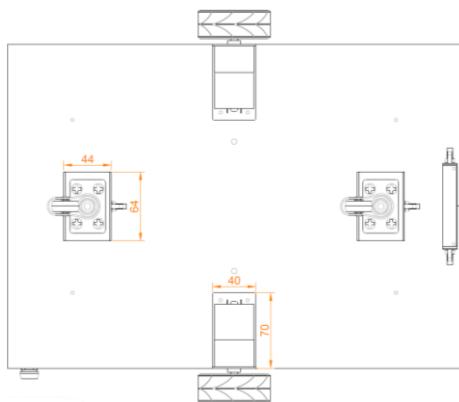
O objetivo do AWR é transportar um tabuleiro com alimentos e/ou medicamentos. Sendo a forma dos tabuleiros tradicionais retangular, optou-se por definir a forma da armadura do robô como um paralelepípedo, com dimensões aproximadas às dos tabuleiros: 300 mm de largura, 420 mm de comprimento. De forma a ser possível aceder e ver os circuitos dentro do robô, usou-se na parte superior da armadura uma placa de acrílico policarbonato transparente, removível. Para a construção da restante armadura usou-se uma folha de alumínio de 2 mm. Para a fixação de todas as peças, usaram-se parafusos de 3 mm e 5 mm, porcas de 5 mm, porcas com asas de 5 mm, anilhas e rebites.

Relativamente às rodas, foram usadas duas rodas motoras e duas rodas livres. As rodas motoras, com 67 mm de diâmetro, são usadas nas laterais do robô e estão acopladas aos dois motores [13]. Os seus pneus são de borracha, com 26,5 mm de largura. As rodas livres (com 25 mm de diâmetro), tal como o próprio nome indica, rodam livremente em qualquer sentido e têm o propósito de dar estabilidade ao robô. Os suportes destas rodas foram colocados na dianteira e traseira da armadura, permitindo o ajuste da distância das rodas livres ao chão. Foi usado um suporte de altura ajustável para prender o array de sensores de linha à armadura do robô. Como os sensores devem estar na parte dianteira do robô, o suporte destes foi fixo na frente da armadura. O botão de interação com o utilizador, de 12 mm de diâmetro, está colocado na parte superior esquerda da lateral direita da armadura do robô.

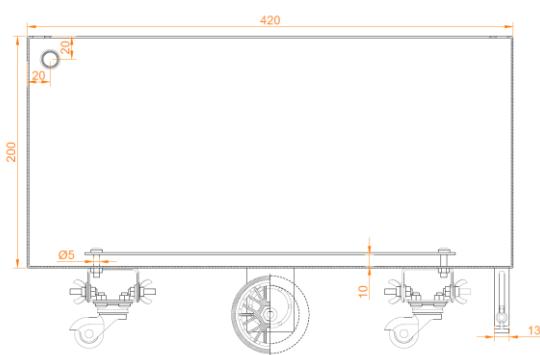
Na Figura 6.1 (a), é possível observar a vista superior do robô, onde a borda de 20 mm da armadura permite fixar a placa de acrílico através de parafusos. Na Figura 6.1 (b), mostra-se a fixação dos suportes das rodas, motores e sensor. Na Figura 6.1 (c), é possível observar o mecanismo de ajuste da altura das rodas livres e do sensor. Além disso, vê-se uma placa colocada no fundo da armadura com o propósito de suportar todos os circuitos e impedir contactos destes com a armadura. No canto superior esquerdo da armadura do AWR, está localizado o botão de interação com o utilizador. Nas Figura 6.1 (d) e Figura 6.1 (e), podem ver-se a vista dianteira e vista traseira do robô, respetivamente.



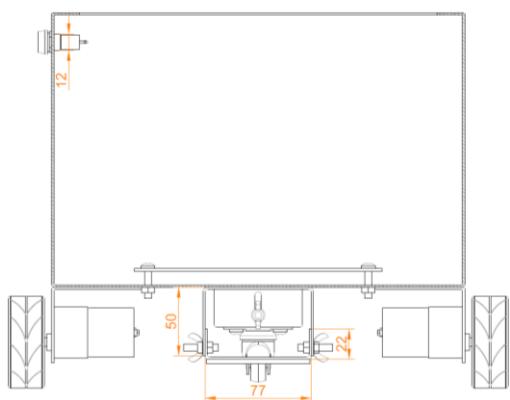
(a)



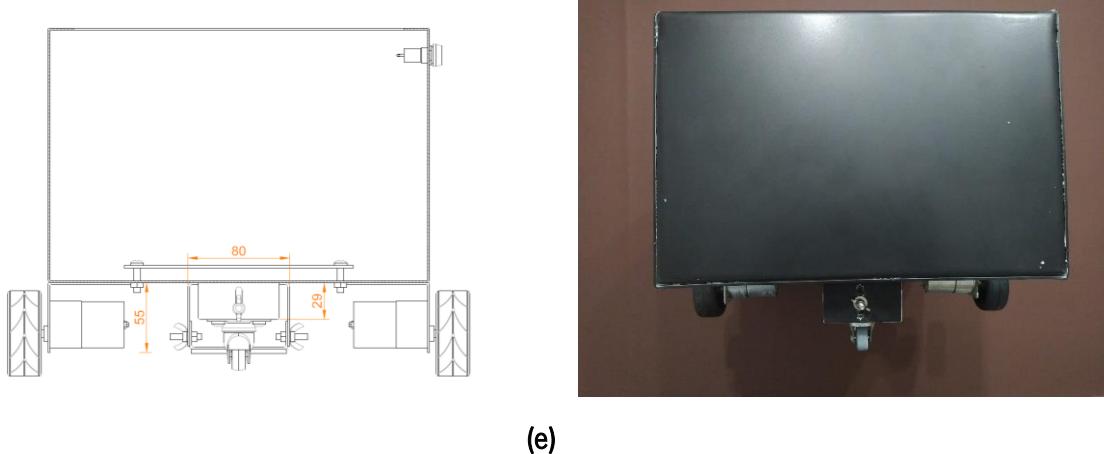
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.1 - Desenho (à esquerda) e imagem real (à direita) do AWR (a) vista superior; (b) vista inferior; (c) vista lateral direita; (d) vista dianteira; (e) vista traseira.

Capítulo 7

Resultados Experimentais

De forma a testar as especificações acima previstas, foram realizados ensaios experimentais simulando o ambiente no qual o robô irá operar.

Começou-se por testar o sensor e verificou-se que as medidas dos sensores não atingem nem 0 V nem + 5 V.

Em seguida, montou-se o circuito de atuação dos sinais PWM de modo a testar o seu funcionamento. Para isso, variou-se o sinal na entrada de *feedback* do TL494, através do ajuste de um potenciómetro, obtendo-se os valores de *duty cycle* à saída em função da tensão de entrada, como apresentado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - *Duty cycle* do sinal PWM de saída em função da tensão de entrada.

Vcomando [V]	Duty cycle [%]
1,15	0
1,39	10
1,9	30
2,3	50
2,9	70
3,35	90
3,6	97

Depois de validado este circuito, ligou-se a saída deste ao *driver* [10] para testar a resposta do motor. Concluiu-se que o motor apenas possui binário de arranque suficiente quando o *duty cycle* do sinal PWM ronda os 50 %. Já com o motor em funcionamento, o *duty cycle* pode atingir um mínimo de 30 % sem que os motores parem. Estes dados foram retirados com os motores em vazio.

Tendo validado o circuito de controlo da velocidade dos motores e o circuito de atuação dos sinais de PWM, realizou-se a ligação destes aos motores e à parte mecânica do robô. Tal como verificado no [vídeo](#), o robô para seguir a linha necessitava de corrigir bruscamente a sua trajetória. Após vários circuitos

testados que se revelaram tentativas falhadas, concluiu-se que esta abordagem apresentava problemas mecânicos. Como solução, moveu-se o *array* de sensores para a dianteira do robô, resolvendo os problemas manifestados, passando este a comportar-se como esperado, tal como comprovado pelo [vídeo](#).

Para controlar os diferentes estados de funcionamento do robô, foi desenvolvida uma máquina de estados. De forma a testar o seu funcionamento, esta foi implementada em *breadboard*, fazendo várias combinações lógicas das entradas de forma a verificar a correta comutação entre estados, utilizando LEDs nas suas saídas.

Inicialmente, selecionaram-se ICs apenas tendo em conta a sua operação lógica. Com isto, verificou-se que as saídas destes integrados apresentavam valores instáveis e imprevisíveis. Tal deve-se às incompatibilidades de alguns ICs entre a lógica TTL e CMOS. Sendo assim, selecionaram-se, novamente, integrados tendo em conta, não só a sua operação lógica, mas também a sua família lógica. Escolheu-se a família lógica HCT [10] e obtiveram-se os resultados esperados.

Depois da máquina de estados e do circuito de controlo de direção dos motores estarem individualmente validados, foi necessário validar os dois módulos em simultâneo e a atuarem em conjunto. No [vídeo](#), mostra-se a validação de uma versão da máquina de estados, projetada para que o *array* de sensores fosse usado no eixo das rodas motoras do robô. Assim, verifica-se apenas a validação do início de marcha e paragem do robô no final do percurso.

Capítulo 8

Análise do Produto

8.1 Introdução

Em todos os projetos práticos é necessária uma análise do produto, em áreas como a fiabilidade, segurança e certificação do sistema. Esta análise permite identificar pontos de falha do equipamento e os potenciais perigos a estes associados, de forma a informar o utilizador.

8.2 Fiabilidade

Um sistema ou equipamento diz-se “*fiável quando está livre de erros catastróficos, é capaz de recuperar de erros e apresenta resultados previsíveis (determinismo)*” [15]. Apesar de, neste caso, não ser possível fazer uma avaliação do tipo quantitativa, realizou-se uma avaliação do tipo qualitativa por meio do estudo dos modos de falha e as suas consequências para o sistema e, também, influência do ambiente e do tempo.

Relativamente aos modos de falha, o desenho do sistema deve ter em conta as condições em que o robô se desvia da linha preta. Assim, este deverá ter uma velocidade adequada, uma vez que o sistema pode não responder suficientemente rápido a uma variação. Para diminuir a probabilidade de erros no seguimento da linha, deve ser favorecido o uso de linhas retas em todo o percurso e, quando necessário mudar de direção, devem ser feitas curvas ligeiras. Em acrescento, a grossura da linha deve ser ligeiramente inferior à distância entre os dois sensores usados para seguir a linha (3 cm, aproximadamente).

Do ponto de vista do ambiente que envolve o robô, devem ter-se em conta as condições climatéricas, interações com o utilizador, condições do equipamento e obstrução da via de passagem do robô. O percurso não deverá ser obstruído com objetos, sob pena de danificar tanto o robô como o objeto que o obstrui ou pessoas que se encontrem próximas, visto que o robô não possui um sistema de deteção de obstáculos. Além disso, sendo o robô um equipamento eletrónico, este não deverá estar sujeito a um ambiente húmido, tal como água ou neve, sujidade e temperaturas extremas. As condições anteriores

podem provocar um mau funcionamento dos circuitos constituintes do robô, podendo, em situações extremas, danificar permanentemente o equipamento.

Em relação ao tempo de operação, sabe-se que os componentes têm um tempo médio de vida previsto pelos fabricantes. Visto que não existe informação suficiente para calcular o consumo dos circuitos do AWR, torna-se difícil fazer uma previsão do tempo de vida dos seus componentes com exatidão. Num circuito eletrónico, os componentes com maior probabilidade de falha são os condensadores, semicondutores, baterias e motores. Para quantificar o número de horas previstos de funcionamento médio de um componente, existe um parâmetro denominado *Mean Time Between Failures* – MTBF. Os componentes enunciados têm os MTBFs apresentados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Tempo de vida dos componentes com maior probabilidade de falha, usados no AWR.

Componente	MTBF
Baterias 18650	300 – 500 ciclos
Semicondutores	10 anos
Condensadores Eletrolíticos	11,4 anos
Condensadores Cerâmicos	142,69 anos
Motores	1000 a 3000 horas

Anormalidades nos circuitos poderão diminuir estes tempos consideravelmente, exigindo uma manutenção ou reparação precoce do robô.

Como calculado no subcapítulo 2.6, a autonomia prevista do robô é de uma hora e dez minutos. Caso o robô seja destinado para uso individual, desprezando o consumo dos circuitos durante o tempo de espera, e considerando, por exemplo, dez minutos como tempo de deslocação, o robô terá autonomia suficiente para transportar seis refeições. Assumindo que a cada dia existem quatro refeições (pequeno almoço, almoço, lanche e jantar), a bateria deverá ser recarregada a cada um dia e meio. Assim sendo, as baterias terão um tempo de vida útil compreendido entre um ano e três meses e dois anos e um mês, aproximadamente. Por outro lado, se o AWR for usado num âmbito coletivo, assumindo uma hora de funcionamento por refeição, a bateria deverá ser recarregada quatro vezes por dia. Calcula-se, assim, que as baterias terão de ser substituídas ao fim de dois meses e meio, podendo durar, no máximo, até quatro meses.

Conclui-se que as baterias deverão ser os elementos que requerem maior atenção, pois, além das deficiências acima apresentadas, com o aumento do tempo de utilização, estas descarregam, conduzindo a alterações dos resultados práticos.

8.3 Segurança

A interação do robô com o utilizador deve ser realizada em segurança.

Os sistemas elétricos e fios condutores não devem estar em contacto com a armadura do robô que, sendo metálica, é condutora, evitando curto-circuitos ou choques elétricos que podem ser fatais ao sistema e prejudiciais à saúde do utilizador. Para garantir o isolamento da armadura do robô, usou-se, por questões económicas e para validação de conceitos, uma placa de madeira para suportar todos os circuitos do robô. Os motores e o *array* de sensores, que ficam no exterior da armadura, estão expostos ao utilizador. De forma a isolá-los eletricamente, usou-se fita isoladora envolvendo todos os terminais destes. Portanto, todos os componentes do robô estão encapsulados e isolados do utilizador. Todavia, sabe-se que este equipamento é um dispositivo sensível à eletricidade estática (frequentemente abreviado como ESD – *Electrostatic-Sensitive Device*), o que significa que possui componentes que podem ser danificados por cargas elétricas estáticas que se acumulam em pessoas, ferramentas e outros materiais não condutores [16]. Se o utilizador violar o encapsulamento do produto, poderá representar perigos para este ou uma avaria no produto (Figura 8.2 (h)).

Deverá ter-se em conta que o robô possui elementos que apresentam perigos para o utilizador. A madeira usada para isolar os circuitos eletrónicos da armadura do robô é considerada um material comburente (Figura 8.2 (c)) e inflamável (Figura 8.2 (d)). Os condensadores eletrolíticos, usados nos circuitos do AWR, são componentes inflamáveis (Figura 8.2 (d)), explosivos (Figura 8.2 (e)), tóxicos (Figura 8.2 (f)) e perigosos para o ambiente (Figura 8.2 (a)). Além dos perigos associados aos condensadores, as baterias podem ser, ainda, elementos corrosivos (Figura 8.2 (b)) e comburentes (Figura 8.2 (c)). Assim, o robô não deverá estar exposto a qualquer condição ambiental extrema, tal como referido no subcapítulo anterior relacionado com a fiabilidade.

O percurso não deverá ser bloqueado por objetos, uma vez que o embate do robô poderá provocar situações imprevisíveis, com possibilidade de danificação de bens materiais ou ferimentos pessoais.

Devido aos perigos acima descritos, deve ser vigiado o manuseamento do robô por crianças.

8.4 Certificação

Nenhum produto poderá ser exposto ao comércio antes de ser certificado. A certificação é o modo pelo qual uma entidade competente dá uma garantia escrita de que um produto está em conformidade com os requisitos especificados.

A marcação CE, apresentada na Figura 8.1, é um indicativo de conformidade obrigatória para diversos produtos comercializados no Espaço Económico Europeu. Esta marca indica que um produto respeita a legislação da União Europeia em requisitos como segurança, higiene e proteção ambiental, estando, desta forma, credenciado a circular por todo Espaço Económico Europeu [17].



Figura 8.1 - Marcação CE.

De acordo com DIRETIVA 2014/35/UE [18] ANEXO I, que informa os principais elementos dos objetivos de segurança para o material elétrico usado no equipamento, devem ser previstas medidas de ordem técnica a fim de que:

- a) As pessoas e os animais domésticos fiquem protegidos de forma adequada contra os riscos de ferimentos ou de outros acidentes resultantes de contactos diretos ou indiretos;
- b) Não se produzam temperaturas, descargas ou radiações que possam provocar perigo;
- c) As pessoas, os animais domésticos e os bens sejam protegidos de forma adequada contra os riscos de natureza não elétrica provenientes do material elétrico que a experiência venha a revelar;
- d) O isolamento seja adequado aos condicionamentos previstos.

Como já foi apresentado, o robô cumpre com os pontos a), b) e d). Uma vez que este projeto serve fins académicos, ou seja, tem o propósito de validar conceitos, não foi implementado um sistema de deteção de obstáculos. Assim, o ponto c) não é cumprido, pelo que o certificado CE não poderá ser atribuído ao AWR.

Devido aos perigos enunciados no subcapítulo anterior, relacionado com a segurança, deverão ser apresentados vários símbolos ao utilizador.



Figura 8.2 - Símbolos de perigo: (a) perigoso para o ambiente; (b) corrosivo; (c) comburente; (d) inflamável; (e) explosivo; (f) tóxico; (g) vários perigos; (h) *Eletrostatic Sensitive Device - ESD*.

O robô será constituído por circuitos e componentes eletrónicos que não podem ser enviados para o lixo doméstico. Estes devem ser encaminhados para locais próprios de reciclagem (Figura 8.3).



Figura 8.3 - Símbolo WEEE.

Capítulo 9

Conclusões

9.1 Conclusão

O projeto integrador da unidade curricular de LPI I pôs à prova algumas competências adquiridas ao longo do curso. Aplicaram-se conhecimentos das unidades curriculares de Sistemas Digitais, Eletrónica I e II, Instrumentação e Sensores, Controlo Automático, Máquinas Elétricas, entre outras. Foi um projeto ímpar comparativamente a projetos já realizados porque envolveu um maior conhecimento de várias áreas e requereu muito trabalho autónomo.

Ao longo do *design* e testes do robô foram encontrados vários problemas, que provocaram alterações na forma como se abordou o desenvolvimento do projeto. Inicialmente usou-se o sensor de linha no centro do robô de forma a facilitar a inversão do sentido de marcha no final do seu trajeto, evitando assim que o robô necessitasse de efetuar uma volta de 180 ° sobre o seu eixo. Assim, os motores teriam de rodar num sentido quando o robô fosse na direção do paciente, e no sentido contrário quando tivesse de voltar ao ponto de partida, simplificando a lógica que controla o estado de funcionamento do robô. Foram implementadas e testadas diversas soluções que não cumpriram o seu propósito, pois, durante a realização de testes, verificou-se que esta abordagem revela problemas mecânicos. Desta forma, o ponto central do robô (posição do sensor) é menos sensível a alterações de direção, aumentando o seu tempo de resposta, impedindo-o de seguir a linha corretamente. Após a alteração da posição do sensor para a dianteira do robô, estes problemas resolveram-se.

Relativamente ao desenho e implementação da máquina de estados, também se encontraram dificuldades. Inicialmente, não houve a preocupação de selecionar integrados da mesma família lógica, para implementar a máquina de estados, o que originou resultados indefinidos. Verificou-se que todos os integrados devem ser da mesma família lógica, ou compatíveis com a lógica TTL, sendo possível obter posteriormente resultados mais próximo dos desejados quanto utilizada a família HCT [10].

Infelizmente, não foi possível aprofundar nem testar todas as funcionalidades previstas para o projeto, devido ao confinamento geral [6]. O planeamento inicial vinha a ser cumprido até que as circunstâncias mudaram e alguns dos objetivos propostos não puderam ser realizados.

Relativamente ao tempo despendido no desenvolvimento do projeto, visto que todo o grupo se juntou para trabalhar em horários definidos, todos os elementos do grupo trabalharam o mesmo número de horas. Após o desenho e conceção que foi desenvolvido em conjunto, o grupo foi dividido em duas equipas de trabalho, sendo que uma se dedicou à implementação do controlo dos motores e outra ao desenvolvimento da máquina de estados que controla o estado de funcionamento do robô. Assim, foram contabilizadas, individualmente, um total de 250 horas, como mostrado na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 - Número de horas despendidas por elemento

Nome	Número de Horas
Bruno Silva	250
Diogo Fernandes	250
Duarte Rodrigues	250
Francisco Salgado	250
João Miranda	250
José Abreu	250

Em suma, este projeto foi desafiante, revelando a sua importância na formação enquanto futuros engenheiros.

9.2 Sugestões de Trabalho Futuro

Durante a realização deste projeto, foram feitas opções que ditaram um rumo. Poder-se-iam ter tomado outras opções que modificariam os resultados obtidos. Este projeto não representa o fim de uma ideia, é, apenas, uma implementação de um conceito. Assim, neste subcapítulo são feitas algumas sugestões de, não só, melhorias à implementação desenvolvida, mas também de novas abordagens para esta ideia.

9.2.1 Possíveis Opções Alternativas para o Desenho dos Circuitos

Todos os projetos são passíveis de melhorias. Sendo um projeto totalmente analógico, algumas melhorias não terão uma implementação tão simples e barata quando comparadas com uma implementação digital.

Tal como implementado, não existe nenhum mecanismo de deteção caso o robô saia fora da rota. Uma possível melhoria para a resolução deste problema seria usar um ou dois dos sensores centrais do *array* de sensores para deteção da linha. Caso esta não fosse detetada, o robô teria de parar, evitando que este ande indefinidamente.

Outro aspeto a melhorar seria a implementação de um mecanismo de deteção de obstáculos. Caso o robô se encontrasse sobre a linha e um objeto obstruísse a sua passagem, este teria de parar de forma a evitar a colisão e possíveis danos materiais de ambas as partes. Além disso, o robô deveria emitir um som intermitente de forma a alertar o responsável pelo sucedido. Este mecanismo poderia ser implementado através de um sensor de proximidade colocado na dianteira do robô. Sem este sistema, o robô embaterá no objeto, provocando um comportamento indefinido.

Tendo em conta que o objetivo deste robô é minimizar os contactos possivelmente infeciosos com outras pessoas, seria relevante implementar uma interface diferente com o utilizador. Ao invés de fazer uso de um botão de pressão para iniciar a marcha, seriam usadas células de carga que detetam a colocação de um tabuleiro sobre o robô. Assim que o utilizador ou operador colocassem o tabuleiro sobre o robô, após o término de um temporizador, este iria iniciar a marcha, minimizando os contactos com a armadura do robô. Além disso, poderia ser desenvolvido um sistema automático de desinfecção das superfícies do robô, que deveria ser acionado após finalizar o seu percurso (ida e volta).

Como o robô funciona à base de baterias, estas poderiam ser recarregadas numa estação de carregamento. Para isso, poderia ser desenvolvida uma estação de carregamento onde se colocaria o robô, sempre que não estivesse em utilização.

Tal como foi visto, apontaram-se apenas algumas formas de melhorar o trabalho desenvolvido. Possivelmente, existirão outras melhorias a serem aplicadas e que não foram abordadas neste capítulo. No entanto, algumas seriam descartadas por não justificarem o trabalho, terem uma execução complexa para o efeito ou não serem economicamente viáveis.

9.2.2 Evolução do Atual Desenho para um Sistema Baseado em Microcomputador

O atual desenho do robô poderia ser implementado num sistema baseado em microcomputador, tal como será visto na unidade curricular de Laboratórios e Práticas Integradas II (LPI II).

Como o propósito do robô é fazer chegar bens a alguém que se encontre numa situação de isolamento, o seu aspeto físico seria idêntico ao implementado.

Através do uso de um microcomputador, existirão múltiplas possibilidades de implementação. Uma delas seria o uso do controlo remoto, através do qual uma pessoa responsável controlaria o percurso do robô até ao local pretendido. Teria de ser adicionada uma câmara ao robô, sendo a imagem transmitida para o comando, ou algum dispositivo eletrónico com ecrã, que o utilizador estivesse a utilizar. Este sistema poderia ser implementado através da tecnologia *Bluetooth*, em que o robô seria controlado por um *smartphone*. Outra possibilidade seria a criação de rotas pré-definidas para o robô seguir. Fazendo uso de sensores de distância, o robô poderia desviar-se de obstáculos que se encontrassem na sua rota. Além disso, o robô poderia estimar se teria carga suficiente nas baterias de modo a conseguir completar a trajetória pretendida. Caso não se verificasse, dirigir-se-ia automaticamente à sua estação de carregamento.

A solução que mais se assemelha à implementação atual, seria fazer o uso do microcomputador para seguir uma linha preta, através do *array* de sensores [19] e implementar as funcionalidades referidas no capítulo anterior.

Neste subcapítulo apenas foram apresentadas algumas possibilidades, sem idealizar a sua implementação ou grau de complexidade. Assim, no próximo semestre, na unidade curricular de LPI II, será avaliada a viabilidade de todas as ideias acima referidas.

Referências

- [1] SNS - Serviço Nacional de Saúde, "Covid-19 | Pandemia," 11 março 2020. [Online]. Available: <https://www.sns.gov.pt/noticias/2020/03/11/covid-19-pandemia/>. [Acedido em 16 dezembro 2020].
- [2] "Conheça Jaci: o robô de desinfecção que auxilia no combate a Covid-19," Tecnopuc, 29 abril 2020. [Online]. Available: <https://www.pucrs.br/tecnopuc/2020/04/29/conheca-jaci-o-robo-de-desinfeccao-que-auxilia-no-combate-covid-19/>. [Acedido em 8 fevereiro 2021].
- [3] E. L. Brand Talk, "Pandemic and the Smarter World: A Future of Robots?" 5 maio 2020. [Online]. Available: <https://www8.gsb.columbia.edu/articles/brand-talk/pandemic-and-smarter-world-future-robots>. [Acedido em 10 fevereiro 2021].
- [4] R. K. Erico Guizzo, "How Robots Became Essential Workers in the COVID-19 Response," IEEE SPECTRUM, 30 setembro 2020. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/robotics/medical-robots/how-robots-became-essential-workers-in-the-covid19-response>. [Acedido em 10 fevereiro 2021].
- [5] J. D'Onfro, "Robots To The Rescue: How High-Tech Machines Are Being Used To Contain The Wuhan Coronavirus," 2 fevereiro 2020. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/jilliandonfro/2020/02/02/robots-to-the-rescue-how-high-tech-machines-are-being-used-to-contain-the-wuhan-coronavirus/?sh=73364f201779>. [Acedido em 16 dezembro 2020].
- [6] P. Semiconductors, "74HCT14 Hex inverting Schmitt trigger". 74HCT14 datasheet, 26 agosto 1997 [revisto a 30 outubro 2003].
- [7] T. Instruments, "TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circui". TL494 datasheet, janeiro 1983 [revisto a março de 2017].
- [8] STMicroelectronics, "DUAL FULL-BRIDGE DRIVER". L298 datasheet, janeiro 2000.
- [9] Texas Instruments, "SN54/74HCT CMOS Logic Family Applications and Restrictions," maio 1996. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/scla011/scla011.pdf?ts=1612201599681&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FCD74HCT251. [Acedido em 2 fevereiro 2021].
- [10] T. Corporation, "TENERGY 18650 2200 mAh Li-Ion Cell". Tenergy 18650 datasheet.
- [11] "BMS PARA PROTEÇÃO BATERIAS 18650 3S 12,6V 20A," [Online]. Available: <https://www.botnroll.com/pt/acessorios/2558-bms-para-protec-o-baterias-18650-3s-12-6v-20a.html>. [Acedido em 10 fevereiro 2021].
- [12] Z. Electromotor. ZGB37RG datasheet.
- [13] T. Instruments, "LM340, LM340A and LM78xx Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators". LM7805 datasheet, setembro 2000 [revisto a julho de 2016].
- [14] P. Carvalhal, "Fiabilidade e boas práticas de projeto," 2014. [Online]. Available: https://elearning.uminho.pt/bbcswebdav/pid-1045855-dt-content-rid-3987823_1/courses/2021.930504_1/FiabilidadeBoasPraticasProjeto_PCarvalhal.pdf. [Acedido em 3 fevereiro 2021].
- [15] "Electrostatic-sensitive device," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic-sensitive_device. [Acedido em 8 fevereiro 2021].

- [16] TUR CERT, “O que é o certificado CE?” [Online]. Available: <https://www.ceisaret.com/pt/ce-sertifikasi-nedir/>. [Acedido em 2 fevereiro 2021].
- [17] Jornal Oficial da União Europeia, “DIRETIVA 2014/35/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO,” 29 março 2014. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0035&from=EN>. [Acedido em 8 fevereiro 2021].
- [18] A. G. e. I. Cardoso, “Fecha tudo. Escolas e universidades em casa a partir de sexta-feira.,” Jornal de Notícias, 21 janeiro 2021. [Online]. Available: <https://www.jn.pt/nacional/fecha-tudo-escolas-e-universidade-em-casa-a-partir-de-sexta-feira-13256762.html>. [Acedido em 3 fevereiro 2021].
- [19] P. Corporation, “pololu.com,” 2001-2014. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/docs/pdf/0J12/QTR-8x.pdf>. [Acedido em 3 fevereiro 2021].
- [20] G. Bocock, “Electrolytic Capacitors Determine The Lifetime Of A Power Supply,” XP Power, [Online]. Available: <https://www.xppower.com/resources/blog/electrolytic-capacitor-lifetime-in-power-supplies>. [Acedido em 11 fevereiro 2021].
- [21] “How can I estimate the life of ceramic capacitors?” Taiyo Yuden, [Online]. Available: <https://www.yuden.co.jp/eu/product/support/faq/q020.html>. [Acedido em 11 fevereiro 2021].
- [22] “How to Prolong the Life of an 18650 Battery,” instructables ciruits, [Online]. Available: <https://www.instructables.com/How-to-Prolong-the-Life-of-an-18650-Battery/>. [Acedido em 11 fevereiro 2021].
- [23] A. Perzan, “Brushed vs. brushless DC motors,” drive.tech, [Online]. Available: <https://drive.tech/en/stream-content/brushed-vs-brushless-dc-motors>. [Acedido em 11 fevereiro 2021].
- [24] T. Instruments, “Calculating Useful Lifetimes of Embedded Processors,” 2014. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/sprabx4b/sprabx4b.pdf?ts=1612984192026>. [Acedido em 11 fevereiro 2021].