



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FÁBIO CHAVES XAVIER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO ROBÓTICO ACIONADO POR  
SENSOR CAPACITIVO**

FORTALEZA  
2022

FÁBIO CHAVES XAVIER

DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO ROBÓTICO ACIONADO POR  
SENSOR CAPACITIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto

**FORTALEZA**  
**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- X19d Xavier, Fábio Chaves.  
Desenvolvimento de um braço robótico acionado por sensor capacitivo / Fábio Chaves Xavier. – 2022.  
111 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Luiz Henrique Silva Colado Barreto.
1. Robótica. 2. Manipulador robótico. 3. Sensor capacitivo. I. Título.

CDD 621.3

---

FÁBIO CHAVES XAVIER

**DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO ROBÓTICO ACIONADO POR  
SENSOR CAPACITIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 10/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fabricio Gonzalez Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais e minha esposa.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me deu forças para concluir todos os objetivos que me foram propostos.

Ao Espírito Santo de Deus que por intermédio de Jesus Cristo tem sido um amigo incrível, me dando forças em todo tempo e sempre me ajudando de forma incondicional.

À minha dedicada esposa que esteve sempre presente nos bons e maus momentos, sempre me apoiando de uma forma singular.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Henrique Colado Barreto, por sua atenção, suporte e correções durante minha orientação.

Ao Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça por sua disponibilidade e confiança depositada em minha pessoa durante o período de monitoria da disciplina de Técnicas Avançadas em Eletrônica Digital.

Ao Prof. Dr. Fabricio Gonzalez Nogueira por compartilhar seu conhecimento e experiência que tanto ajudaram à enriquecer minha vida acadêmica e profissional.

À minha mãe Maria Eneide Chaves Xavier (*in memoriam*), que tanto me ajudou à chegar até aqui.

Ao meu pai Francisco Xavier Neto por suas orações constantes.

À minha querida sogra Maria Célia Soares da Silva por suas constantes orações.

Ao meu irmão Fernando Luiz Chaves Xavier, por estar sempre disponível para me ajudar com os problemas de tecnologia.

Ao meu primo Charles Pereira Chaves pelo apoio e seus incentivos constantes.

Ao amigo, companheiro e incentivador pastor Francisco Marciano Damasceno pela paciência, confiança e fé em mim depositadas.

Ao meu colega Diego Arimatéia de Almeida Jerônimo por sua voluntariedade.

Ao André Daiki, por toda disponibilidade e atenção dedicada para a conclusão desse trabalho.

Ao amigo e professor Dr. Eber Catro Diniz que sempre me apoiou na engenharia elétrica.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria.”

**Salmos 111:10**

“Eu não creio que exista algo mais emocionante para o coração humano do que a emoção sentida pelo inventor quando ele vê alguma criação da mente se tornando algo de sucesso. Essas emoções fazem o homem esquecer comida, sono, amigos, amor, tudo. O futuro vai mostrar os resultados e julgar cada um segundo as suas realizações”

**Nikola Tesla**

## RESUMO

A proposta deste trabalho é apresentar uma forma alternativa de acionamento de um braço robótico usando sensores capacitivos, pois os mesmos possuem o diferencial de não necessitarem do contato físico da mão do operador com o equipamento de controle do braço. Nesta aplicação, os movimentos do braço robótico ocorrem pela alteração do campo eletrostático produzido pelos sensores capacitivos. Foi realizada pesquisa bibliográfica sobre o assunto, e constatou-se escassez de material que abordasse conjuntamente os assuntos “braço robótico” e “sensor capacitivo”. Os assuntos, em separado, foram encontrados com grande recorrência, mas faltaram resultados especificamente reunindo as duas tecnologias em um único processo construtivo. Considerando tal escassez, o trabalho objetivou justamente desenvolver e apresentar o processo construtivo de um braço robótico usando servomotores acionados por sensores capacitivos que foram desenvolvidos pelo próprio autor. Como resultado, foi apresentada a completa operacionalidade de um braço robótico acionado por sensores capacitivos, permitindo que o mesmo operasse de acordo com o projeto pretendido, mostrando que a proposta do presente trabalho é perfeitamente aplicável no acionamento de robôs industriais, vindo a favorecer o setor quanto à operacionalidade e durabilidade usando esse tipo de acionamento.

**Palavras-chave:** Robótica. Manipulador Robótico. Sensor Capacitivo.



## **ABSTRACT**

The purpose of this work is to present an alternative way of activating a robotic arm using capacitive sensors, as they have the differential of not requiring the physical contact of the operator's hand with the arm control equipment. In this application, the robotic arm movements occur by changing the electrostatic field produced by the capacitive sensors. A bibliographic research was carried out on the subject, and there was a scarcity of material that jointly addressed the subjects "robotic arm" and "capacitive sensor". The subjects, separately, were found with great recurrence, but there was a lack of results specifically bringing together the two technologies in a single constructive process. Considering such scarcity, the work aimed precisely to develop and present the construction process of a robotic arm using servomotors driven by capacitive sensors that were developed by the author himself. As a result, the complete operability of a robotic arm activated by capacitive sensors was presented, allowing it to operate according to the intended project, showing that the proposal of the present work is perfectly applicable in the activation of industrial robots, coming to favor the sector regarding the operability and durability using this type of drive.

**Key words:** Robotics. Robotic Manipulator. Capacitive Sensor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método de acionamento em malha aberta.....	24
Figura 2 – Diagrama de blocos do controle em malha fechada de um manipulador robótico .	25
Figura 3 – Método de acionamento em malha fechada empregando um controlador.....	26
Figura 4 – Método de acionamento em malha fechada utilizando um servo driver.....	26
Figura 5 – Modelo de garras de dois dedos .....	28
Figura 6 – Sensores capacitivos industriais .....	29
Figura 7 – Dois condutores com cargas opostas em dielétrico uniforme .....	30
Figura 8 – Capacitor de placas paralelas .....	31
Figura 9 – Linhas de campo elétrico na face do sensor.....	34
Figura 10 – Linhas de campo elétrico na presença da mão do operador.....	35
Figura 11 – Circuito integrado MC34940 da Freescale™ .....	36
Figura 12 – Forma de onda gerada pelo oscilador interno do MC34940.....	37
Figura 13 – Diagrama em blocos interno do MC34940 .....	38
Figura 14 – Sinal proveniente dos sensores E1 e E2 para retificação .....	39
Figura 15 – Terminal LPCAP do MC34940 .....	40
Figura 16 – Resistor de carga do oscilador interno .....	41
Figura 17 – Capacitor modelo de placas paralelas .....	42
Figura 18 – Diagrama em blocos conceitual .....	43
Figura 19 – Microcontrolador DsPIC30F4011.....	44
Figura 20 – Descrição dos terminais do microcontrolador DsPIC30F4011.....	44
Figura 21 – Placa de controle do microcontrolador DsPIC30F4011.....	45
Figura 22 – Fixação das placas na base de madeira .....	46
Figura 23 – Dispersão das linhas de campo elétrico no sensor .....	47
Figura 24 – Diagrama de conexões entre a placa de controle e o sensor .....	48
Figura 25 – Blindagem eletrostática.....	48
Figura 26 – Vinil de impressão e base dos sensores impresso .....	49
Figura 27 – Montagem dos sensores e figura impressa para cobertura.....	50
Figura 28 – Fios de conexão dos sensores com o MC34940 .....	50
Figura 29 – Sensor montado.....	51
Figura 30 – Forma de onda do sensor superior .....	52
Figura 31 – Forma de onda do sensor lateral direita .....	52
Figura 32 – Forma de onda do sensor inferior .....	53

Figura 33 – Forma de onda do sensor lateral esquerda .....	53
Figura 34 – Distância máxima dos sensores.....	54
Figura 35 – Pino ROSC do MC34940.....	55
Figura 36 – Resistor usado para ajuste de sensibilidade .....	55
Figura 37 – Diagrama em blocos interno do MC34940 .....	58
Figura 38 – Pino LPCAP do MC34940.....	59
Figura 39 – Blindagem eletrostática do sensor.....	60
Figura 40 – Dispersão das linhas de campo elétrico no sensor .....	60
Figura 41 – Blindagem eletrostática na base do sensor.....	61
Figura 42 – Terminal SHIELD de saída para blindagem .....	62
Figura 43 – Buffer de saída para blindagem .....	62
Figura 44 – Forma de onda presente em dos sensores .....	63
Figura 45 – Forma de onda presente no terminal SHIELD.....	63
Figura 46 – Conexões da placa de controle e da blindagem .....	64
Figura 47 – Resistor e capacitor SMD.....	64
Figura 48 – Circuito detector montado numa placa de fenolite .....	65
Figura 49 – Pinos de entrada ABC para seleção dos sensores .....	66
Figura 50 – Diagrama em blocos das entradas ABC do MC34940 .....	66
Figura 51 – Pinos de conexão do dsPIC30F4011 com o MC34940.....	67
Figura 52 – Diagrama de conexão da placa de controle com o MC34940.....	68
Figura 53 – Sinais de controle nos pinos ABC.....	69
Figura 54 – Pino LEVEL do MC34940 .....	70
Figura 55 – Tensão de saída em função da distância do sensor .....	70
Figura 56 – Tensão no terminal LEVEL do MC34940.....	71
Figura 57 – Diagrama de conexão da entrada analógica do microcontrolador .....	72
Figura 58 – Diagrama em blocos do conversor analógico digital .....	73
Figura 59 – Conjunto de registradores do módulo ADC.....	74
Figura 60 – Diagrama em blocos do módulo PWM.....	75
Figura 61 – Diagrama de pinos do dsPIC304011 .....	76
Figura 62 – Conexão das saídas PWM do dsPIC304011 com os servomotores .....	76
Figura 63 – Sinais PWM dos servomotores .....	77
Figura 64 – Frequência dos sinais PWM.....	79
Figura 65 – <i>Duty cycle</i> de um sinal PWM.....	80
Figura 66 – Razão cíclica mínima do sinal PWM do motor da base.....	80

Figura 67 – Razão cíclica máxima do sinal PWM do motor da base .....	81
Figura 68 – Razão cíclica mínima do sinal PWM do motor do braço.....	81
Figura 69 – Razão cíclica máxima do sinal PWM do motor do braço .....	82
Figura 70 – Razão cíclica mínima do sinal PWM do motor da garra .....	82
Figura 71 – Razão cíclica máxima do sinal PWM do motor da garra.....	83
Figura 72 – Protoboard usada para expandir as conexões da placa de controle.....	84
Figura 73 – Braço robótico .....	85
Figura 74 – Base de MDF do braço robótico .....	86
Figura 75 – Barras de sustentação e suporte central de apoio .....	86
Figura 76 – Primeiro elo do braço robótico.....	87
Figura 77 – Segundo elo do braço robótico.....	87
Figura 78 – Servomotores utilizados .....	88
Figura 79 – Servomotores utilizados .....	88
Figura 80 – Garra robótica.....	89
Figura 81 – Servomotor utilizado na garra robótica.....	89
Figura 82 – Servomotor utilizado na garra robótica.....	90
Figura 83 – Display LCD e conexão com Arduino .....	91
Figura 84 – Barra gráfica no display LCD .....	91
Figura 85 – Ambiente de programação integrado CCS C.....	92
Figura 86 – Ambiente de programação do Arduino .....	93
Figura 87 – Gravador/depurador USB Pickit 3 .....	94
Figura 88 – Terminais de conexão do gravador Pickit 3.....	95
Figura 89 – Adaptação do gravador PICKit3 .....	95
Figura 90 – Interface gráfica do ambiente de programação .....	96
Figura 91 – Botões de controle manual do braço robótico.....	98
Figura 92 – Posicionamento da mão do operador sobre a face do sensor .....	99
Figura 93 – Procedimento de gravação do valor de capacitância de referência.....	99
Figura 94 – Diagrama de conexões da placa de controle .....	100
Figura 95 – Movimento vertical de subida.....	101
Figura 96 – Movimento vertical de descida .....	101
Figura 97 – Movimento de rotação para esquerda ou direita .....	102
Figura 98 – Movimentos de abertura e fechamento da garra .....	103
Figura 99 – Fonte de alimentação do braço robótico .....	103
Figura 100 – Níveis de tensão na alimentação do braço robótico .....	104

Figura 101 – Esquemático da montagem .....	105
Figura 102 – Montagem final do braço robótico com os sensores capacitivos.....	107
Figura 103 – Aplicação de múltiplos sensores capacitivos .....	108

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Permissividade relativa de alguns materiais.....	32
Quadro 2 – Quadro dos registradores do módulo PWM do dsPIC304011 .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do oscilador do MC34940 .....	56
Tabela 2 – Nível de tensão de saída nos sensores em relação à capacitância medida.....	57
Tabela 3 – Tabela de seleção dos sensores.....	67
Tabela 4 – Tabela de seleção dos sensores.....	71
Tabela 5 – Descrição da legenda da tabela.....	73
Tabela 6 – Descrição dos terminais de saída PWM para os servomotores .....	77
Tabela 7 – Porcentagens de razão cíclica usadas .....	83

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico tensão de capacitância .....	57
Gráfico 2 – Gráfico tensão de saída (LEVEL) em função da distância .....	72
Gráfico 3 – Representação em barras da distância da mão à face do sensor.....	97



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação geral da capacitância .....	30
Equação 2 – Equação geral da capacitância .....	31
Equação 3 – Permissividade relativa .....	32
Equação 4 – Equação geral da capacitância .....	33
Equação 5 – Permissividade eletrostática do vácuo .....	33
Equação 6 – Equação da permissividade absoluta .....	33
Equação 7 – Equação geral da capacitância de um capacitor de placas paralelas.....	42
Equação 8 – Equação para cálculo do período dos sinais PWM.....	78
Equação 9 – Equação para cálculo do período dos sinais PWM.....	78
Equação 10 – Cálculo do valor de PTPER .....	79

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC	Analog-to-Digital Converter
AWG	American Wire Gauge
DC	Direct Current
DSC	Digital Signal Controller (Controlador Digital de Sinais)
DSP	Digital Signal Processor (Processador Digital de Sinais)
F	Farad
GND	Ground
ICSP	In-circuit Serial Programming
IDE	Integrated Development Environment
IPE	Integrated Programming Environment
JFET	Junction Field Effect Transistor
LPF	Low Pass Filter
MCPWM	Motor Control PWM Module
MCU	Microcontrolador
MDF	Medium Density Fiberboard
MSPS	Mega samples per Second
MUX	Multiplexador
PID	Proportional, Integral, Derivativo
PVC	Polyvinyl chloride
PWM	Pulse Width Modulation
S/H	Sample and Hold
SAR	Successive Approach Record (Registro de Aproximação Sucessiva)
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMD	Surface Mounted Device
V	Volt
ZIF	Zero Insertion Force

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>BRAÇO ROBÓTICO .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Controle de um braço robótico.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Garra robótica .....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>SENSOR CAPACITIVO.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Definição de sensor .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Capacitância.....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Princípio de funcionamento .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Microcontrolador.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Sensores .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>Sensibilidade.....</b>	<b>54</b>
<b>4.5</b>	<b>Tempo de resposta .....</b>	<b>58</b>
<b>4.6</b>	<b>Blindagem.....</b>	<b>59</b>
<b>4.7</b>	<b>Circuito detector .....</b>	<b>64</b>
<b>4.8</b>	<b>Comutação dos sensores.....</b>	<b>65</b>
<b>4.9</b>	<b>Sinal de saída.....</b>	<b>69</b>
<b>4.10</b>	<b>Conversor analógico digital .....</b>	<b>73</b>
<b>4.11</b>	<b>Controle PWM .....</b>	<b>75</b>
<b>4.12</b>	<b>Braço Robótico.....</b>	<b>85</b>
<b>4.13</b>	<b>Servomotores.....</b>	<b>88</b>
<b>4.14</b>	<b>Efetuator (garra).....</b>	<b>89</b>
<b>4.15</b>	<b>Arduino.....</b>	<b>90</b>
<b>4.16</b>	<b>Programação .....</b>	<b>92</b>
<b>4.17</b>	<b>Gravação do firmware .....</b>	<b>93</b>
<b>4.18</b>	<b>Modos de operação .....</b>	<b>96</b>
<b>4.19</b>	<b>Calibração dos sensores .....</b>	<b>98</b>
<b>4.20</b>	<b>Movimentação do braço robótico.....</b>	<b>100</b>
<b>4.21</b>	<b>Alimentação.....</b>	<b>103</b>

<b>4.22</b>	<b>Esquemático .....</b>	<b>104</b>
<b>4.23</b>	<b>Problemas encontrados .....</b>	<b>106</b>
<b>4.24</b>	<b>Material utilizado.....</b>	<b>106</b>
<b>4.25</b>	<b>Montagem final .....</b>	<b>107</b>
<b>4.26</b>	<b>Sugestão de melhorias .....</b>	<b>108</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente uso de robôs industriais está diretamente associado à alta produtividade e à oferta de melhores condições de trabalho ao ser humano, poupando-os de realizar atividades insalubres com contato direto ou, até mesmo, permitindo a realização de trabalhos impossíveis se os mesmos necessitassem ser realizados manualmente, como por exemplo, deslocamento de cargas pesadas (ROMANO; DUTRA, 2002).

A qualidade do trabalho que o robô irá desempenhar está intimamente ligada à sua forma de controle. Nos modelos de braços robóticos manipulados manualmente, o formato e a ergonomia do controlador empregado para realizar os movimentos do braço determinarão o desempenho da tarefa que será executada pelo operador. Em aplicações que exijam a habilidade do operador ao manusear o braço robótico, a estrutura do controlador manual usado para cumprir essa tarefa é de fundamental importância. Os controladores manuais tradicionais utilizam elementos mecânicos para permitir o operador realizar os movimentos do braço robótico. Esses elementos, com o passar do tempo, sofrem desgaste por atrito e comprometem o desempenho dos movimentos do braço robótico e carecem de manutenção frequente.

Neste ínterim, existe a possibilidade de utilização de sensores capacitivos. Segundo Mazaroppi (2007, p.7), “os sensores de proximidade capacitivos são sensores ativos de presença projetados para operar gerando um campo eletrostático e detectando mudanças neste campo causadas quando um objeto se aproxima do sensor”. Ao utilizar sensores capacitivos, sem necessidade de contato físico, e portanto sem necessidade de atrito dos componentes do controle, o desgaste de peças é reduzido praticamente a zero, diminuindo, assim, a necessidade de manutenções constantes do controlador.

A realização da pesquisa preliminar permitiu constatar que são numerosos os estudos tratando isoladamente cada um dos assuntos: o braço robótico e o sensor capacitivo. Porém, estudos que abordem a junção desses dois recursos são escassos. E mesmo quando são encontrados, por vezes limitam-se a uma solução parcial, como no caso de Mendonça *et al.* (2016), que apresentam o desenvolvimento de um braço robótico controlado por Arduino, mas com controle tradicional usando botões para os comandos.

Diante dessa escassez de material, fica assim delimitada a pergunta problema da pesquisa: qual é a viabilidade e como pode ser construído um braço robótico controlado por sensor capacitivo?

Toma-se como hipótese para essa pergunta, que os avanços realizados na área de sensoriamento usando tecnologia capacitiva deverão delinear como viável a construção de

controladores que envolvam sensores por presença capacitivo, sem necessidade de toque, para realizar o controle de manipuladores robóticos com alto grau de precisão, proporcionando ao operador facilidade e conforto no manuseio do mesmo.

O presente estudo, para realização desta abordagem, é composto por um referencial teórico dividido em dois tópicos principais, cada um tratando de uma das bases fundamentais do tema: braço robótico e sensor capacitivo. Posteriormente, é apresentado, de forma pormenorizada, o processo de desenvolvimento do braço robótico que caracteriza o objeto final do trabalho.

## 1.1 Justificativa

Diversos estudos podem ser encontrados com ênfase, separadamente, nos manipuladores robóticos e no desenvolvimento de aplicações utilizando sensores capacitivos. No entanto, pouco material é disponibilizado envolvendo a utilização de sensores capacitivos para controle de um braço robótico.

Trata-se de um sistema de controle que dispensa o toque, não havendo contato físico do operador com o dispositivo. Isso proporciona dois principais benefícios.

Como primeiro benefício aplicativo, a utilização de um sensor capaz de detectar a presença ou toque do operador e realizar movimentos correspondentes num braço robótico tem potencial de permitir que pessoas portadoras de deficiência física ou motora, com limitações no movimento dos dedos ou mesmo na falta deles, possam operar o braço robótico da mesma forma que um operador sem deficiência faria utilizando um controlador manual.

O segundo principal benefício em se usar um sensor capacitivo no lugar de um controlador convencional é a possibilidade do prolongamento da vida útil do dispositivo, visto que o controlador, quando comparado com os controles industriais manuais tradicionais (*joystick*), não passa pelo processo de desgaste natural dos botões e teclas de controle, por não haver toque.

O presente estudo justifica-se, portanto, por esses dois benefícios apresentados, e pelas possibilidades de derivação, visto que diversos outros tipos de dispositivo que necessitem de algum tipo de controlador podem sê-lo comandados também por um sensor capacitivo, evidenciando a replicabilidade do projeto.

Este trabalho é derivado de um projeto da disciplina de Técnicas Avançadas em Microcontroladores, no qual foi realizada a confecção inicial de um braço robótico acionado por sensor capacitivo. A proposta do projeto é apresentar uma forma de acionamento alternativo

de um braço robótico utilizando sensor capacitivo, mas que poderá ser usado em outras aplicações em que seja necessário fazer comandos manuais sem contato físico do usuário com o sensor.

## 1.2 Objetivos

O Objetivo Geral do presente trabalho é desenvolver e apresentar o processo construtivo de um braço robótico controlado por sensor capacitivo.

Os Objetivos Específicos são:

- Conhecer os conceitos, elementos e partes integrantes de um braço robótico;
- Compreender o funcionamento de sensores, aprofundando especificamente os sensores capacitivos;
- Compreender os aspectos de software e hardware da interface de controle do braço robótico utilizando microcontrolador DSPic e Arduino;
- Construir um braço robótico com três graus de liberdade;
- Elaborar um sensor capacitivo de 4 canais independentes para manipulação do braço robótico.

## 1.3 Metodologia

O presente estudo envolve a conjunção entre uma pesquisa bibliográfica acerca do tema estudado e a execução de um projeto prático envolvendo a construção de um braço robótico controlado por sensor capacitivo. Sua classificação, quanto à tipologia, é de Pesquisa Qualitativa. Segundo Reis (2008), a Pesquisa Qualitativa é baseada na interpretação não quantitativa dos fenômenos analisados, de forma que os resultados e toda sua análise são apresentados de forma textual e analítica, sem embasamento fundamentalmente numérico. Não envolve a elaboração ou análise de gráficos oriundos de levantamento junto a populações ou indivíduos. Tais características são, de fato, ausentes no presente trabalho, que tem como principal foco a construção de um aparato tecnológico.

Quanto aos objetivos da pesquisa, é classificada como aplicada, que, conforme Cooper e Schindler (2001), visa à produção de conhecimentos e tecnologias para aplicação prática dos resultados, diferindo da pesquisa intervencionista pela ausência de uma aplicação de cunho imediato em uma circunstância real de necessidade. Trabalha-se com a apresentação

de conhecimentos que possibilitem a tomada de decisões e/ou o beneficiamento de grupos ou indivíduos, ou ainda que propiciem avanços posteriores em termos de novas tecnologias. Essa característica reflete diretamente a construção do braço robótico proposto.

Quanto aos procedimentos adotados, a classificação se dá como pesquisa-ação, que, conforme Gil (2002), toma por base a execução de algo, uma ação que pode ser caracterizada como educativa, social, técnica ou tecnológica, entre outras. Este tipo de pesquisa pressupõe a participação direta do pesquisador, podendo ser de forma individual ou cooperativa junto com um potencial público pesquisado. Na presente situação, a participação acontece de forma individual e unilateral, sendo caracterizada pela construção do aparato tecnológico representado pelo braço robótico controlado por sensor capacitivo.

Além da execução do processo construtivo, de fato, foram utilizadas, como instrumento de pesquisa, a pesquisa bibliográfica e a pesquisa documental, caracterizadas por Reis (2008), simultaneamente, como pesquisa baseada em documentos e bibliografias preexistentes que forneçam os elementos teóricos necessários à contextualização do tema e à execução do projeto, e a pesquisa baseada em materiais ainda não tratados analiticamente ou cientificamente, como manuais, fichas técnicas e outros documentos que, embora não carreguem caráter científico, contribuem para a realização do objetivo proposto.

Os resultados são apresentados textualmente, de forma analítica e descritiva, sendo o conteúdo dividido em dois grandes blocos: a revisão bibliográfica, que fornece os conceitos e pressupostos teóricos inerentes ao tema, e o desenvolvimento, que descreve minuciosamente o processo construtivo, de fato.



## 2 BRAÇO ROBÓTICO

### 2.1 Controle de um braço robótico

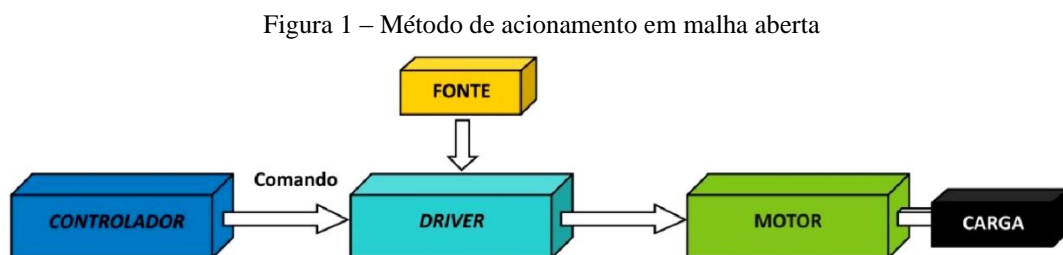
Controle constitui uma maneira de fazer com que a saída de um determinado modelo dinâmico siga um valor de referência fixo. Um sistema de controle combina elementos de hardware e software para alcançar esse objetivo. Os sensores são componentes de hardware responsáveis por capturar as informações de saída do sistema dinâmico e enviar para o software e este atua sobre os dispositivos de hardware para efetuar as correções necessárias (ALVES, 2018).

Segundo Valdiero (2005), controle é definido como um conjunto de dispositivos que possui elementos de hardware e software onde é aplicado um esquema de controle que inclui sensores, circuitos, modo de operação e elementos de saída.

O controle de um braço robótico pode ser realizado de duas formas distintas: controle em malha aberta e controle em malha fechada. No sistema de controle em malha aberta não existe informação proveniente dos sensores, ou seja não existe realimentação ou feedback do sinal, para que seja realizada a correção necessária. Isso significa que durante a operação dos atuadores do manipulador não existe amostras de informação para o sistema de controle (MENDONÇA *et al.*, 2016).

Segundo Bueno (2018, p.29), “o sistema de controle em malha aberta realiza o controle sem que haja um sensoriamento externo, conseqüentemente, a ação do controle independe da variável de saída do sistema”.

A estratégia de controle em malha aberta pode ser visualizada pela representação em diagrama em blocos exibida na Figura 1.



Fonte: Carvalho (2009, p.24)

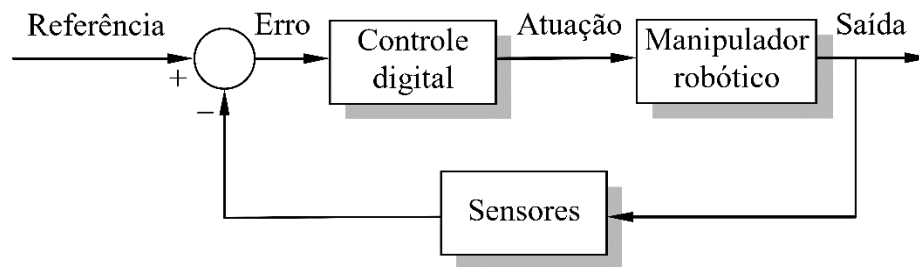
Observa-se que nesse método de controle do manipulador não existe uma estrutura de realimentação entre o atuador (motor) e o bloco de controle (controlador). Dessa forma, não

existe garantia que o braço robótico estará exatamente na posição pretendida, pois o mesmo não possui sensores para alimentar o sistema de controle com a posição das juntas ou dos atuadores.

Neste trabalho, o controlador é representado pelos sensores capacitivos responsáveis pelos movimentos do braço robótico

Um sistema de controle baseado em malha fechada consiste em uma verificação da condição atual da saída do sistema e comparar com um valor de referência. A diferença entre os dois valores resulta num erro que será utilizado pelo sistema de controle para realizar os ajustes para minimizar esse erro ao mínimo. Um esquema simplificado de um sistema em malha fechada pode ser visualizado na Figura 2:

Figura 2 – Diagrama de blocos do controle em malha fechada de um manipulador robótico



Fonte: Carrara (2015, p.30)

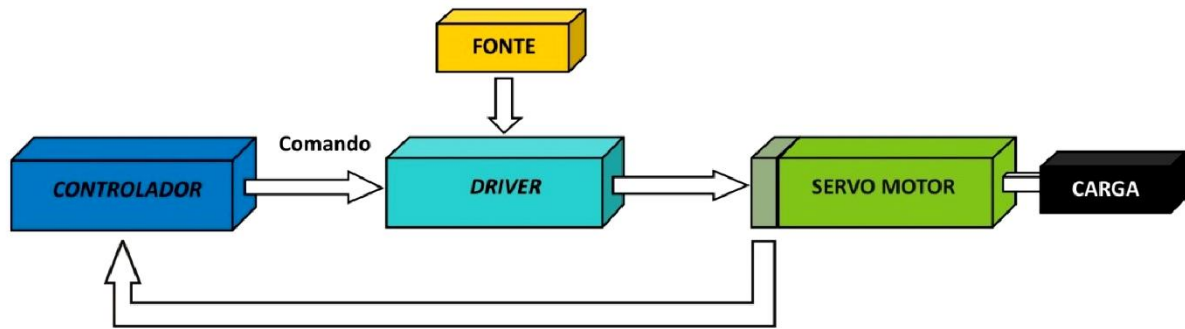
Segundo Alves (2018), um sistema de controle em malha fechada consiste na aferição da magnitude dos desvios ou erros provocados pela diferença entre o sinal de saída e o sinal de referência e realizar a correção desses erros.

Um sistema em malha fechada possui um sistema de retroalimentação, que através de um sensor transfere a informação que sai do acionador, motor, atuador ou junta, para o sistema de controle, que compara a informação recebida com um sinal de referência e realiza as correções no atuador (MENDONÇA *et al.*, 2016).

Segundo Bueno (2018, p. 29), “o controle retroativo, conhecido também por malha fechada, tem como objetivo controlar a variável de entrada medida por um sensor, informando assim ao controlador o valor para influenciar a variável de saída”.

Uma aplicação prática na implementação de um sistema envolvendo controle em malha fechada pode ser realizado para controlar um servo motor. Nesse tipo de situação, é utilizando um sistema de realimentação entre o servo motor e o controlador, que por sua vez, comanda o *driver* que alimenta o servo motor. Um diagrama em blocos desse tipo de controle é exemplificado na Figura 3:

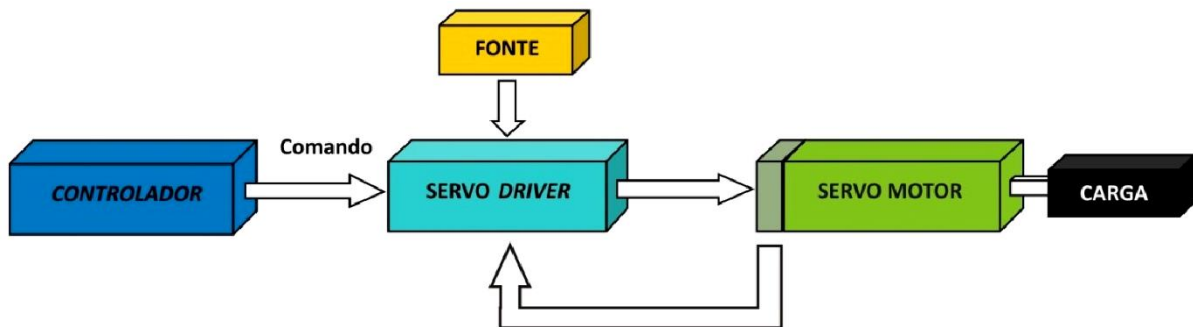
Figura 3 – Método de acionamento em malha fechada empregando um controlador



Fonte: Carvalho (2009, p. 25)

Outra topologia utilizada para controle de servo motor é implementando controle em malha fechada utilizando realimentação entre o servo motor e o *driver*, que nesse caso, recebe a denominação de *servo driver*. O *servo driver* é o dispositivo responsável por realizar simultaneamente o acionamento e o controle de posição e velocidade do servo motor. Um diagrama em blocos desse tipo de controle é exibido na Figura 4:

Figura 4 – Método de acionamento em malha fechada utilizando um servo driver



Fonte: Carvalho (2009, p. 25)

Nessa condição, o controlador fica livre para enviar comandos externos de posição e velocidade, definidos pela programação ou pelo usuário, para o *servo driver*. Esse é o tipo de circuito empregado nos servo motores usados nesse trabalho.

## 2.2 Garra robótica

O braço robótico é o dispositivo responsável para deslocar ou realizar serviços sobre objetos no seu espaço de trabalho. O atuador, localizado no elo mais externo do braço, fica acoplado o punho do braço e é projetado para a realização de tarefas específicas. Esse atuador, que também chamado de efetuador, pode ser uma garra ou ferramenta e constitui um dos

componentes mais importantes do manipulador robótico. A garra é o efetuator responsável por deslocar os objetos de um ponto a outro no ambiente e realizar várias tarefas como: carregamento ou descarregamento de cargas ou máquinas, manipulação ou paletização de objetos e até mesmo realização de tarefas mais precisas como procedimentos médicos de cirurgia em um ambiente hospitalar (JACINTO; BUGATTI, 2018).

O ato de movimentar ou manipular um determinado objeto fica à cargo da garra mecânica que prende ou agarra o objeto no ambiente de trabalho do braço robótico (OLIVEIRA, 2017).

Jacinto e Bugatti (2018) afirmam que uma garra robótica é um tipo de efetuator que fica diretamente acoplado ao punho, localizado no último elemento do braço robótico, cuja principal função é manipular objetos, movimentando-os de uma determinada posição pré-estabelecida para outra através de movimentos de agarrar e soltar.

Ainda Jacinto e Bugatti (2018), afirmam que existe uma vasta gama de tipos de garras no mercado, sendo que, cada uma é adequada para um trabalho específico a ser desempenhado. Pode-se citar alguns exemplos: garra que utiliza pressão nas suas laterais para promover a força necessária para agarrar o objeto, garra magnética usando ímãs para prender o objeto, garras a vácuo que utiliza ar comprimido para manter o objeto na posição e garras especiais para trabalhos em alta temperatura, produtos corrosivos ou perigosos.

As garras também podem ser definidas como mãos do manipulador robótico, pois ficam acopladas ao seu pulso. A garra também é descrita como órgão terminal responsável pela manipulação dos objetos de diferentes formas e tamanhos (CARRARA, 2015).

Conforme cresce a necessidade de aplicação dos braços robóticos em diferentes ambientes de trabalho, surge a necessidade do desenvolvimento de garras para manipulação de objetos de características cada vez mais peculiares. Para atender as necessidades de manuseio de objetos com formas distintas, usa-se garras de vários formatos e tecnologias, como por exemplo: garras de dois ou três dedos, garras com ventosas de sucção, garras com eletroímãs, garras com ganchos, garras para preenchimento de objetos cilíndricos, garras articuladas e garras eletromagnéticas (JACINTO; BUGATTI, 2018).

Carrara (2015) apresenta modelos de garra de dois dedos simplificados que apresentam movimentos de rotação e movimentos paralelos para realizar preenchimento do objeto. Esse tipo de garra apresenta pouca versatilidade para manipular os objetos devido aos limites de abertura dos seus dedos impostos pela sua estrutura construtiva. Por conta dessa limitação, esse tipo de garra só pode manusear objetos que possuam dimensões inferiores à sua capacidade de abertura. Na Figura 5 é exibido dois modelos desse tipo de garra.

Figura 5 – Modelo de garras de dois dedos



Fonte: Carrara (2015, p. 20)

Romano e Dutra (2002) afirmam que vários fatores precisam ser considerados no momento da concepção do projeto de uma garra, visto que ela é o elemento terminal do braço robótico que ficará em contato direto com o objeto sendo manipulado. Segundo a norma ISO 14539 de 1998, é necessário o conhecimento de alguns itens para que o robô opere de forma eficiente como por exemplo: posicionamento, forma e geometria dos dedos e da palma da garra, movimentos dos dedos durante o agarramento, número e posicionamento dos atuadores, número e posicionamento dos sensores, mecanismos de transmissores de potência, tipo, tempo e força de agarramento, sistema de controle de força e posição empregado, quantidade e tipo de material usados na fabricação dos dedos, graus de liberdade dos dedos, geometria, peso, temperatura máxima e mínima, propriedades magnéticas e características da superfície do objeto a ser manipulado.

Carrara (2015) afirma que, ao se projetar uma garra, deve-se levar em consideração o tipo de objeto que será manipulado. Portanto, a garra projetada deverá ter força suficiente para prender o objeto com precisão mas não tão forte à ponto de danificá-lo. Para alcançar esse objetivo, algumas garras são dotadas de sensores que passam informações para o sistema de controle informando sobre a força que está sendo aplicada no objeto manipulado e assim, controlar a intensidade dessa força sobre objeto.

### 3 SENSOR CAPACITIVO

#### 3.1 Definição de sensor

De uma forma abrangente, um sensor é um sistema capaz de responder com um sinal, geralmente de natureza elétrica, em resposta a um estímulo físico que pode ser calor, pressão, movimento, luz, som ou qualquer outra grandeza física mensurável (MENDONÇA, 2008).

Segundo Mazzaroppi (2007), os sensores podem ser divididos em sensores ativos e sensores passivos. Sensores ativos necessitam de uma fonte externa de energia para funcionar adequadamente. Um sinal de excitação externa é necessário para que o sensor possa responder em sua saída. Um sensor passivo não requer uma fonte de energia externa, fornecendo diretamente um sinal elétrico em sua saída em resposta ao estímulo externo.

#### 3.2 Capacitância

A propriedade da capacitância elétrica é usada em vários tipos de sensores por conta de alguns princípios físicos que ele exhibe. Por exemplo, ao variar a distância entre as placas de um capacitor de placas paralelas, ou modificar o dielétrico entre elas, a capacitância é modificada. Portanto, esses dois princípios básicos podem ser utilizados para uso em sensores capacitivos (BORIM; PINTO, 2015).

Segundo Silva (2013), sensores capacitivos são desenvolvidos para gerar um campo eletrostático e realizar medições contínuas das variações nesse campo. Uma perturbação nesse campo pode ser causada por objetos metálicos ou não. A Figura 6 mostra modelos de sensores capacitivos normalmente utilizados em aplicações industriais.

Figura 6 – Sensores capacitivos industriais

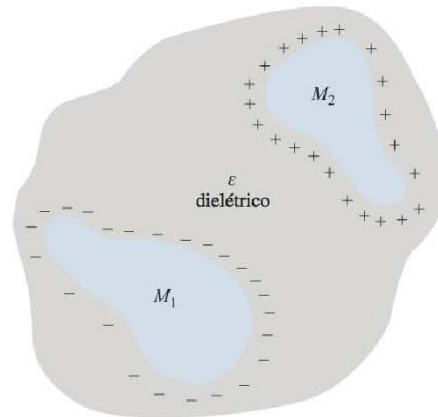


Fonte: Wendling (2010, p. 17)

Para que o efeito capacitivo possa ser compreendido como princípio básico de funcionamento de sensores, é necessário caracterizar com precisão a definição de capacitância.

A capacitância é uma propriedade física inerente a um sistema formado por dois condutores quaisquer, imersos em um meio dielétrico e carregados com cargas elétricas opostas, conforme pode ser observado na Figura 7 (HAYT, 2013).

Figura 7 – Dois condutores com cargas opostas em dielétrico uniforme



Fonte: HAYT (2013, p. 144)

A forma mais genérica para definir o conceito de capacitância entre dois condutores, imersos em um meio dielétrico homogêneo, é calculando a razão entre o valor absoluto da carga total, considerando um dos condutores, e o valor absoluto do potencial entre os condutores (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

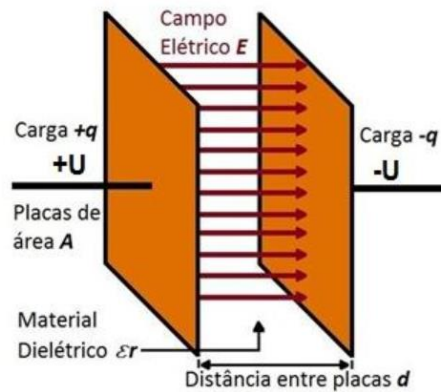
Equação 1 – Equação geral da capacitância

$$C = \frac{Q}{V_0}$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 108)

Onde o valor da carga  $Q$  é o módulo da carga elétrica total de cada condutor e  $V_0$  é a diferença de potencial elétrico entre os condutores imersos no dielétrico. Portanto, capacitância revela a capacidade que um capacitor possui de acumular cargas quando seus terminais são submetidos à determinado nível de tensão elétrica. Quando se considera que os condutores genéricos são placas condutoras paralelas separadas por um dielétrico, o capacitor em questão recebe a denominação de capacitor de placas paralelas (HAYT, 2013). A Figura 8 exibe um modelo de capacitor de placas paralelas.

Figura 8 – Capacitor de placas paralelas



Fonte: Weber; Longo; Murakami (2013)

Para um capacitor de placas paralelas, como mostrado na Figura 8, a capacidade de armazenamento de cargas também pode ser representada pela Equação 2:

Equação 2 – Equação geral da capacitância

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 108)

Sendo:

$\epsilon$  = Permissividade elétrica do meio material entre as placas;

$d$  = Distância entre as placas do capacitor;

$A$  = Área da placa;

A constante de proporcionalidade  $C$  é chamada capacitância do capacitor que no Sistema Internacional de Unidades (SI) tem a unidade como sendo de um farad (F) quando um coulomb de carga provoca uma diferença de potencial de um volt (V) entre as placas. A constante capacitância não depende das grandezas carga e da tensão aplicada nos terminais do capacitor. A capacitância é função apenas dos aspectos construtivos do capacitor e das propriedades elétricas dos materiais que caracterizam o elemento capacitivo, sendo estes três fatores (SADIKU, 2003):

- Área da superfície das placas: a capacitância é maior quanto maior for a área das placas nas quais está sendo aplicado o campo elétrico;
- Espaçamento entre as placas: quanto menor for a distância entre as placas, maior o valor da capacitância;



- Permissividade elétrica do material: quanto maior for a permissividade do meio, maior a capacitância.

Portanto, é possível estabelecer uma relação entre os três fatores que determinam a capacitância, para capacitores com placas paralelas, de acordo com a equação que a define. Cada material possui sua própria permissividade elétrica, denominada permissividade absoluta ( $\epsilon$ ). Porém, essa permissividade absoluta, geralmente é representada pela denominada permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) ou constante dielétrica ( $k$ ), sendo todos os valores de constante dielétrica ou permissividade relativa relacionados à permissividade do vácuo ( $\epsilon_0$ ). A permissividade relativa é dada pela seguinte expressão:

Equação 3 – Permissividade relativa

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 119)

Observa-se por este quociente que a grandeza permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) é adimensional, uma vez que a permissividade absoluta ( $\epsilon$ ) do material e a permissividade do vácuo ( $\epsilon_0$ ) têm como unidade F/m (farad/metro).

No Quadro 1, são apresentados alguns valores de permissividade relativa de algumas substâncias.

Quadro 1 – Permissividade relativa de alguns materiais

<b>Substância</b>	<b>Permissividade Relativa (<math>\epsilon_r</math>)</b>
Ar	1,00
Óleo cru	2,19
Ceras de Parafina	2,22
Éter Dietílico	4,24
2-Propanol	20,00
Etanol	24,00
Etileno-Glicol	37,00
Água Deionizada	78,00

Fonte: Weber; Longo; Murakami (2013)

Dessa forma, levando em consideração a definição da Equação 3, pode-se expressar a capacitância em termos da permissividade absoluta do material e da permissividade do vácuo, conforme pode ser observado na Equação 4:

Equação 4 – Equação geral da capacitância

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 109)

Onde:

$\epsilon_r$  = Constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante;

$\epsilon_0$  = Permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre;

O conceito de permissividade elétrica está ligado intimamente à grandeza capacitância e é caracterizada por ser a capacidade que um material dielétrico possui de polarizar-se sob a ação de um campo elétrico. A permissividade do vácuo, representada por ( $\epsilon_0$ ), é obtida através da seguinte expressão (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013):

Equação 5 – Permissividade eletrostática do vácuo

$$\epsilon_0 = \frac{1}{C^2 \cdot \mu_0} = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right]$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 109)

De acordo com a Equação 5, a constante (c) é a velocidade da luz no vácuo e ( $\mu_0$ ) é a permeabilidade magnética do vácuo (SADIKU, 2003).

Segundo Hayt (2013), quando se preenche o espaço entre as placas de um capacitor com um material dielétrico, a capacitância do capacitor aumenta por um fator de k, definido como constante dielétrica, que é uma característica inerente do material. Portanto, em qualquer região do espaço que seja completamente preenchida pelo dielétrico, todas as equações que envolvam eletrostática deverão ter alteradas modificando ( $\epsilon_0$ ) por ( $k \cdot \epsilon_0$ ). Dessa forma, a permissividade absoluta ( $\epsilon$ ) fica definida segundo a Equação 3.

Equação 6 – Equação da permissividade absoluta

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot k$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 110)

Portanto, a partir da Equação 3 e 6, conclui-se que a constante dielétrica k é numericamente igual à permissividade relativa. Por esse motivo, frequentemente, na literatura, a constante dielétrica k também é chamada permissividade relativa, sendo assim, grandezas equivalentes.

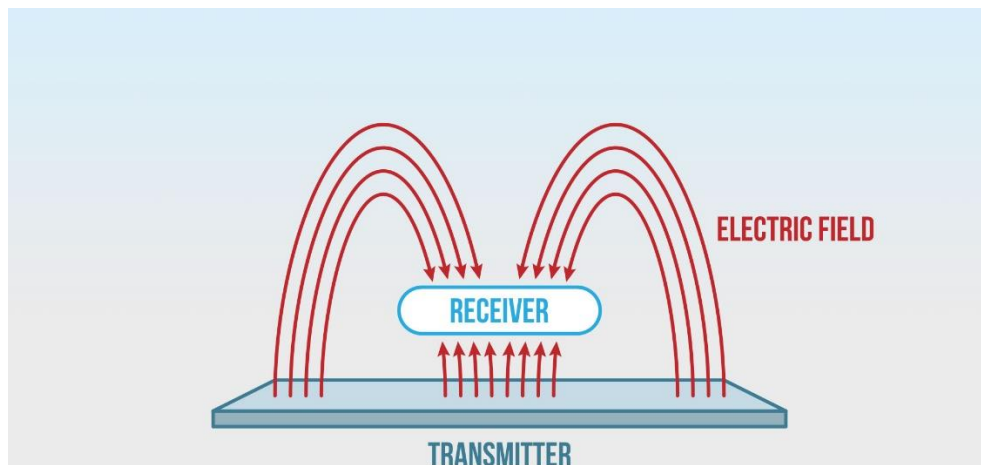
## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento desse trabalho se baseia na medição de valores de capacitância realizada por quatro sensores distribuídos simetricamente sobre uma superfície e promover o movimento correspondente em um braço robótico de acordo com a capacitância medida. Nesse trabalho foi adotado uma estratégia de controle em malha aberta, na qual o operador determina a posição do braço robótico em função da aproximação da mão em relação aos sensores capacitivos usados para o controle do braço, mas sem um sinal de feedback. Nessa modalidade de controle, conforme descrito no Subcapítulo 2.1, não existem sinais de realimentação que confirmem a posição real do braço robótico, sendo o controlador representado pelos sensores capacitivos de controle. Portanto, não existem sensores no braço robótico que permita a transmissão de informação destes para a placa de controle. Em termos práticos, o braço robótico será posicionado diretamente para a posição desejada mas sem o conhecimento do sistema de controle se realmente a posição pretendida foi alcançada. Entretanto, nada impede que um sistema em malha fechada possa ser implementado como forma de aprimoramento futuro desse trabalho.

Conforme a mão do operador se move em direção aos sensores, as linhas de campo elétrico são deformadas ou desviadas para outros sensores, fazendo com que haja uma mudança no valor da capacitância em torno da face do sensor e essa mudança de capacitância implicará no respectivo movimento do braço robótico. A Figura 9 exemplifica:

Figura 9 – Linhas de campo elétrico na face do sensor



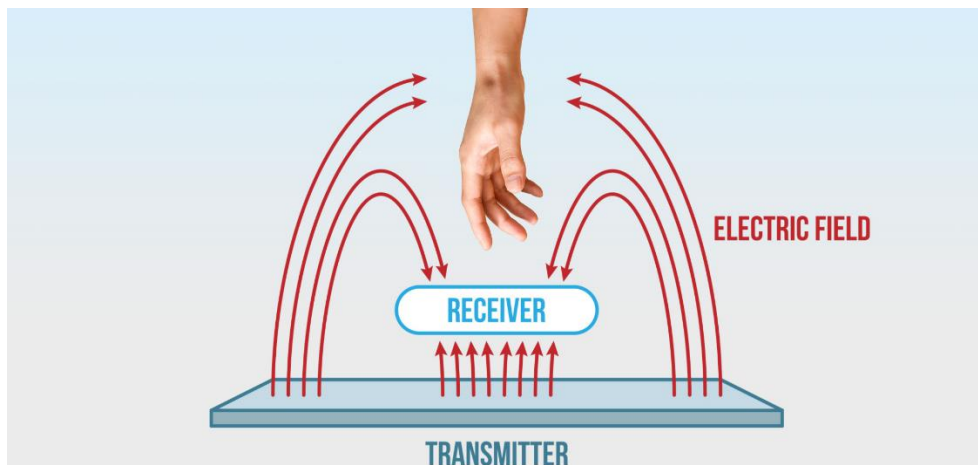
Fonte: Adaptado de Synaptics (2021)

Para exemplificar conceitualmente o que acontece nos sensores capacitivos utilizados para controle do braço robótico, é apresentado na Figura 9 uma representação da formação do campo eletrostático na face de um dos sensores. Conforme é possível observar na Figura 9, o sensor denominado “*receiver*” recebe um estímulo elétrico advindo de linhas de campo elétrico simetricamente distribuído no espaço criado por um transmissor.

Observando, ainda, a Figura 9, percebe-se que, idealmente todas as linhas de campo elétrico provenientes do transmissor, atravessam o sensor receptor. Na prática, algumas linhas do campo eletrostático são desviadas para o ambiente, pois podem ser atraídas por objetos posicionados próximos ao sensor.

Quando a mão do operador do braço robótico aproxima-se da face do sensor, o campo elétrico sofre deformações, modificando a quantidade de linhas de campo elétrico atravessando o sensor receptor e como consequência, alterando a capacitância do meio que envolve o sensor, conforme pode ser observado na Figura 10:

Figura 10 – Linhas de campo elétrico na presença da mão do operador

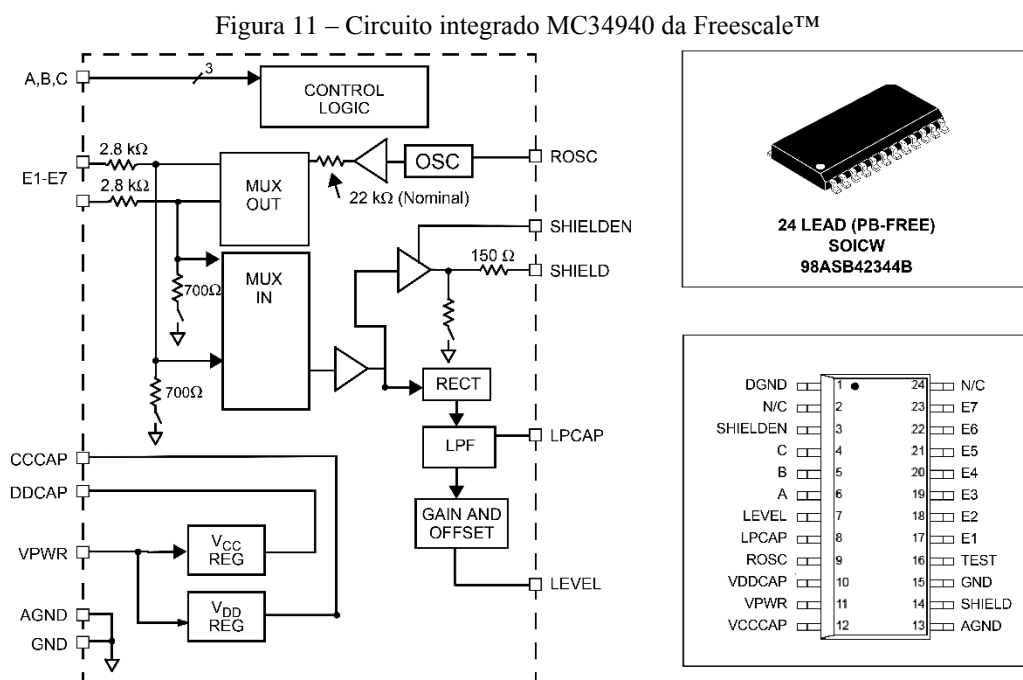


Fonte: Adaptado de Synaptics (2021)

Nessa condição, conforme mostrada na Figura 10, parte das linhas do campo elétrico são desviadas para a mão do operador do braço robótico, que passa agir como se fosse uma das placas de um capacitor de placas paralelas, conforme descrito no capítulo 3. Dessa forma, uma das placas do capacitor é formado pelo sensor receptor e a outra placa é a mão do operador. Nesse trabalho, as placas definidas como transmissor e receptor são constituídas de apenas um elemento físico, ou seja, apenas uma placa metálica que compõe o sensor capacitivo, age simultaneamente como transmissor e como receptor. O princípio de operação do sensor, funcionando com transmissor e como receptor ao mesmo tempo, é baseado no fato da placa do

sensor receber uma onda senoidal, proveniente de um dispositivo eletrônico que transmite e mede a intensidade e fase dessa onda transmitida. A presença da mão do operador sobre a face do sensor modifica o campo elétrico do meio que o circunda e altera a capacitância. Essa alteração da capacitância é mensurada por um circuito dedicado para esse propósito. Após o campo elétrico sofrer deformação e a capacitância medida sofrer alteração, o braço robótico responderá com um movimento proporcional. Portanto, um dos principais componentes utilizados para realização do trabalho proposto é o medidor de capacitância.

Para a medição da capacitância, foi utilizado nesse trabalho o circuito integrado MC34940 fabricado pela empresa Freescale Semiconductor. Trata-se de um circuito integrado dedicado para essa finalidade, possuindo entrada para sete sensores individuais sendo selecionáveis pela configuração de três pinos, usando um controle lógico na sua porta de seleção (A, B, C). Esse circuito integrado consegue fazer leitura de capacitâncias que variam de 10pF à 150pF, dependendo da forma construtiva do sensor e da taxa de amostragem do sinal. Na Figura 11, é possível observar a estrutura interna do dispositivo em questão, representado aqui como diagrama em blocos.



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

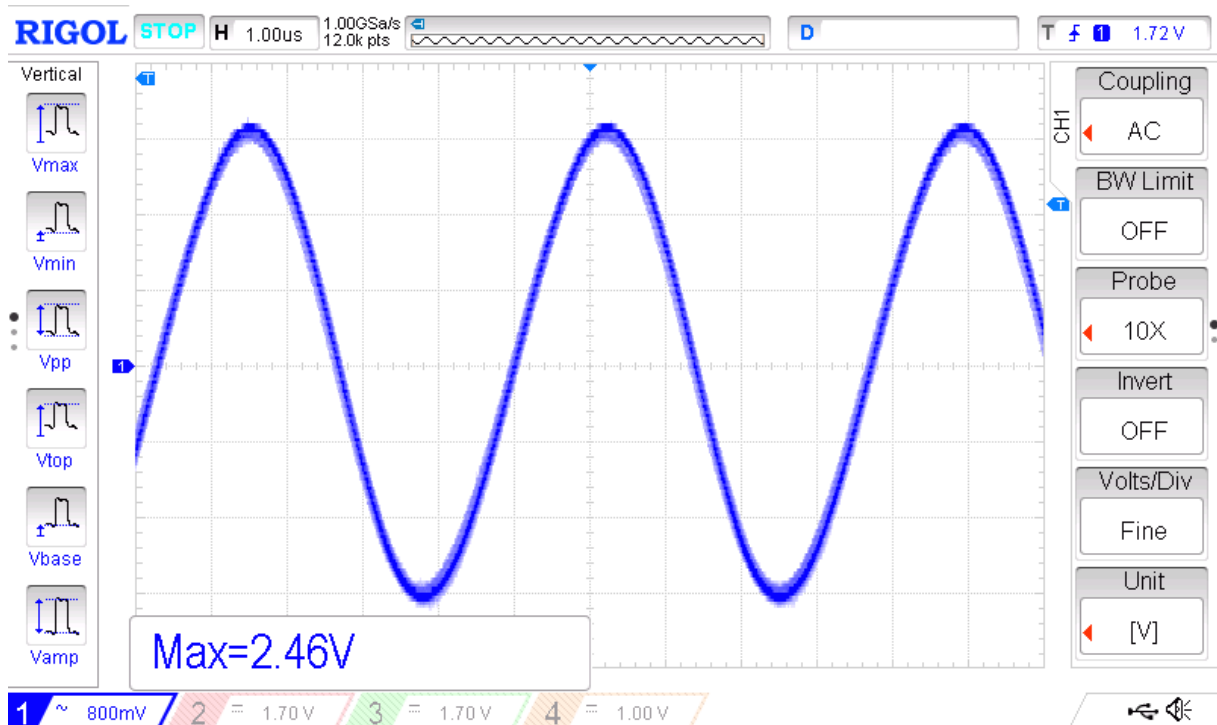
O MC34940 gera uma onda senoidal na face do sensor com tensão nominal pico-a-pico máximo de 5.0 V de amplitude, mas que pode sofrer variação em função da capacitância medida. Segundo informações do fabricante, a frequência padrão dessa onda é otimizada para

operar em 120 kHz, mas pode ser modificada através de um resistor externo conectado ao terminal (ROSC) do circuito integrado. Na aplicação desse trabalho optou-se por utilizar a frequência de 60 KHz, pois nessa frequência, apesar da sensibilidade do dispositivo ser menor, o dispositivo funcionou perfeitamente.

O circuito transmissor, fornecido por um circuito oscilador, fornece um estímulo elétrico para o sensor receptor e um circuito detector monitora variações no campo elétrico através da medição da capacitância do meio que o cerca. Embora existam no mercado, opções de sensores que possuem placas distintas para transmissão e medição do campo elétrico, com o propósito de medir capacitância, nessa aplicação em particular, o sensor receptor e o transmissor são formados pelo mesmo elemento, ou seja, o sensor empregado funciona como transmissor e como receptor simultaneamente.

Na Figura 12, é possível observar uma amostra da forma de onda gerada pelo oscilador interno do circuito integrado MC34940. Conforme será explicado no tópicos subsequentes, esse mesmo sinal é utilizado tanto para gerar o campo elétrico na face do sensor quanto na blindagem do mesmo, para bloquear interferências externas.

Figura 12 – Forma de onda gerada pelo oscilador interno do MC34940



Fonte: elaborada pelo autor

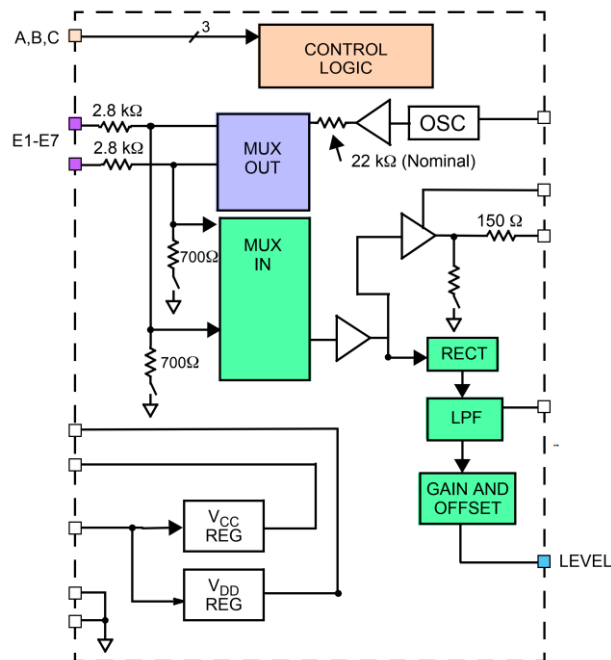
Observa-se pela Figura 12, que a tensão máxima da onda, no instante medido, é de 2,53 V, embora esse nível de tensão possa alcançar 5V. Essa mudança no valor de pico ocorre

por conta do efeito capacitivo presente na face do sensor. Ou seja, quanto maior a capacitância no sensor, menor será amplitude dessa onda transmitida pelo circuito integrado. É justamente pela variação de amplitude e da fase da onda que o circuito integrado MC34940 consegue medir a capacitância na face do sensor conectado à ele.

O circuito interno do MC34940 contempla um multiplexador (MUX) de saída (bloco MUX OUT) responsável por selecionar a entrada dos sensores ou eletrodos. Com esse multiplexador é possível selecionar até 7 sensores independentes que podem ser conectados aos terminais de entrada do dispositivo, nomeadas como E1 a E7. A seleção dessas entradas ocorre através do controle dos níveis lógicos nos terminais denominados de ABC do dispositivo que são os responsáveis pelo controle lógico da seleção dos sensores. Um segundo multiplexador receptor (bloco MUX IN) está conectado simultaneamente às entradas dos sensores e encaminha o sinal de cada sensor para um detector, que converte a onda senoidal recebida para um nível *Direct Current* (DC) (bloco RECT).

Na Figura 13 é exibido um diagrama em blocos mostrando a estrutura interna do circuito integrado em questão, destacando alguns blocos que foram mencionados.

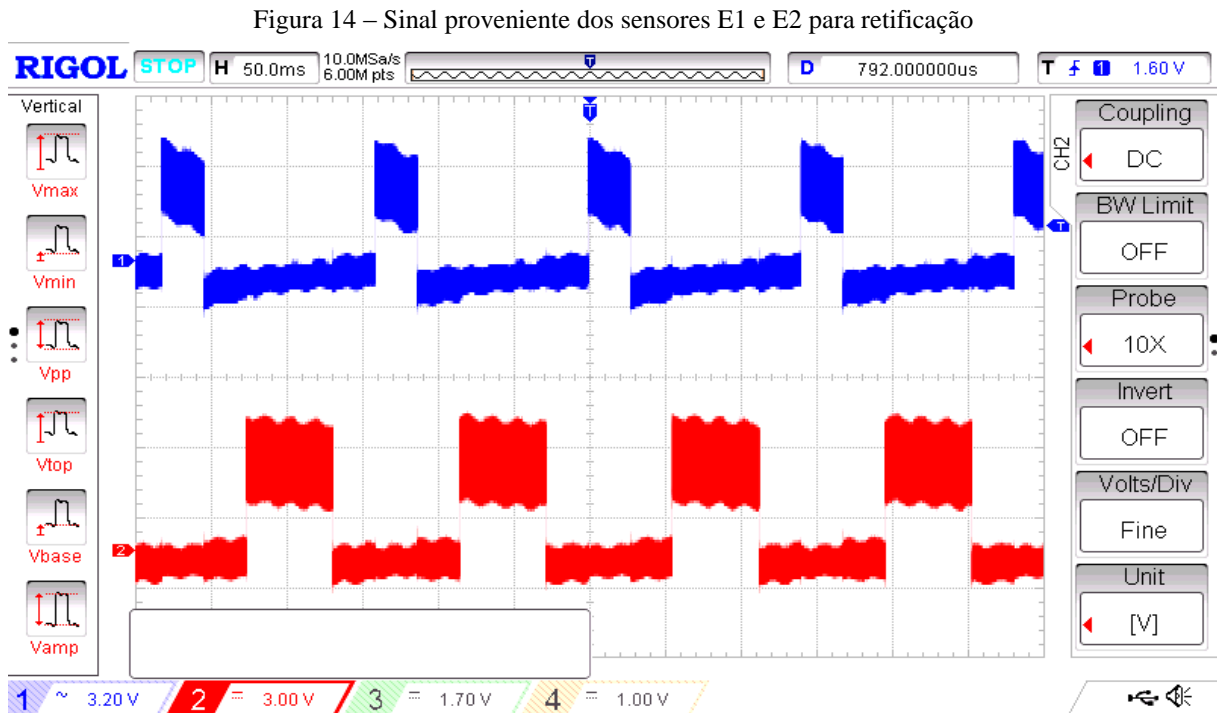
Figura 13 – Diagrama em blocos interno do MC34940



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Observando mais atentamente a Figura 13, observa-se que, se uma determinada entrada de sensor não estiver sendo selecionada pelo bloco de controle lógico, então ela será aterrada internamente pelos multiplexadores.

O sinal proveniente dos sensores será então, convertido em nível DC, ou seja, o sinal senoidal recebido pelo bloco MUX IN, será convertido em sinal de tensão contínua através do bloco RECT. Uma amostra desse sinal, após passar pela etapa RECT é exibido na Figura 14, obtidos a partir do terminal designado por LPCAP, sendo resultado da leitura de dois sensores distintos conectados nas entrada E1 e E2, respectivamente.



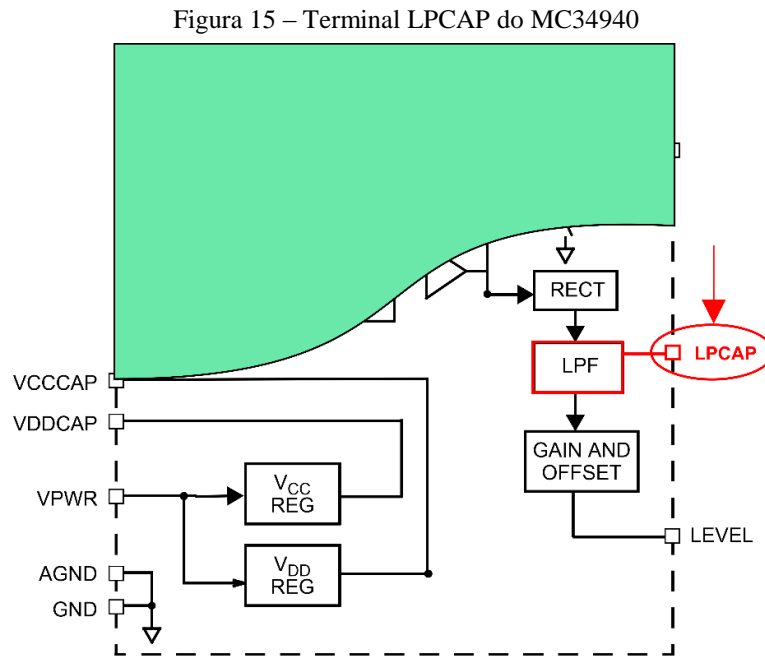
Fonte: elaborada pelo autor

Conforme pode ser observado na Figura 14, observando a primeira forma de onda com destaque em azul, esse sinal proveniente de um dos sensores, apresenta uma componente contínua, visto está deslocado positivamente em relação ao nível de referência. Deve ser observado que, a segunda forma de onda com destaque em vermelho presente no canal 2, apresenta o mesmo comportamento da primeira forma de onda, mas que foi deslocado verticalmente para baixo da tela para permitir a visualização simultânea das duas curvas.

Esse sinal, após passar pela etapa de retificação realizado pelo bloco RECT, será então, filtrado pelo bloco *low Pass Filter* (LPF). O bloco LPF consiste de um filtro passa baixa responsável por filtrar o sinal proveniente do bloco RECT e entregar para o bloco seguinte um sinal DC completamente limpo de ruídos e sem ondulação residual, também conhecido como *ripple*. Esse bloco é constituído de uma malha formada por um resistor e por um capacitor, sendo o resistor inserido internamente no momento a fabricação do componente e o capacitor pode ser conectado externamente através do pino 8 (LPCAP) do circuito integrado.



Na Figura 15, é exibido novamente a estrutura interna do circuito integrado destacando o terminal 8 (LPCAP).



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Dessa forma, esse filtro passa baixa é formado por um resistor interno não acessível e por um capacitor externo que pode ser conectado ao terminal LPCAP do dispositivo. O valor desse capacitor externo é selecionado para permitir que o projetista otimize a relação entre o ruído e o tempo de resposta do sistema.

Em seguida, o sinal proveniente do bloco LPF, que foi filtrado por um capacitor externo, entrará no próximo bloco denominado de GAIN AND OFFSET. Esse bloco é responsável por compensar internamente o sinal, para só então, ser amplificado para aumentar a sensibilidade do sensor. Essa compensação ocorre de forma a manter o valor mínimo do sinal na referência de 0V. Em seguida, esse sinal será amplificado, visto que ao sair do bloco LPF, apresenta um nível de tensão na ordem de grandeza de poucos milivolts. Portanto, nesse bloco o sinal sofrerá amplificação de forma que possa ser entregue ao terminal 7 (LEVEL) para ser medido por um microcontrolador. Portanto, de forma resumida, o sinal senoidal proveniente das entradas dos sensores selecionados pelos multiplexadores, é retificado, filtrado, compensado e amplificado para que possa ser medido pelo conversor analógico/digital do microcontrolador.

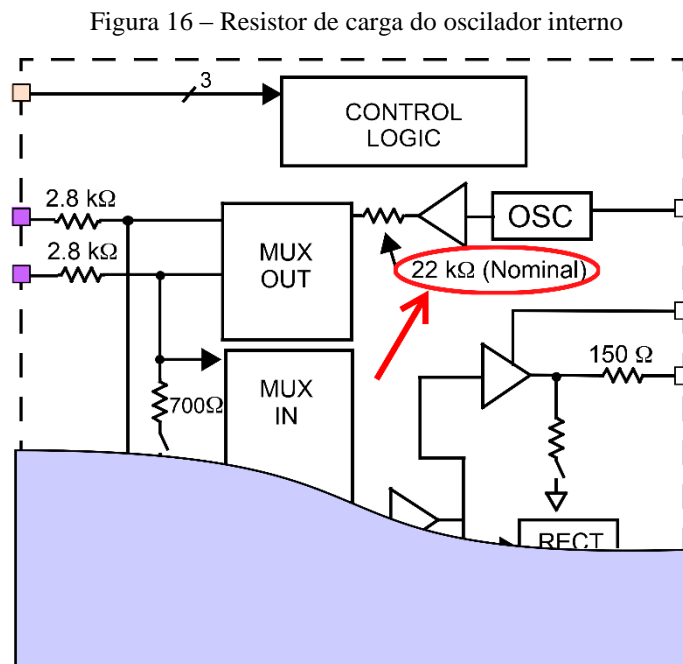
A onda senoidal, gerada pelo oscilador interno do dispositivo, terá sua amplitude e sua fase modificada por objetos próximos ao sensor selecionado. Dessa forma, um “capacitor”

é formado entre o sensor selecionado e o objeto próximo à ele. Dentro dessa analogia, tanto o sensor conectado à entrada do dispositivo quanto o objeto próximo ao sensor, funcionarão com “placas” desse capacitor fictício.

A tensão medida no terminal 7 (LEVEL) do MC34940 é uma função inversa da capacitância medida entre o sensor selecionado, os sensores circundantes e outros objetos no campo elétrico ao redor do sensor. Portanto, qualquer objeto que esteja próximo ao sensor, modificará o campo elétrico, aumentando a capacitância e resultando numa diminuição da tensão medida na saída do dispositivo.

A fonte geradora do campo elétrico, identificado na Figura 9 como “transmitter”, é fornecido pelo oscilador interno do MC34940. Esse campo elétrico, gerado e aplicado na placa do sensor, sofre influência de qualquer objeto que atravesse e “corte” suas linhas, modificando a capacitância medida. Entretanto, esse sinal senoidal, gerado pelo oscilador interno, antes de ser injetado no sensor, ele passa por um resistor, descrito pelo fabricante como, “resistor de carga”. De acordo com o fabricante, esse resistor interno possui o valor nominal de 22 k $\Omega$ , e foi escolhido para fornecer uma relação linear nas medidas de capacitância numa faixa de 10 pF a 150 pF com o oscilador interno operando à 120 KHz.

Na Figura 16 é exibido o diagrama em blocos funcional da estrutura interna do MC34940, destacando o resistor de carga conectado na saída do oscilador interno, antes de ser conectado aos terminais dos sensores.

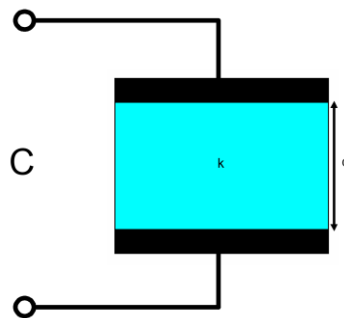


Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Após uma rápida explanação do funcionamento interno do circuito integrado usado nesse trabalho, responsável por realizar as leituras de capacitância, será descrito em seguida uma concepção teórica básica sobre o conceito de capacitância e como ela pode ser medida pelo circuito integrado MC34940 para ser aplicada no controle do braço robótico

Conforme já foi mencionado no Capítulo 3 e mostrado na Figura 17, um capacitor formado por duas placas planas e paralelas de área “A”, separadas por uma distância “d” e imerso em meio dielétrico de constante “k” é conhecido como capacitor de placas paralelas.

Figura 17 – Capacitor modelo de placas paralelas



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

O capacitor descrito na Figura 17, pode ser equacionado conforme descreve Halliday, Resnick e Walker (2013). Ou seja, a capacitância de um capacitor de placas paralelas pode ser definida de acordo com a Equação 7:

Equação 7 – Equação geral da capacitância de um capacitor de placas paralelas

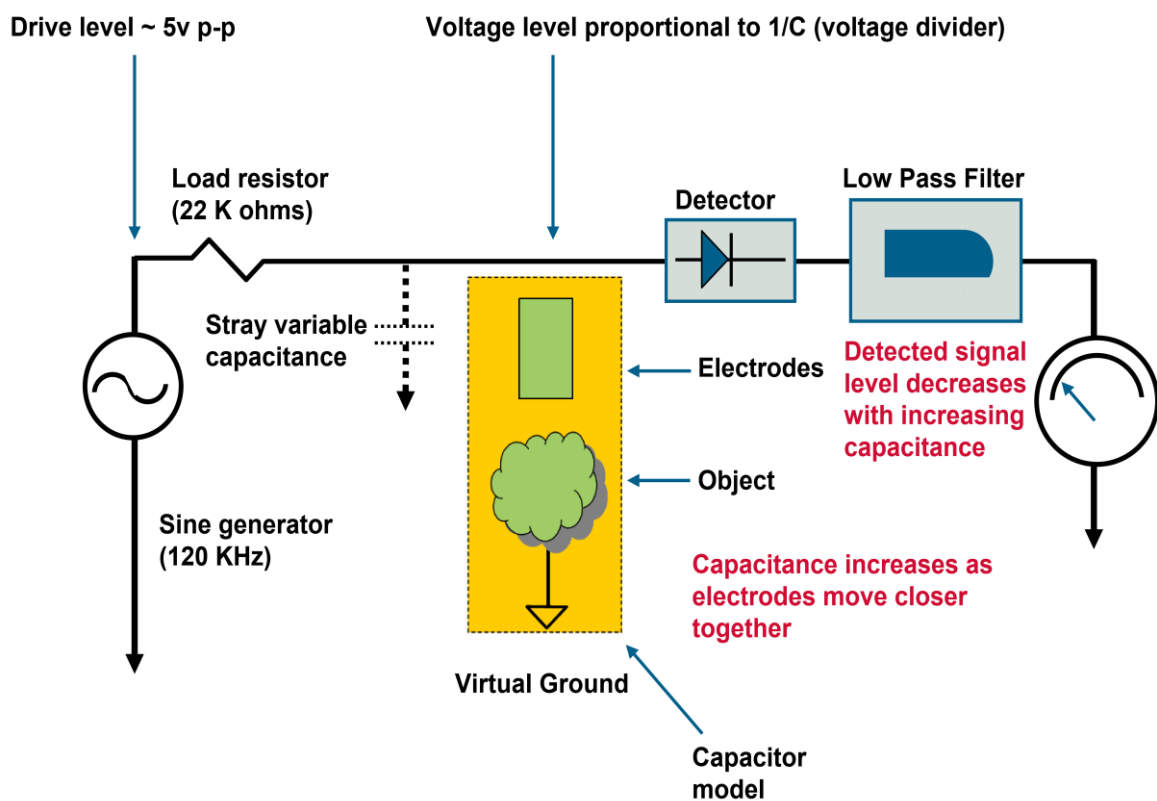
$$C = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$$

Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2013, p.109)

Assim, analisando a Equação 7, é possível perceber que a capacitância medida pelo circuito integrado MC34940 é proporcional a área dos sensores, diretamente proporcional à constante dielétrica do material e inversamente proporcional à distância entre a placa do sensor e o objeto próximo à ele. Como a área dos sensores nesse trabalho é constante, assim como a constante dielétrica do material usado na face superior do sensor, então, a única variável que se modifica é a distância entre as placas, ou melhor descrevendo, a distância entre a mão do operador e a face do sensor. No projeto em questão, uma das placas desse capacitor encontra-se numa base de madeira e a outra placa é a mão do usuário.

Portanto, de forma resumida, o princípio de funcionamento do manipulador robótico controlado por sensores capacitivos funciona da seguinte maneira: quando o usuário aproxima sua mão da face dos sensores, a capacitância aumenta e o circuito integrado MC34940 converte essa variação na capacitância para um nível de tensão que é medido pelo conversor analógico digital do microcontrolador e este atua sobre os servo motores deslocando o braço robótico até a posição desejada. A Figura 18 apresenta um diagrama conceitual exibindo uma abordagem visual dos conceitos e dos elementos mencionados.

Figura 18 – Diagrama em blocos conceitual



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Na Figura 18, é exibido uma representação dos elementos conceituais básicos necessários para realizar a medição de capacitância pelo circuito integrado MC34940. É possível perceber a fonte geradora de campo elétrico, que constitui o oscilador interno onde é gerado o sinal senoidal. Também é possível visualizar o resistor de carga conectado entre a fonte de sinal senoidal e o sensor. Os eletrodos simbolizam os sensores, o detector é o bloco retificador de sinal e por último, o filtro que condiciona o sinal para ser entregue no terminal de saída para ser medido pelo microcontrolador.

## 4.2 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado nesse trabalho foi o dsPIC30F4011 fabricado pela empresa Microchip no qual vários módulos internos foram utilizados para fazer a leitura dos sensores e controle dos braço robótico. Na Figura 19, é exibido a imagem do dsPIC30F4011 com encapsulamento 40-Pin PDIP (*Dual In-line Package*) usado neste trabalho.

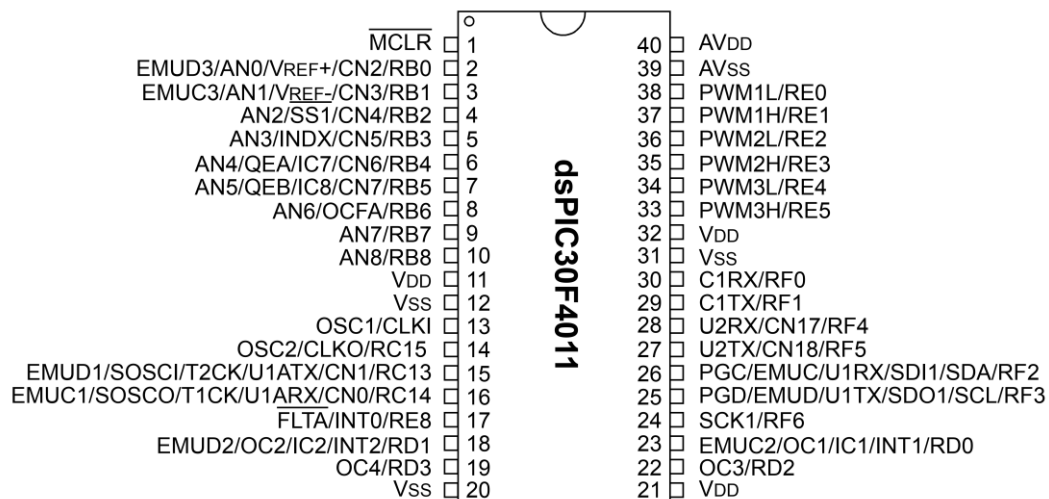
Figura 19 – Microcontrolador DsPIC30F4011



Fonte: Microchip.com (2010)

Na Figura 20, é possível visualizar a designação e todos os pinos do microcontrolador usado nesse trabalho.

Figura 20 – Descrição dos terminais do microcontrolador DsPIC30F4011



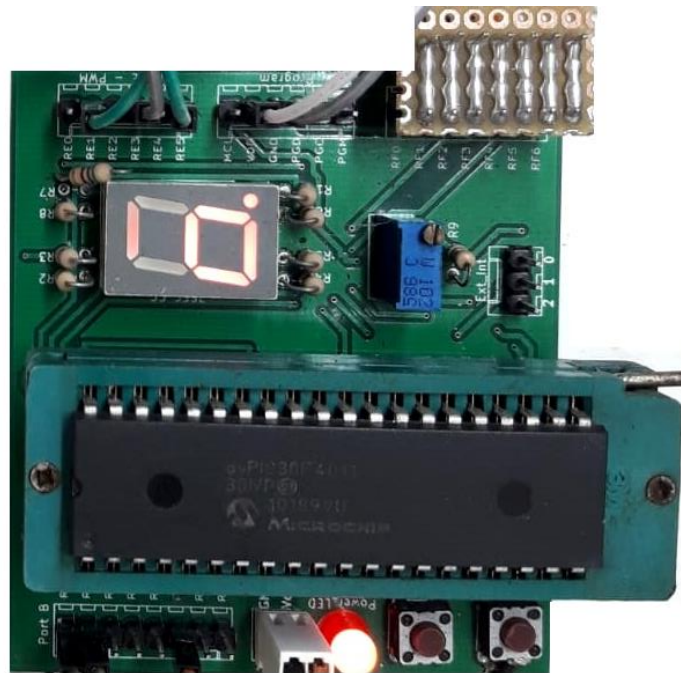
Fonte: Microchip (2010, p. 5)

O dsPIC30F4011 é um controlador digital de sinais (DSC) fabricado pela empresa Microchip. Ele é um poderoso dispositivo com arquitetura Harvard modificada com barramento

de dados de 16 bits que combina as vantagens de um microcontrolador (MCU) com processador digital de sinais (DSP). Várias aplicações permitem fazer uso desse dispositivo como por exemplo: controle de motores, conversão de potência, processamento de imagens em displays, controle de processos e comunicação com outros periféricos eletrônicos. Portanto, trata-se de um dispositivo versátil que apresenta características excepcionais com ampla aplicação em circuitos eletrônicos, inclusive na indústria.

Foi utilizado nesse trabalho uma placa de controle com o objetivo de realizar a programação e o desenvolvimento do projeto, facilitando assim, as conexões necessárias com outros dispositivos externos: motores, botões e sensores. Uma imagem da placa de controle pode ser visualizada na Figura 21:

Figura 21 – Placa de controle do microcontrolador DsPIC30F4011



Fonte: elaborada pelo autor

Como pode ser observado na Figura 21, foi utilizado um soquete de pinos torneado do tipo *zero input force* (ZIF) para facilitar as constantes retiradas do microcontrolador para realizar a gravação do *firmware* no dispositivo.

Deve ser observado que não é o objetivo desse trabalho explorar os vários periféricos que o dsPIC30F4011 disponibiliza, portanto, somente os módulos internos que foram utilizados nesse projeto é que serão alvo de discursão mais aprofundadas e serão apresentados nos subtópicos específicos desse trabalho.

### 4.3 Sensores

Para construção das placas que funcionaram como sensores, foram utilizados quatro pedaços de chapa de zinco galvanizado de 0,3mm de espessura. A escolha desse tipo de material reside no fato dele possuir alta durabilidade e resistência à oxidação. Todos os sensores foram igualmente cortados com dimensões de 15 cm de largura e 10 cm de comprimento, em seguida colados num bloco de madeira *Medium Density Fiberboard* (MDF) marítima de 10mm de espessura, que funcionou como base de sustentação para os sensores, conforme pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Fixação das placas na base de madeira



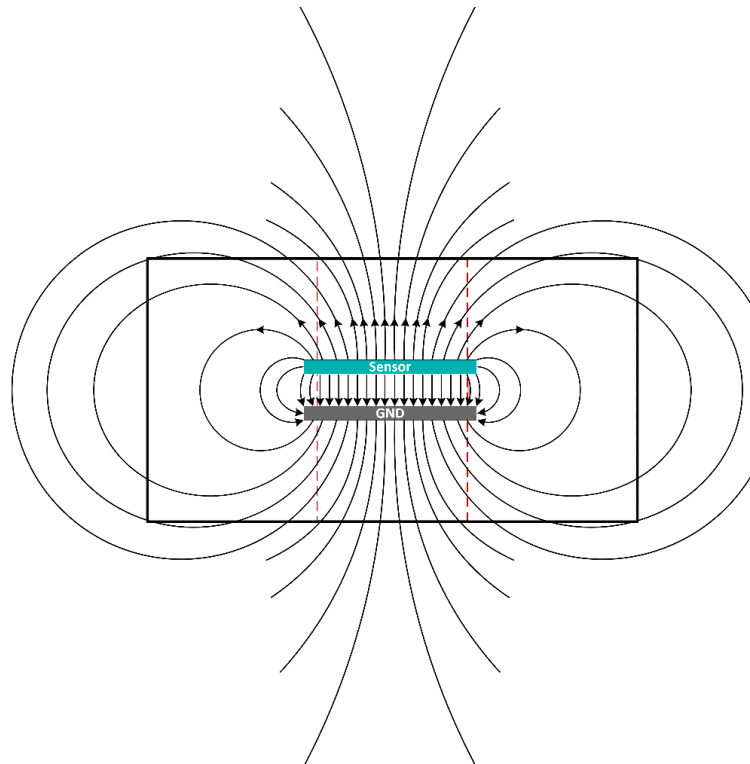
Fonte: elaborada pelo autor

Essa base de madeira possui as dimensões de 50 centímetros de largura por 50 centímetros de comprimento. Essas dimensões foram escolhidas para permitir a máxima sensibilidade dos sensores. Entretanto, dimensões de até 5 centímetros quadrados podem ser utilizadas para operar o braço robótico com total destreza. A alta rigidez mecânica desse tipo de madeira combinada com sua baixa constante dielétrica, quando comparada a outros materiais, foram cruciais para permitir o bom funcionamento dos sensores.

Um aspecto extremamente importante para uma correta operação dos sensores é que a capacitância na face superior dos sensores seja a maior possível e a capacitância na face inferior a menor possível. Entretanto, como o campo elétrico proveniente do sensor se dispersa em várias direções, tanto na face superior quanto na inferior do sensor, qualquer material que

se encontre atravessando essas linhas de campo, fará com que a capacitância seja aumentada, conforme pode ser observado na Figura 23:

Figura 23 – Dispersão das linhas de campo elétrico no sensor



Fonte: Adaptado de Texas Instruments Incorporated (2021)

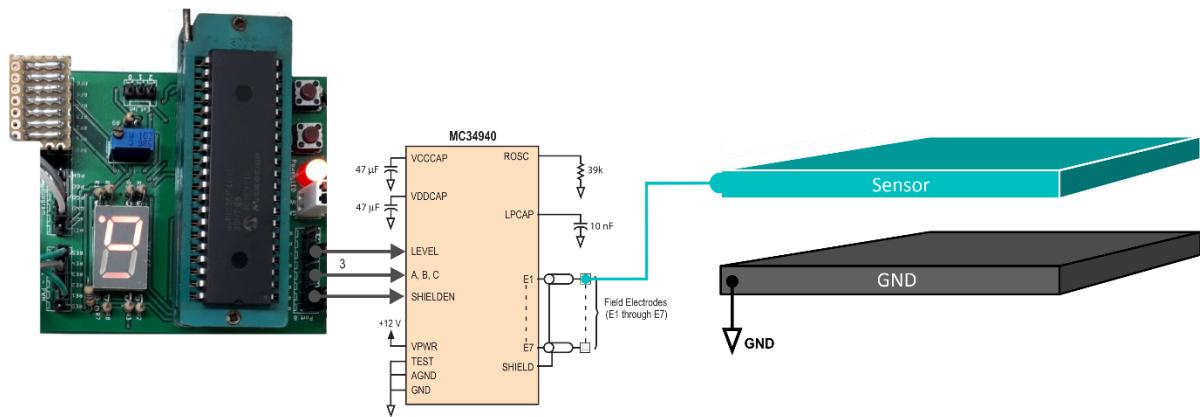
Deve ser observado que as linhas de campo, provenientes da placa do sensor, são fortemente atraídas pelo objeto posicionado na face inferior do sensor, sendo representado aqui, por outra placa, denominada de GND, que possui referência à terra, conforme mostra a Figura 23. Dito de outra forma, se um objeto estiver localizado na parte inferior do sensor, então esse objeto vai influenciar no valor de capacitância global do sistema, afetando assim, a sensibilidade do sensor na face superior do mesmo e isso representa um problema que precisa ser contornado, visto que a face superior do sensor é exatamente a face que perceberá a presença da mão do operador.

O motivo pelo qual a presença de um objeto posicionado na face inferior do sensor influencia na leitura da capacitância é por conta do referencial à terra que o circuito integrado medidor de capacitância usa para seu funcionamento.

Para exibir o que foi dito de forma visual, a Figura 24 mostra a conexão da placa de controle com circuito integrado medidor de capacitância e o sensor.



Figura 24 – Diagrama de conexões entre a placa de controle e o sensor

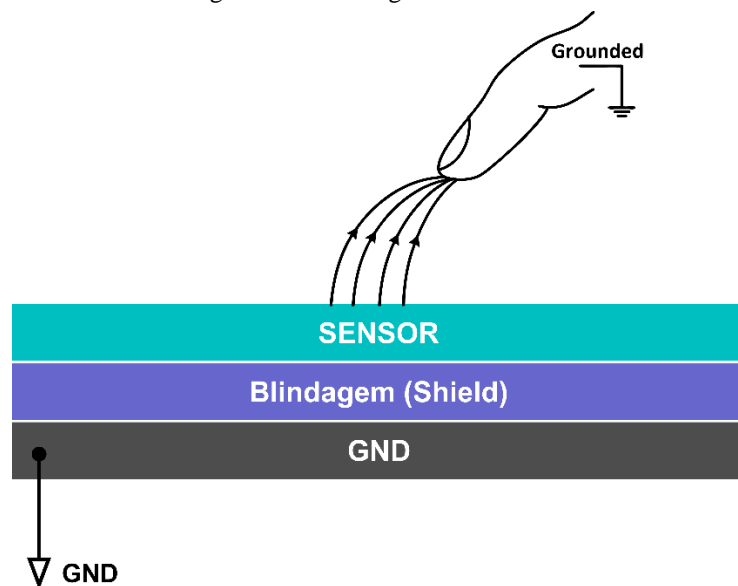


Fonte: elaborada pelo autor

Conforme pode ser observado à partir da Figura 24, a face inferior da sensor, composto pela base de madeira e representado aqui como uma placa denominada GND, age como se fosse um ponto de referência à terra. Observa-se que, tanto a placa de controle, quanto o circuito integrado MC34940, usam o mesmo referencial à terra que o sensor. Como resultado, a presença da base de madeira provoca uma variação na capacitância comprometendo a sensibilidade na face superior do sensor.

Uma maneira de mitigar esse problema é inserir alguma barreira eletrostática, ou simplesmente uma blindagem (*shield*), que impeça o sensor de “sentir” qualquer objeto posicionado abaixo dele. A Figura 25 exemplifica esse conceito de blindagem eletrostática, a qual é inserida entre o sensor e a referência posicionada abaixo da blindagem.

Figura 25 – Blindagem eletrostática

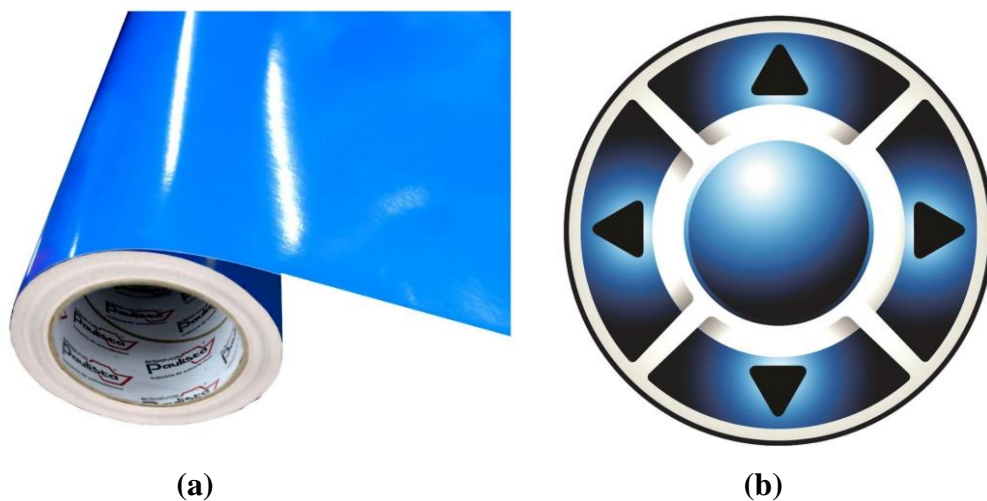


Fonte: Adaptado de Texas Instruments Incorporated (2021)

Portanto, uma vez inserido essa blindagem, conforme mostra a Figura 25, qualquer objeto que esteja posicionado abaixo do sensor, não modificará as linhas de campo elétrico gerados pelo sensor, conseqüentemente, não modificará o valor da capacitância medida pelo sensor. Uma abordagem mais detalhada será realizada no subcapítulo referente à blindagem, que será abordada na sequência.

Voltando à questão sobre manter a sensibilidade na face superior do sensor maior que a face inferior, foi adotada a estratégia de aumentar a constante dielétrica sobre o sensor. Para isso, um molde de vinil foi fixado sobre a face superior dos sensores, aumentando a constante dielétrica do meio, elevando assim, a sensibilidade de cada sensor. O adesivo em vinil, normalmente utilizado para fazer impressão em plotters, é vendido geralmente em m<sup>2</sup> e largamente utilizado por empresas serigráficas. Na figura 26(a) é possível observar o adesivo vinil usado para cobrir a face superior dos sensores e na Figura 26(b) é apresentado o vinil impresso numa impressora plotter com uma imagem mostrando a localização dos sensores.

Figura 26 – Vinil de impressão e base dos sensores impresso



Fonte: Triângulo Screen (2021)

Como já foi mencionado, a base que comporta os quatro sensores foi construída de madeira MDF, e o fato desse tipo de madeira apresentar um pequeno valor de constante dielétrica, associado à presença da blindagem eletrostática, fez com que a capacitância na face inferior do sensor se apresentasse com valor reduzido, diminuindo portanto, sua influência na medição da capacitância total em torno do sensor. Esse fato proporcionou um aumento na sensibilidade na detecção da mão do operador, pois pequenas variações na capacitância pode ser detectada, mesmo que a mão do operador estivesse afastada. Quando foi utilizado outro tipo de material como base para os sensores, como por exemplo, PVC, a capacitância total aumentou

consideravelmente e dessa forma, afetou a sensibilidade final do sistema, visto que nesse caso, era necessário o operador aproximar bastante a mão do sensor, comprometendo os movimentos do braço robótico.

Na Figura 27(a), é exibida a montagem e fixação das placas dos sensores no bloco de madeira e na Figura 27(b) é apresentado a base dos sensores completamente montada.

Figura 27 – Montagem dos sensores e figura impressa para cobertura

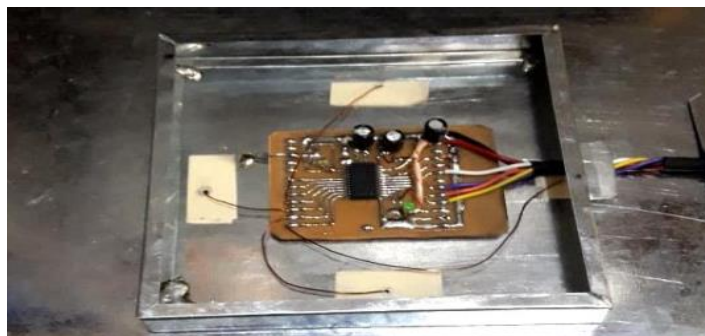


Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se à partir da Figura 27(b), que sobre a base dos sensores foi utilizado uma figura impressa em formato de joystick dando aos sensores uma aparência estética semelhante à um controle. Com a sensibilidade aumentada por conta da presença do molde de vinil, o usuário poderá manusear o braço robótico com sua mão à partir de uma distância maior. Outra função do molde é manter os sensores presos à superfície da base de madeira.

Para conectar cada sensor ao circuito integrado responsável pela medição de capacitância, foram usados condutores de cobre esmaltado com diâmetro de 28 *American Wire Gauge* (AWG). A Figura 28 mostra o circuito integrado MC34940, posicionado na parte inferior da base de madeira, e os fios que conectam os sensores.

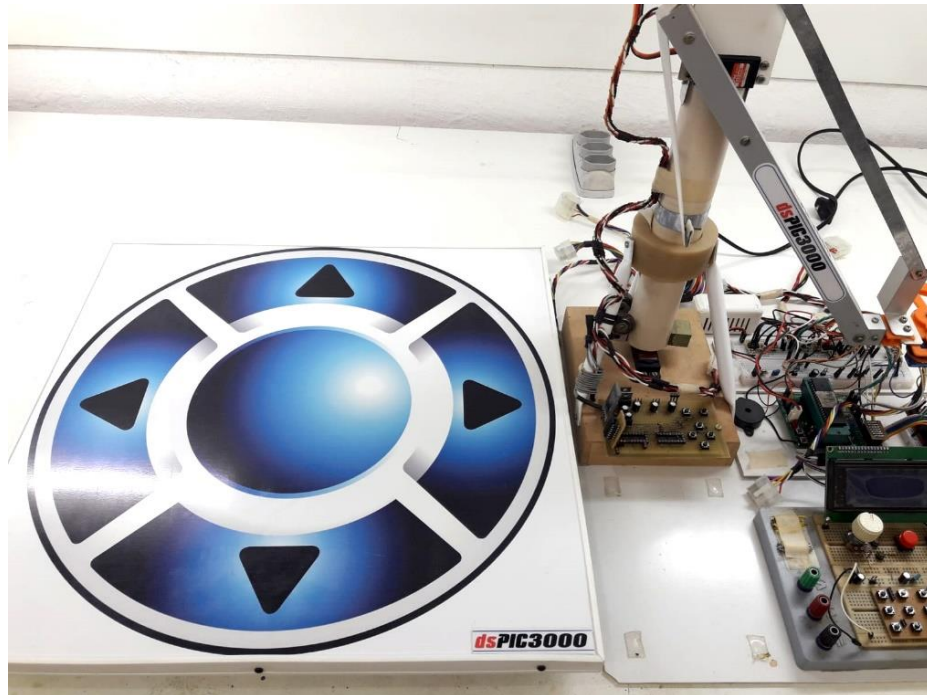
Figura 28 – Fios de conexão dos sensores com o MC34940



Fonte: elaborada pelo autor

O propósito desses condutores é realizar a conexão entre cada sensor e sua respectiva entrada no circuito integrado MC34940 sem causar interferência na medição da capacitância. Foi observado que ao fazer conexões com fios comuns, o valor da capacitância sofria variações nas leituras. Na Figura 26 é possível observar a base dos sensores completamente montada e posicionada ao lado do braço robótico.

Figura 29 – Sensor montado

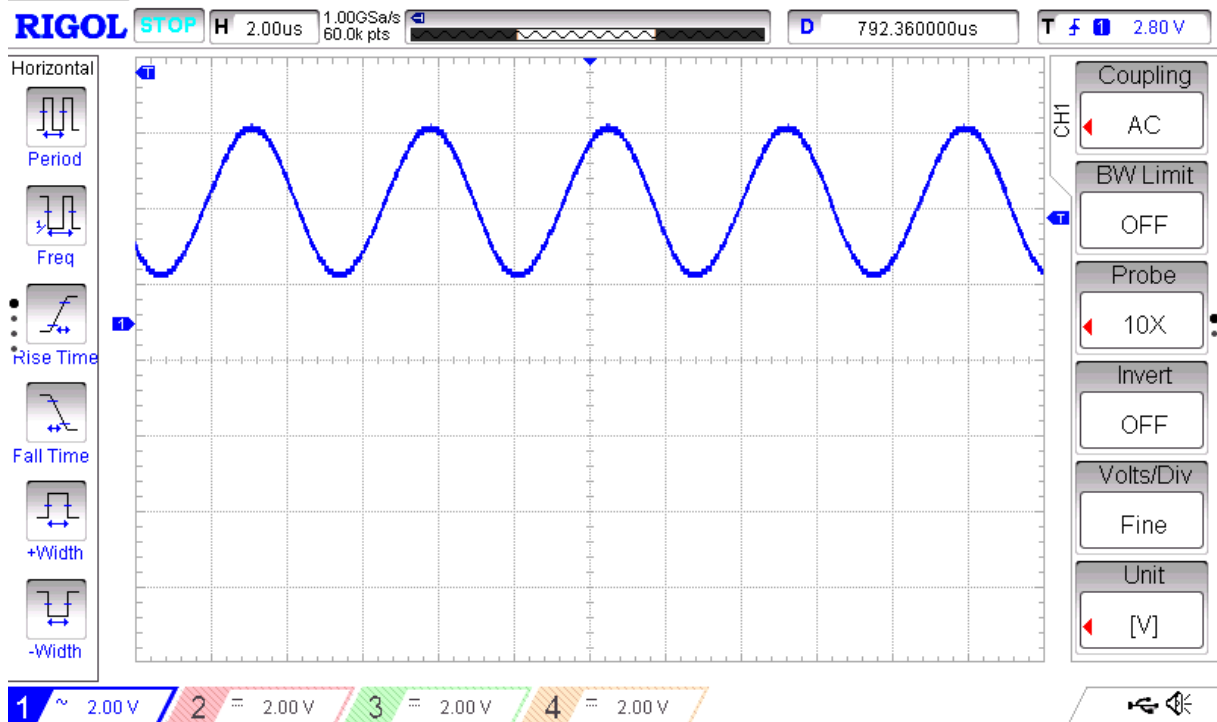


Fonte: elaborada pelo autor

Deve-se observar que foi necessário fazer uma separação mínima de 10mm entre cada sensor para que a medição de capacitância ocorresse de forma precisa. Foi observado que, quando os sensores ficavam muito próximos dos seus vizinhos, as leituras das capacitâncias mostravam-se errôneas. Seria possível reduzir a distância entre os sensores desde que o tempo de comutação entre os sensores fosse elevado para 2,5ms ou mais. Para tempos de comutação entre os sensores inferiores à 1ms exigiram que os sensores posicionados lado a lado fosse afastados para uma distância superior a 15mm de forma a manter a sensibilidade elevada. Nesse trabalho foi utilizado o tempo de comutação entre os sensores no valor de 1ms.

Nas figuras que se seguem são exibidos as curvas dos sinais presentes nos quatro sensores usados. Na Figura 30, é possível observar o sinal senoidal presente no sensor responsável por movimentar o braço robótico na direção vertical para cima.

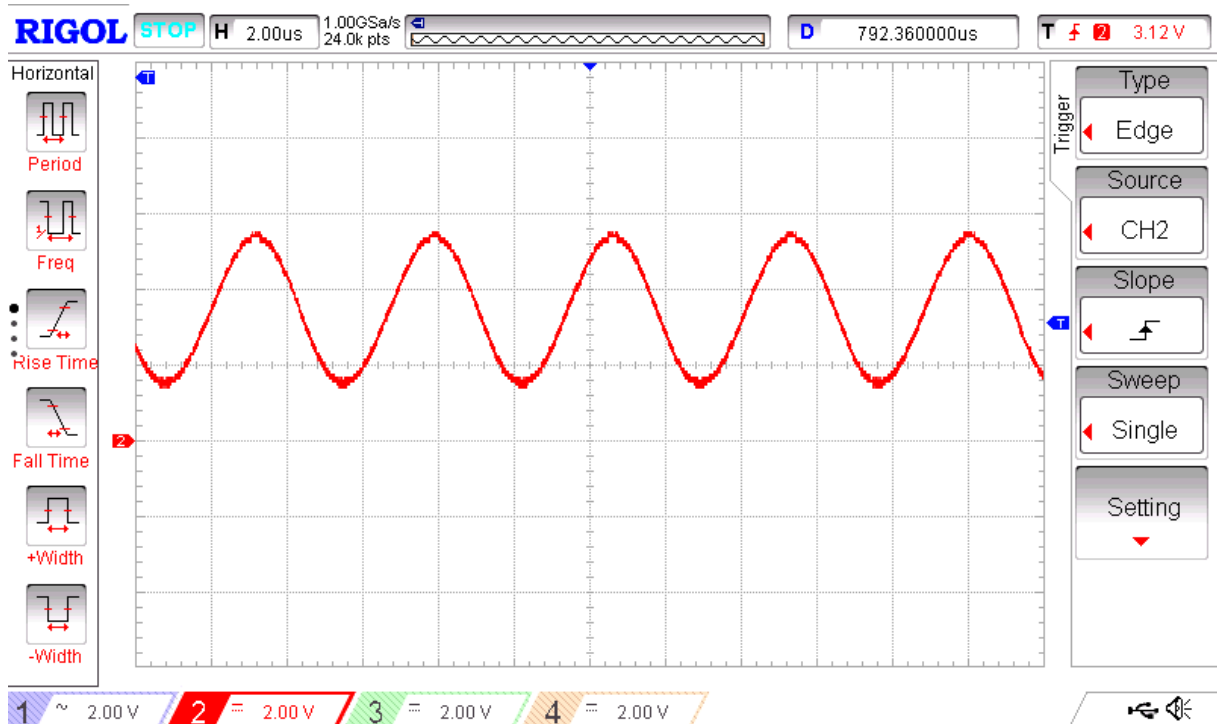
Figura 30 – Forma de onda do sensor superior



Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 31, é possível observar o sinal senoidal presente no sensor responsável por movimentar o braço robótico na direção horizontal para direita.

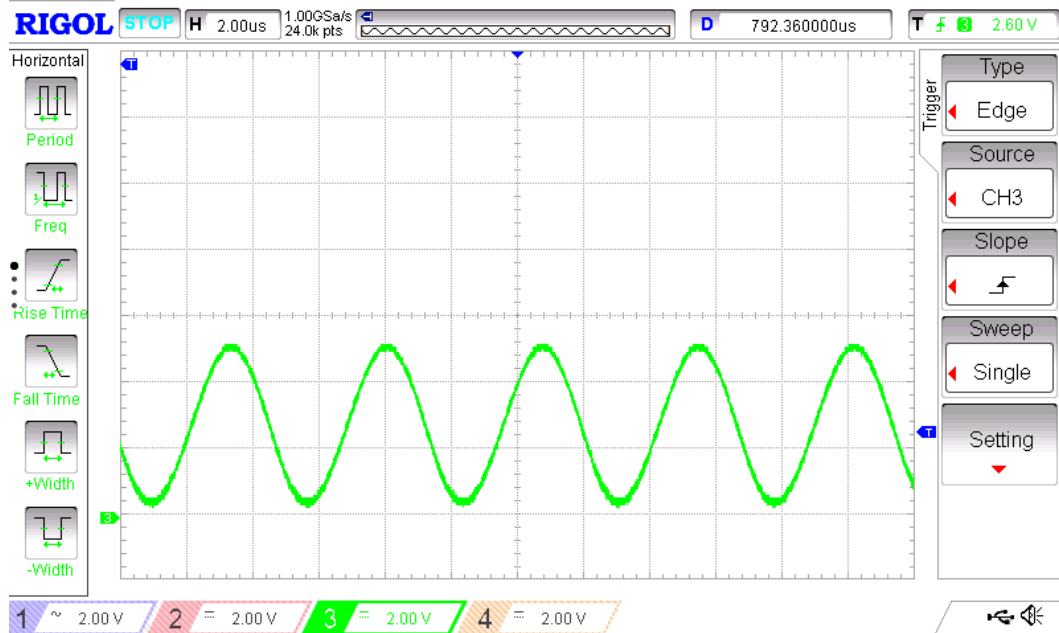
Figura 31 – Forma de onda do sensor lateral direita



Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 32, é possível observar o sinal senoidal presente no sensor responsável por movimentar o braço robótico na direção vertical para baixo.

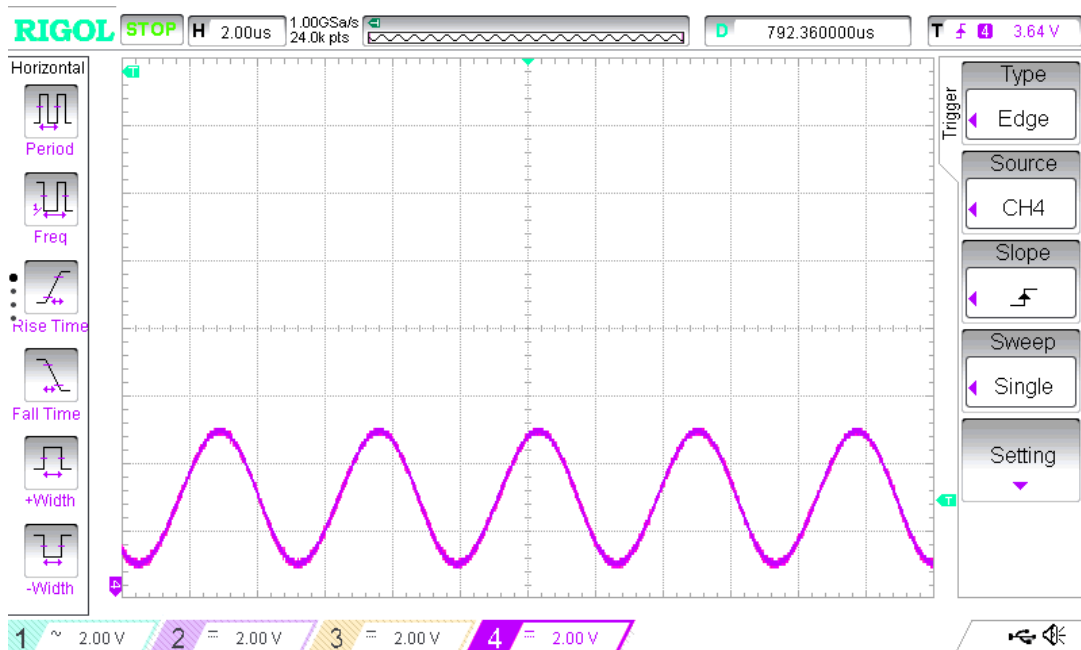
Figura 32 – Forma de onda do sensor inferior



Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 33, é possível observar o sinal senoidal presente no sensor responsável por movimentar o braço robótico na direção horizontal para esquerda.

Figura 33 – Forma de onda do sensor lateral esquerda



Fonte: elaborada pelo autor

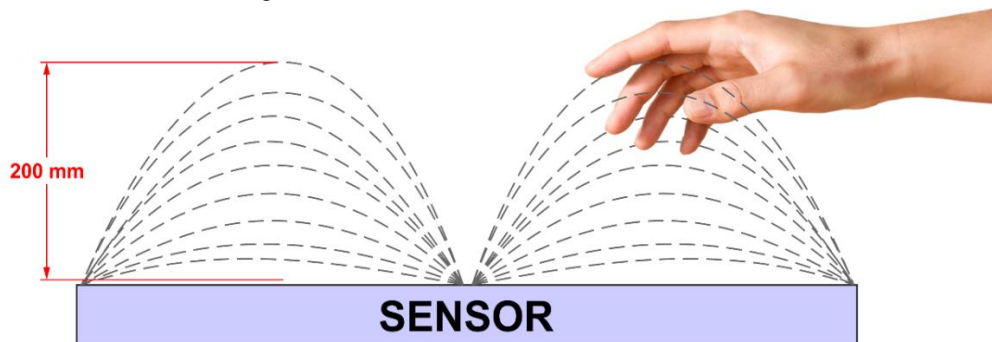


Não foi possível exibir as quatro curvas numa mesma tela do osciloscópio de forma simultânea, pois, ao conectar as quatro pontas de prova do osciloscópio no dispositivo, este apresentou problemas na formação das formas de onda. Isso ocorreu devido à presença de elevada capacitância das pontas de prova, afetando as medições e deformando as formas de onda.

#### 4.4 Sensibilidade

Os testes de operação revelaram que é possível controlar o braço robótico com a mão posicionada até 20cm da face dos sensores. Distâncias maiores podem ser alcançadas aumentando a área dos sensores ou utilizando outros tipos de dielétricos posicionados na face superior dos sensores de forma a aumentar a constante dielétrica e conseqüentemente a sensibilidade dos sensores. A Figura 34 exibe a vista lateral da base dos sensores com uma visualização teórica das linhas de campo elétrico e a distância máxima em que o sensor consegue detectar a mão do operador.

Figura 34 – Distância máxima dos sensores

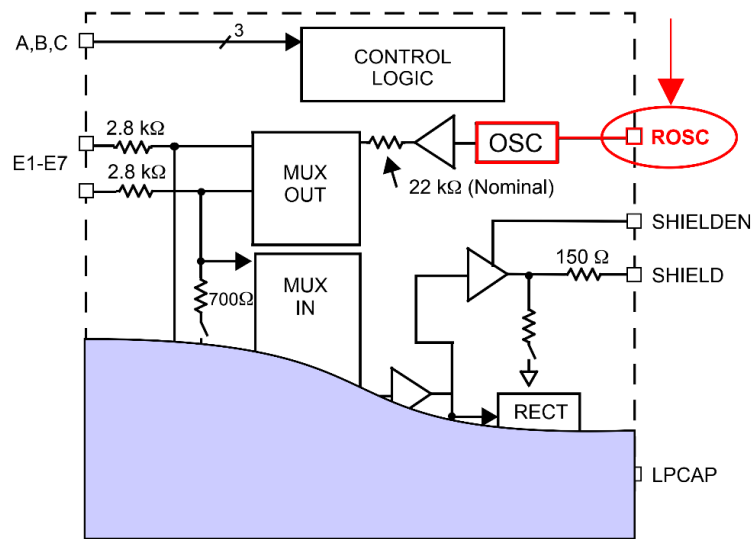


Fonte: elaborada pelo autor

Outra maneira de aumentar a sensibilidade de detecção dos sensores é modificando a frequência de operação do circuito integrado MC34940 o qual permite operar em até três frequências distintas. Por padrão, a frequência de operação do dispositivo é ajustada para 120KHz. Mas o dispositivo foi projetado para trabalhar em frequência de 60 KHz ou 240 KHz para aplicações que envolvam necessidades específicas. Nesse trabalho, a frequência de operação foi ajustada para 60 KHz.

Para ajustar frequência de operação do dispositivo é necessário modificar o valor da resistência conectada no pino ROSC do MC34940. A Figura 35 exibe o diagrama interno do CI mostrando que o pino ROSC está conectado internamente ao oscilador do dispositivo.

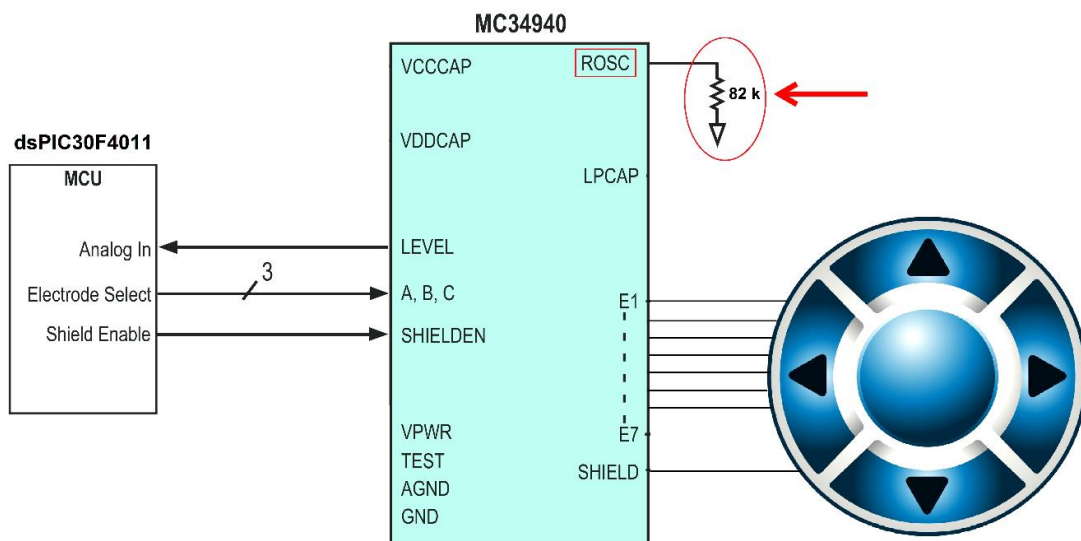
Figura 35 – Pino ROSC do MC34940



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Valores típicos do resistor conectado ao pino ROSC podem variar de  $20k\Omega$  até  $82k\Omega$ . Esse resistor é referenciado ao terra (*ground*) da alimentação do circuito integrado e através dele é possível determinar a frequência de operação do oscilador interno. Se a aplicação exigir grandes variações de capacitância com pouca sensibilidade dos sensores, então, segundo os dados do fabricante, o resistor adequado à ser inserido no pino ROSC deve ser no valor de  $82k\Omega$ . Nesse caso, a frequência de operação do dispositivo fica sendo  $60kHz$ , permitindo realizar leituras de capacitância de até  $150\text{ pF}$ , mas com sensibilidade comprometida. Esse foi o valor de resistor usado nesse trabalho, conforme pode ser observado na Figura 36:

Figura 36 – Resistor usado para ajuste de sensibilidade



Fonte: elaborada pelo autor



Do contrário, caso aplicação do usuário exija uma grande sensibilidade, então deve-se usar o valor de  $20k\Omega$  para o resistor conectado no pino ROOSC. Portanto, é possível aumentar a sensibilidade de operação dos sensores reduzindo o valor do resistor conectado ao pino ROOSC, mas diminuindo o valor máximo de capacitância que pode ser medido pelo dispositivo.

A Tabela 1 foi extraída do *data sheet* do fabricante, na qual é possível observar a correlação entre o valor do resistor usado para ajuste da sensibilidade do circuito integrado e o valor da frequência de operação do oscilador do dispositivo.

Tabela 1 – Dados do oscilador do MC34940

OSC Frequency Stability	$f_{STAB}$	–	–	10	%
OSC Center Frequency	$f_{OSC}$				kHz
ROSC = 39 k $\Omega$		–	120	–	
ROSC = 20 k $\Omega$		–	240	–	
ROSC = 82 k $\Omega$		–	60	–	

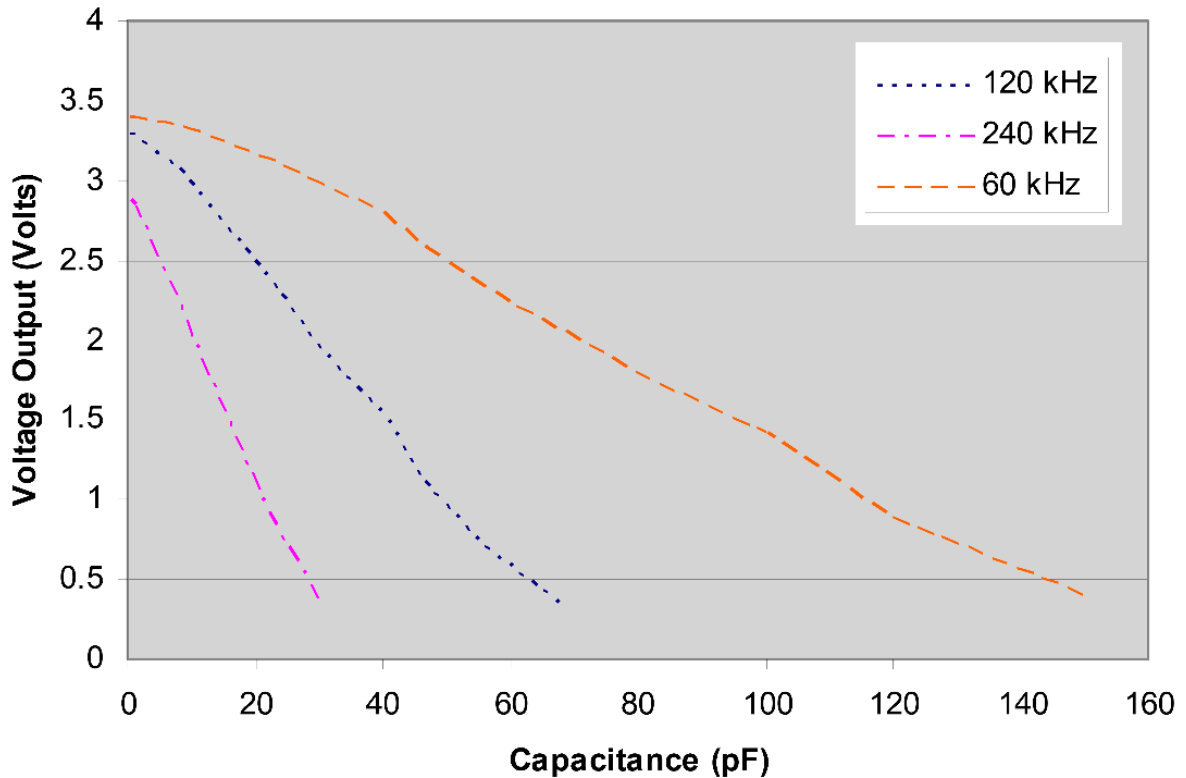
Fonte: Freescale Semiconductor (2006)

Foram realizados testes de bancada utilizando resistor no valor de  $33k\Omega$ , tornando possível a operação dos sensores com total funcionalidade em distâncias de até 30cm entre a mão do operador a face do sensor. Foi adotado o valor de  $82k\Omega$  para o resistor ROOSC nesse trabalho, pois com esse valor de resistência já foi possível ter um sensor completamente operacional, sendo portanto, suficiente a distância alcançada de 20 cm para os propósitos desejados. Deve-se observar que fabricante recomenda utilizar resistores de no máximo 5% de tolerância para obter um bom desempenho do dispositivo. Todos os resistores utilizados nesse trabalho, são de filme espesso em *Surface Mounted Device* (SMD) com tolerância de 1%.

O Gráfico 1 foi extraído do *data sheet* do fabricante e mostra a relação entre a capacitância máxima que pode ser medida com o dispositivo em cada sensor e a tensão de saída no terminal 7 (LEVEL), em função da frequência de operação do oscilador interno. Observa-se que para baixas frequências (60 kHz) de operação do oscilador, é necessário uma grande variação na capacitância medida para haver uma variação correspondente no nível de tensão da saída, havendo nesse caso, uma significativa perda de sensibilidade do sensor.

Por outro lado, quando se opera com o valor máximo da frequência de operação do oscilador (240 kHz), para pequenas variações na capacitância há uma grande variação no nível de tensão na saída do dispositivo, caracterizando um notável aumento de sensibilidade do sensor. Operar o dispositivo em frequência máxima é recomendado quando se utiliza sensores de pequenas dimensões.

Gráfico 1 – Gráfico tensão de capacitância



Fonte: Freescale Semiconductor (2006)

Nesse trabalho foi adotado o valor de 60 kHz para frequência de operação do oscilador, ou seja, o dispositivo está trabalhando na menor sensibilidade possível, mas que atende perfeitamente para o propósito do projeto. Lembrando que a tensão de saída apresenta uma relação inversa em relação à capacitância medida no sensor.

Outra possibilidade de incrementar a sensibilidade dos sensores é aumentando o nível de tensão nos sensores. O dispositivo MC34940 permite um nível de tensão máximo nos sensores no valor de 8V, conforme pode ser observado na Tabela 2 extraído do *data sheet* do fabricante.

Tabela 2 – Nível de tensão de saída nos sensores em relação à capacitância medida

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Total Variance Between Electrode Measurements <sup>(5)</sup> All C <sub>LOAD</sub> = 15 pF	ELV <sub>VAR</sub>	-	-	3.0	%
Electrode Maximum Harmonic Level Below Fundamental <sup>(5)</sup> 5.0 pF ≤ C <sub>LOAD</sub> ≤ 150 pF	EL <sub>HARM</sub>	-	-20	-	dB
Electrode Transmit Output Range 5.0 pF ≤ C <sub>LOAD</sub> ≤ 150 pF	EL <sub>TXV</sub>	1.0	-	8.0	V
Receive Input Voltage Range	RX <sub>V</sub>	0	-	9.0	V
Grounding Switch on Voltage <sup>(6)</sup> I <sub>SW</sub> = 1.0 mA	SW <sub>VON</sub>	-	-	5.0	V

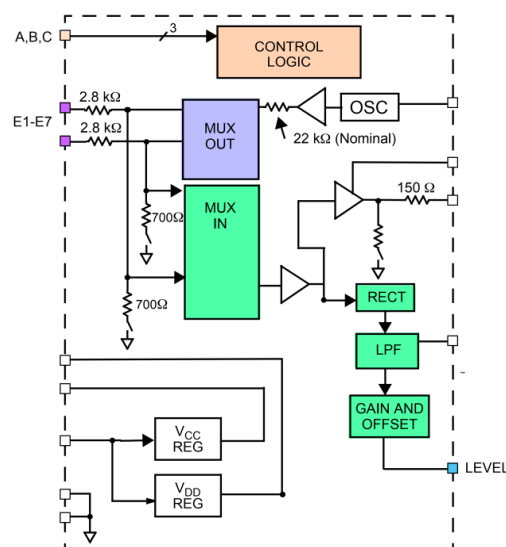
Fonte: Freescale Semiconductor (2006, p. 4)

Para aumentar o nível de tensão dos sensores pode-se utilizar drives de entrada e de saída conectados em antiparalelo com um nível de tensão superior à do dispositivo, realizando o devido condicionamento do sinal de entrada, permitindo assim, que os sensores recebam uma carga elétrica maior e portanto, aumentando o campo eletrostático do meio que circunda o sensor. Esse aumento do campo eletrostático pode alcançar distâncias maiores, aumentando assim, a capacidade de detecção dos sensores. Esses drives podem ser implementados através de amplificadores operacionais, cujo valor de capacitância de entrada seja baixa, como por exemplo, os fabricados com tecnologia *Junction Field Effect Transistor* (JFET), que possuem capacitância de entrada bastante reduzida. Como a topologia padrão disponibilizada pelo fabricante já foi suficiente para operação adequada do dispositivo, essa opção não foi concebida no projeto desse trabalho, mas está sendo proposto aqui, como possibilidade para pesquisas futuras.

#### 4.5 Tempo de resposta

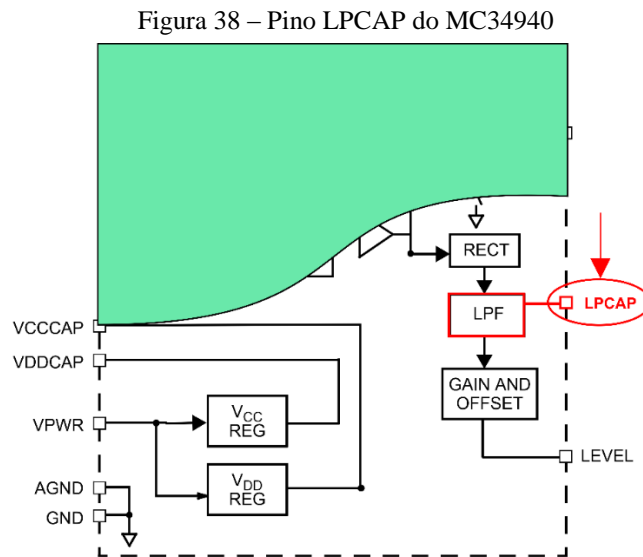
O tempo de resposta do dispositivo MC34940 é outro fator que impacta diretamente na sensibilidade do sistema. O valor de tensão correspondente ao sinal, proveniente do sensor selecionado, passa através de um MUX interno e é disponibilizado para que possa ser lido por um conversor analógico/digital no terminal (LEVEL) do dispositivo. Esse nível de tensão é na verdade um sinal de onda senoidal retificado proveniente da malha RC formada por um resistor interno e por um capacitor externo. Na Figura 37, é exibido um diagrama em blocos mostrando a estrutura interna do circuito integrado em questão, destacando alguns blocos que foram mencionados.

Figura 37 – Diagrama em blocos interno do MC34940



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Entretanto, antes desse sinal ser lido no pino LEVEL, ele é inicialmente retificado e filtrado por um circuito composto por um filtro passa baixa LPF. Esse filtro é formado por um resistor interno e por um capacitor externo conectado no pino LPCAP do dispositivo. A Figura 38 exibe esse pino no diagrama em blocos do dispositivo.



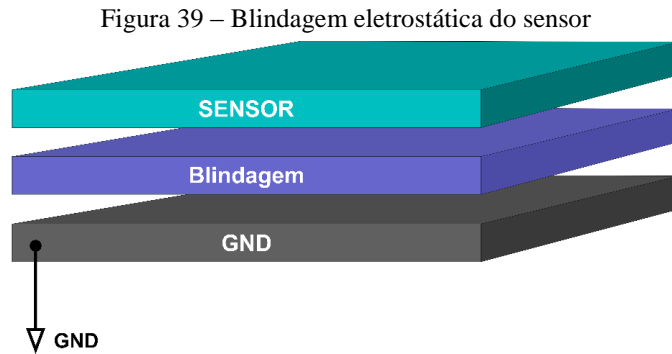
Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

O valor desse capacitor externo é selecionado para permitir que o projetista otimize a relação entre o ruído e o tempo de resposta. Um valor típico para esse capacitor é no valor de 10 nF, que em termos práticos oferece um tempo de resposta de aproximadamente 2,5 ms, de acordo com os dados do fabricante. Caso seja necessário diminuir o tempo de resposta, então pode ser usado um capacitor de 1 nF, que irá fornecer um tempo de resposta no valor de 500 us. Tempos de respostas menores aumentam a sensibilidade do sensor mas o ruído cresce de forma proporcional. Nesse trabalho, usando os sensores nas dimensões já citadas, optou-se por utilizar um capacitor cerâmico de 10 nF no terminal LPCAP. Com esse valor de capacitor, foi possível obter excelentes resultados com relação à sensibilidade. Mas, caso seja utilizado sensores menores, que necessitem um aumento de sensibilidade, ou deseje-se arbitrariamente obter um alcance maior dos sensores, independente da suas dimensões, pode-se reduzir o valor desse capacitor de forma a aumentar a sensibilidade do sistema.

#### 4.6 Blindagem

Foi inserida uma blindagem em toda superfície inferior da base dos sensores para que apenas a face superior dos sensores fosse capaz de detectar a mão do usuário. Com a

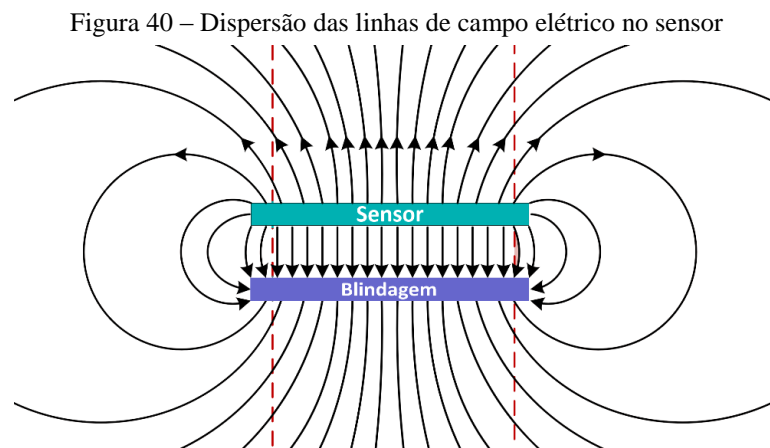
remoção dessa blindagem, os sensores captavam a capacitância parasita de todos os objetos próximos a ele, reduzindo drasticamente sua sensibilidade. Na Figura 39, é exibido o conceito empregado para bloquear qualquer interferência externa através do uso de uma blindagem eletrostática.



Fonte: elaborada pelo autor

Pela Figura 39, é possível observar que qualquer objeto localizado abaixo do sensor, provoca uma elevação da capacitância geral do sistema, reduzindo consideravelmente sua sensibilidade para detectar qualquer objeto na face superior do mesmo. Entretanto, ao inserir uma blindagem entre o objeto e o sensor, é possível bloquear qualquer interferência desse objeto na leitura da capacitância do sensor. Dessa forma, o campo elétrico será transmitido somente para a face superior do sensor, permitindo o mesmo detectar com facilidade qualquer objeto que seja posicionado acima do mesmo.

Para entender melhor esse conceito, deve-se observar a Figura 40, na qual é exibido um corte lateral de um sensor com as linhas de campo elétrico fluindo deste e uma placa de blindagem posicionada imediatamente abaixo da placa do sensor.



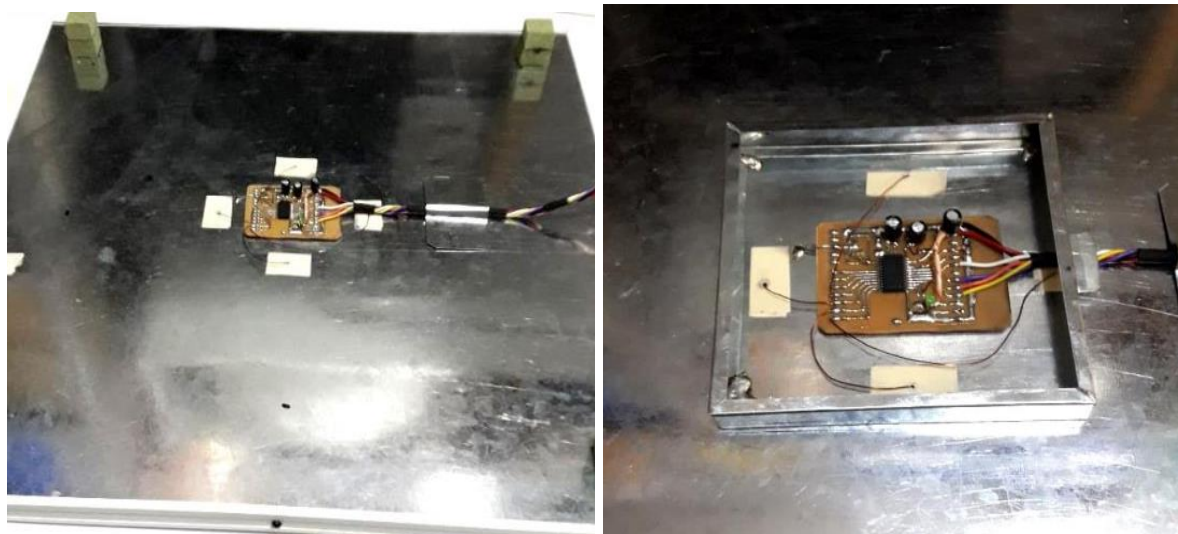
Fonte: Adaptado de Texas Instruments Incorporated (2021)

A placa de blindagem, que está embaixo do sensor, fica em paralelo com a superfície dos sensor, formando um capacitor de placas paralelas. Nessa placa de blindagem é injetado um sinal, que é uma cópia do sinal do sensor.

Como esse sinal da blindagem está em fase e possui a mesma amplitude do sinal dos sensor, o campo elétrico resultante entre as placas é nulo. Deve ser observado que a presença da placa de blindagem não afeta a sensibilidade do sensor. A consequência direta da inserção dessa blindagem abaixo do sensor é inibição de qualquer interferência externa abaixo dele. Portanto, somente a face superior dos sensores ficará disponível para detectar a presença da mão do usuário.

A implementação prática desse conceito é exibido na Figura 41, onde é possível verificar a inserção da blindagem na base dos sensores. Essa blindagem foi construída utilizando uma chapa de zinco galvanizado de 0,5 mm de espessura e conectada eletricamente ao circuito do MC34940 através de finos condutores de cobre esmaltado.

Figura 41 – Blindagem eletrostática na base do sensor



Fonte: elaborada pelo autor

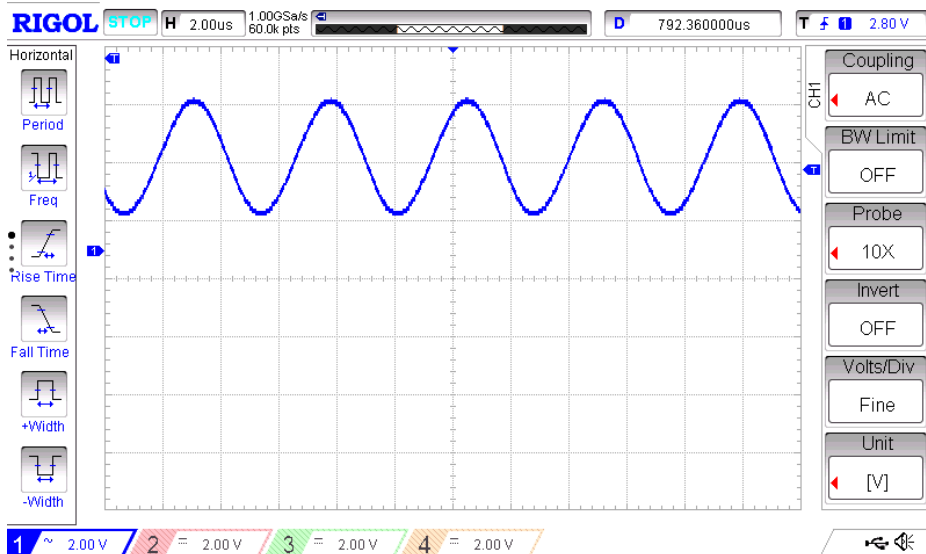
O circuito integrado MC34940 possui um buffer interno constituído de um amplificador operacional que replica o sinal senoidal da entrada de cada sensor conservando a mesma frequência, amplitude e fase do sinal original. O dispositivo disponibiliza um terminal de saída (SHIELD) para conexão da blindagem. Na Figura 42, é exibido um esquema de conexão do microcontrolador com o MC34940 na qual é destacado o terminal responsável pela conexão com a placa de blindagem.



um pulso. A maior aplicação desse pino é a possibilidade de desabilitar o buffer em momentos em que o sensor estiver inativo, visando a economia de energia.

Na Figura 44 é possível visualizar o sinal senoidal presente em um dos sensores responsáveis por movimentar o braço robótico e na Figura 45, é exibido a forma de onda no terminal (SHIELD), para efeito de comparação das duas formas de onda.

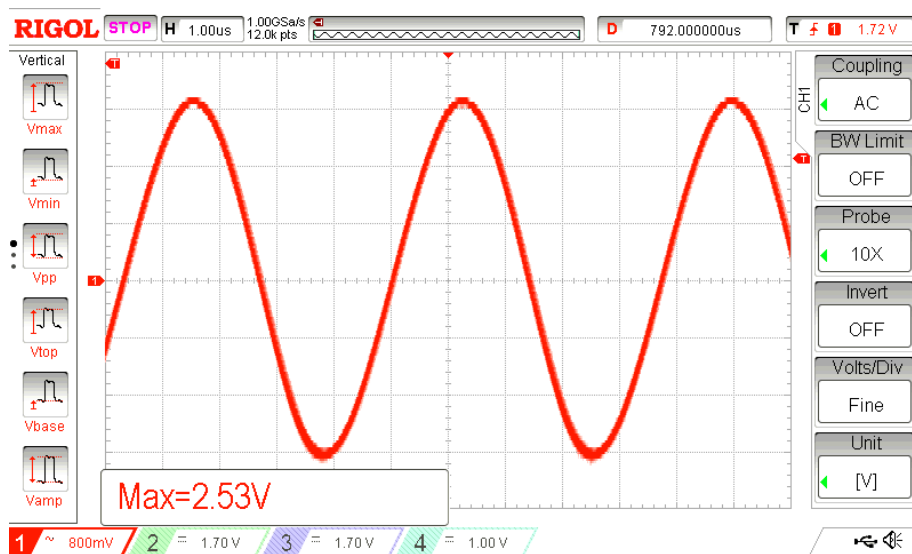
Figura 44 – Forma de onda presente em dos sensores



Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 45, exibe o sinal senoidal presente no terminal SHIELD. Como é possível observar, essa forma de onda possui as mesmas características do sinal presente no sensor.

Figura 45 – Forma de onda presente no terminal SHIELD

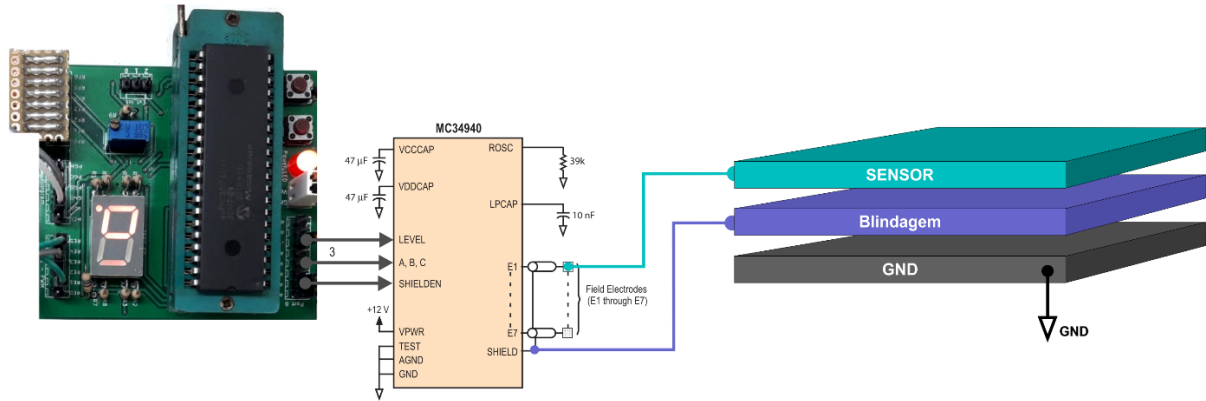


Fonte: elaborada pelo autor



Na Figura 46, é mostrado as conexões necessárias para serem realizadas junto a placa de controle, assim como com os sensores, para tornar possível a utilização da blindagem eletrostática.

Figura 46 – Conexões da placa de controle e da blindagem



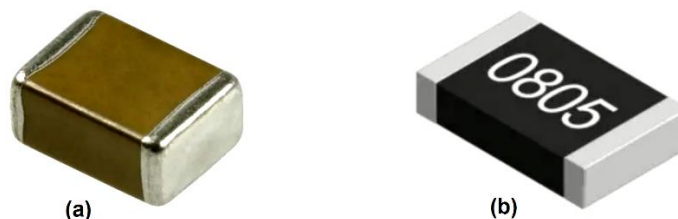
Fonte: elaborada pelo autor

Deve ser salientado que a distância entre a placa de controle e o sistema de leitura de capacitância, formado pelo circuito integrado MC34940 e a base dos sensores, ficou limitado à 3 metros, mas nada impede que distâncias maiores possam ser utilizadas.

#### 4.7 Circuito detector

O circuito detector é formado pelo circuito integrado MC34940, que é o componente responsável por medir a capacitância do sensores, e por uma série de componentes eletrônicos auxiliares necessários para seu perfeito funcionamento. Como forma de miniaturizar a placa de circuito impresso, foram utilizados alguns resistores e capacitores do tipo *Surface Mounted Device* (SMD) com especificação RMC 0805. A Figura (47) mostra com mais clareza esses componentes. A Figura 47(a) mostra um capacitor cerâmico e a Figura 47(b) mostra um resistor de filme de carbono, ambos com especificação do fabricante RMC 0805.

Figura 47 – Resistor e capcito SMD

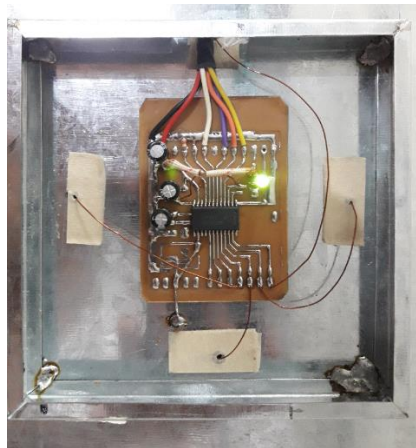


Fonte: Mouser Eletronics (2021)

O circuito foi montado numa placa de circuito impresso de fenolite. Segundo a Keen (1999), “fenolite é um laminado industrial utilizado como isolante elétrico. É produzido pela aplicação de calor e pressão à camadas de celulose impregnadas com resinas fenólicas”. A opção de usar placa de fenolite em vez de placa de fibra de vidro está no fato da primeira ter apresentado uma capacitância intrínseca menor em relação à placa de fibra de vidro, permitindo assim, obter melhores resultados na leitura dos sensores.

A Figura 48 mostra a placa de circuito impresso contendo o circuito integrado MC34940 e demais componentes montados sobre ela. Além dos componentes SMD, também foram utilizados outros componentes eletrônicos de dimensões maiores, como por exemplo: capacitores eletrolíticos e resistores de 1/8 W de potência.

Figura 48 – Circuito detector montado numa placa de fenolite



Fonte: elaborada pelo autor

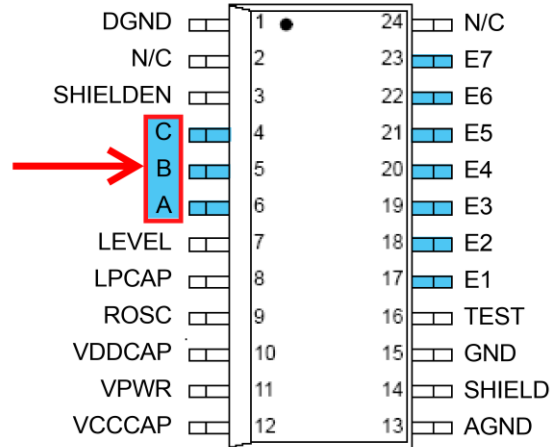
Observa-se, pela Figura 48, que a placa contendo o circuito integrado MC34940 está apoiada sobre a blindagem da base dos sensores. Esse procedimento foi necessário para evitar que a placa de circuito impresso agisse como um objeto próximo a face dos sensores e fosse detectado pelo dispositivo e acionasse indevidamente o braço robótico. Observa-se também na Figura 48, alguns fios de cobre esmaltado (28 AWG) saindo da placa. Esses fios se conectam aos sensores posicionados na face superior da estrutura da base que comporta os sensores, não mostrado nessa imagem.

#### 4.8 Comutação dos sensores

Para realizar a comutação dos sensores, para realizar a leitura da capacitância, o circuito integrado MC34940 disponibiliza um controle lógico através dos pinos 4,5 e 6. A

Figura 49 destaca a posição desses pinos no encapsulamento do circuito integrado.

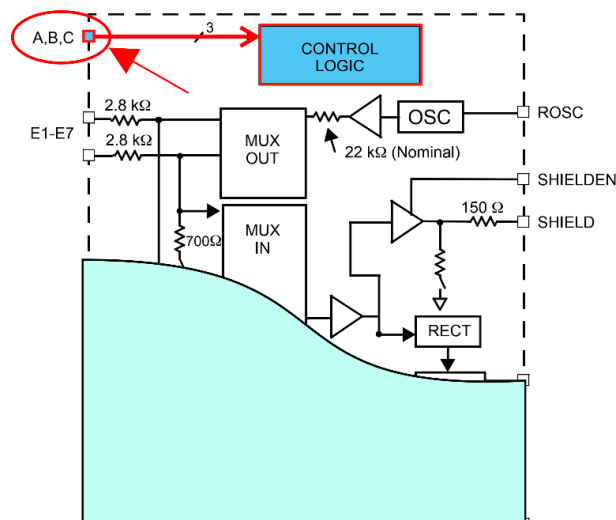
Figura 49 – Pinos de entrada ABC para seleção dos sensores



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

A Figura 50 mostra um diagrama em blocos do MC34940 mostrando a estrutura interna do dispositivo. Observa-se que o bloco de controle lógico (CONTROL LOGIC) coordena os multiplexadores internos (MUX OUT) e (MUX IN), responsáveis por selecionar a entrada dos sensores, através de níveis lógicos de tensão inseridos nos pinos A, B e C.

Figura 50 – Diagrama em blocos das entradas ABC do MC34940



Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

A seleção dos sensores ocorrem de forma sequencial inserindo níveis lógicos nos pinos A, B, C do circuito integrado. Para selecionar um sensor específico basta inserir o código correspondente de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 – Tabela de seleção dos sensores

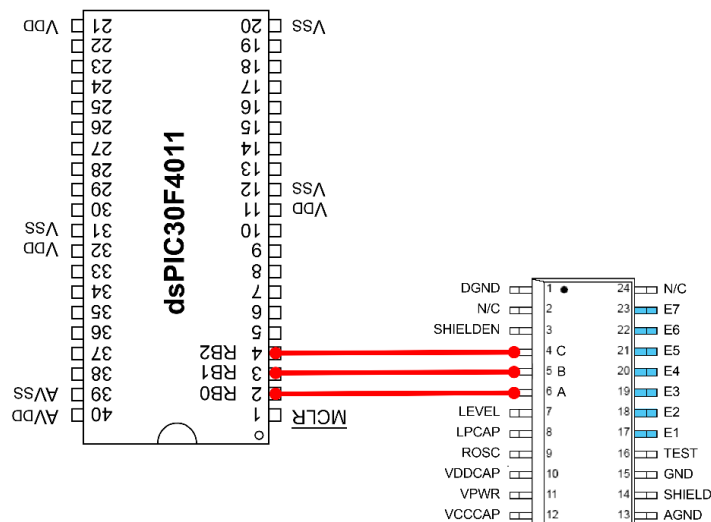
Terminal/SIGNAL	C	B	A
No electrodes selected	0	0	0
E1	0	0	1
E2	0	1	0
E3	0	1	1
E4	1	0	0
E5	1	0	1
E6	1	1	0
E7	1	1	1

Fonte: Freescale Semiconductor (2006)

Uma vez selecionado o sensor desejado, através da inserção dos níveis lógicos nos pinos C, B, A de acordo com a Tabela 3, o valor de tensão correspondente aquele sensor ficará disponível no pino 7 (LEVEL) do circuito integrado MC34940. Assim, realizando a leitura de tensão nesse pino através do conversor analógico/digital do microcontrolador, é possível identificar se a capacitância daquele sensor selecionado aumentou ou não. O nível de tensão nesse pino é inversamente proporcional à capacitância medida no sensor selecionado. Isso significa que, caso o usuário aproxime sua mão do sensor selecionado, a capacitância do sensor vai aumentar e conseqüentemente o nível de tensão no pino 7 (LEVEL) vai diminuir.

A Figura 51 mostra um diagrama esquemático da conexão dos pinos do MC34940 aos pinos de microcontrolador dsPIC30F4011. Para o controle da seleção dos sensores foi utilizado os pinos RB0, RB1 e RB2 do microcontrolador dsPIC30F4011.

Figura 51 – Pinos de conexão do dsPIC30F4011 com o MC34940

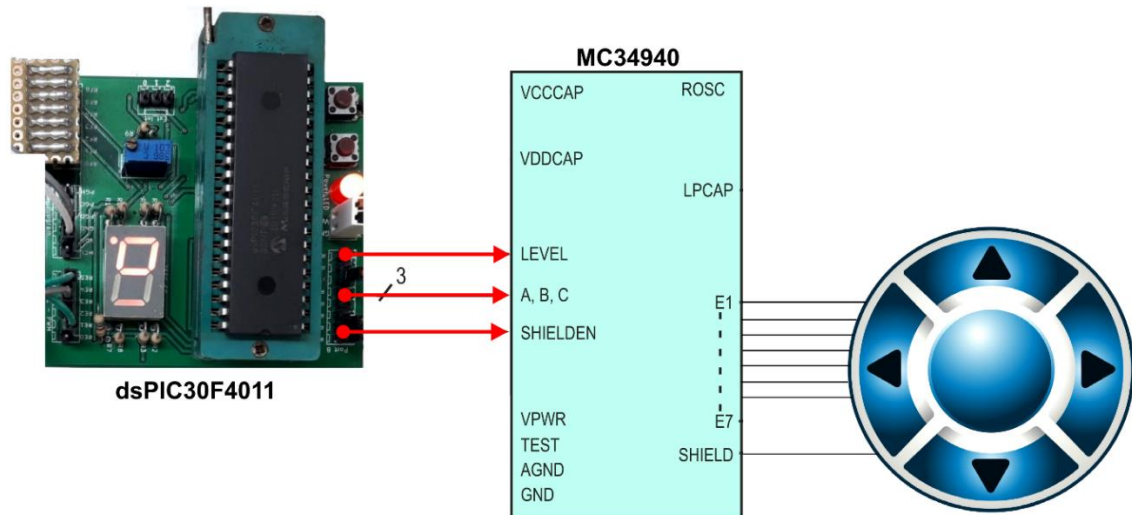


Fonte: Adaptado de Microchip (2010, p. 5) e Freescale Semiconductor (2006, p. 8)

A rotina de software implementada no microcontrolador realiza uma seleção de sensor à cada 1ms, em seguida realiza a leitura do nível de tensão no pino 7 (LEVEL) do MC34940. Como existem quatro sensores, então a rotina demora um total de aproximadamente 4ms para completar um varredura total dos sensores, excluindo é claro, o tempo necessário que o conversor analógico/digital necessita para realizar a conversão. À cada sensor selecionado é lido o valor de tensão no pino 7 (LEVEL). O tempo de 1ms para mudança dos sensores e leitura do nível de tensão foi escolhida como sendo aceitável para aplicação desse trabalho, mas esses tempos podem ser reduzidos em outras aplicações que exijam tal necessidade. O tempo mínimo de 100us foi testado e revelou ser o menor tempo possível para transição dos sensores, pois trata-se de uma limitação interna do MC34940. Tempos de mudança inferiores à 100us provocam erros na mudança dos sensores, fazendo com que a leitura no pino 7 (LEVEL) seja referente ao pino selecionado anteriormente.

Na Figura 52, é exibida o diagrama de conexão da placa de controle com o MC34940. Nessa aplicação, apenas cinco pinos são necessários para realizar o total controle e leitura do dispositivo. O cabo que conecta a placa de controle e o MC34940 foi construído por 5 fios de 0,32 mm<sup>2</sup> de diâmetro e entrelaçados formando um cabo flexível com 3 metros de comprimento, permitindo que o braço robótico possa ser operado pelos sensores à distância.

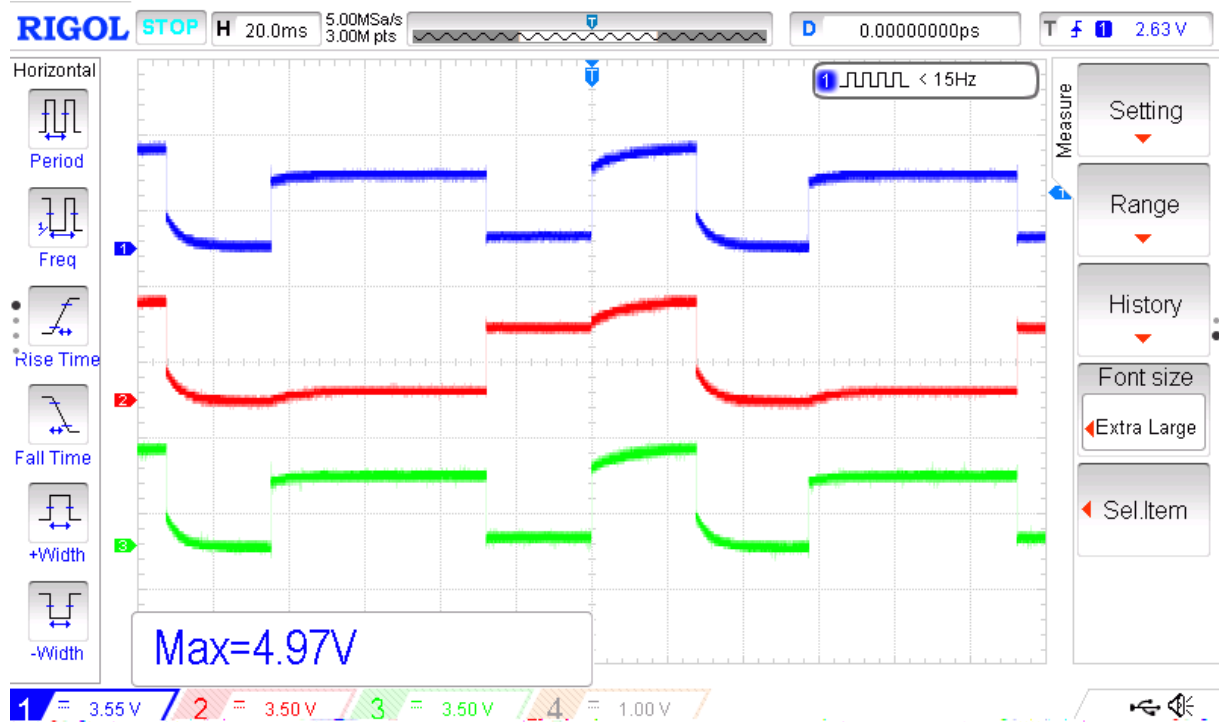
Figura 52 – Diagrama de conexão da placa de controle com o MC34940



Fonte: Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 50, é exibido a tela do osciloscópio contendo os sinais de controle correspondentes aos pinos A, B e C do MC34940 em um dado instante. A curva em azul corresponde ao pino A, a curva em vermelho corresponde ao pino B e a curva em verde corresponde ao pino C.

Figura 53 – Sinais de controle nos pinos ABC



Fonte: elaborada pelo autor

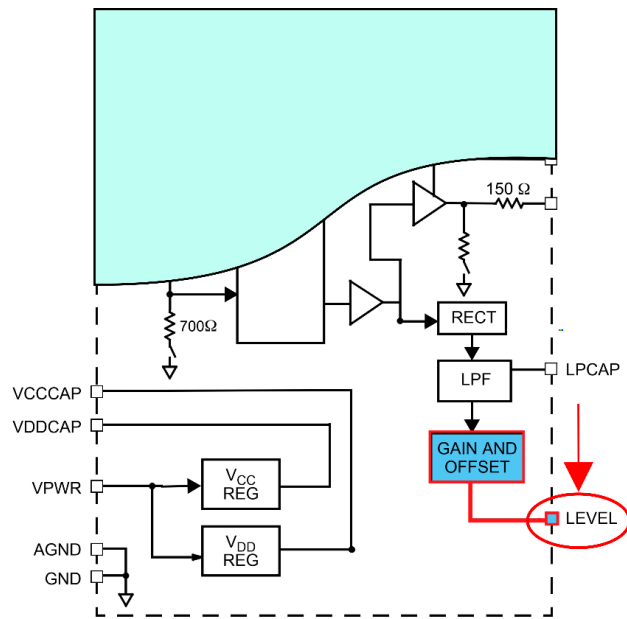
Observa-se, a partir da Figura 53, que a amplitude máxima obtida pelos sinais de controle não supera os 5V. Uma pequena dificuldade encontrada nesse trabalho foi a de sincronizar a taxa de amostragem do DsPIC com o a taxa de conversão capacitância/tensão do dispositivo. Isso foi contornado mantendo as leituras dos sensores em uma taxa mínima de 1ms entre cada sensor. Essa taxa já foi mencionada e constitui o tempo usado para seleção entre os sensores.

Deve-se observar que, apesar do circuito integrado MC34940 possuir 7 sensores disponíveis, nesse trabalho foi utilizado apenas as entradas E1, E2, E3 e E4, visto que todos os movimentos previstos para essa aplicação podem ser realizados através do uso simultâneo de dois ou mais sensores, reduzindo assim, a quantidade de sensores necessários para realizar o controle do braço robótico de forma eficiente.

#### 4.9 Sinal de saída

O circuito integrado MC34940 possui um terminal de saída (LEVEL) que fornece um sinal analógico cujo valor de tensão apresenta uma proporção inversa em relação a capacitância medida no sensor selecionado pela porta lógica ABC do dispositivo. A Figura 54 exhibe o diagrama em blocos destacando o pino 7 (LEVEL) do circuito integrado MC34940.

Figura 54 – Pino LEVEL do MC34940

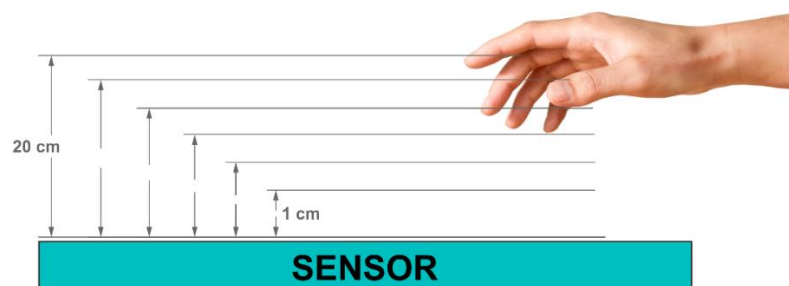


Fonte: Adaptado de Freescale Semiconductor (2006)

Uma vez selecionado o sensor desejado, através dos pinos ABC do MC34940, o nível de tensão no pino 7 (LEVEL) fica disponível para leitura e pode ser lido diretamente por um microcontrolador. Nesse trabalho foi utilizado o conversor analógico/digital do dsPIC30F4011. Observa-se que o nível de tensão no terminal de saída 7 (LEVEL) é inversamente proporcional à capacitância lida no sensor e portanto apresenta uma relação direta com a distância da mão do usuário em relação a face do sensor. Isso significa que, quanto mais próximo estiver a mão do operador em relação ao sensor, maior será a capacitância medida e menor será o nível de tensão no terminal LEVEL do MC34940.

A Figura 55 mostra um teste de bancada no qual que foi selecionado um dos sensores, em seguida aproximando a mão da face do sensor foi medido o valor de tensão no terminal 7 (LEVEL) do circuito integrado para vários valores de distância da mão em relação ao sensor.

Figura 55 – Tensão de saída em função da distância do sensor



Fonte: elaborada pelo autor

Para efetuar as leituras de tensão na saída do dispositivo foi utilizado o multímetro Fluke 17B+ na escala de corrente contínua. A Figura 56 mostra um valor pontual de tensão para uma distância de quatro centímetros da face do sensor.

Figura 56 – Tensão no terminal LEVEL do MC34940



Fonte: elaborada pelo autor

A Tabela 4 mostra o nível de tensão presente no terminal de saída 7 (LEVEL) do MC34940 para várias distâncias medidas em relação a face do sensor.

Tabela 4 – Tabela de seleção dos sensores

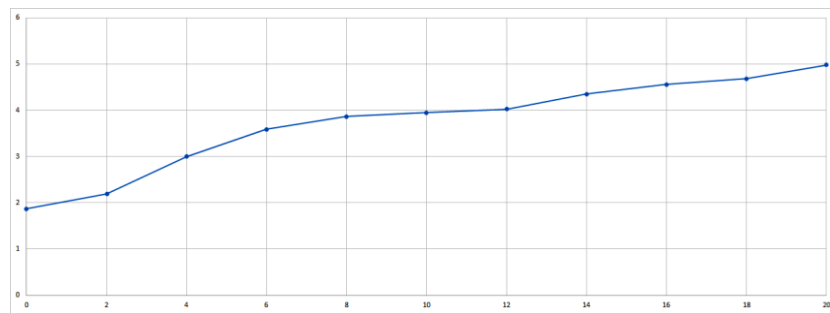
DISTÂNCIA	TENSÃO
20	4,983
18	4,682
16	4,557
14	4,348
12	4,022
10	3,951
8	3,863
6	3,585
4	2,999
2	2,194
0	1,868

Fonte: elaborada pelo autor

O Gráfico 2 é a plotagem do resultado dos dados mostrados na Tabela 4, no qual exhibe os valores medidos para distância da mão em relação ao sensor e seus valores correspondentes de níveis de tensão na saída do MC34940.



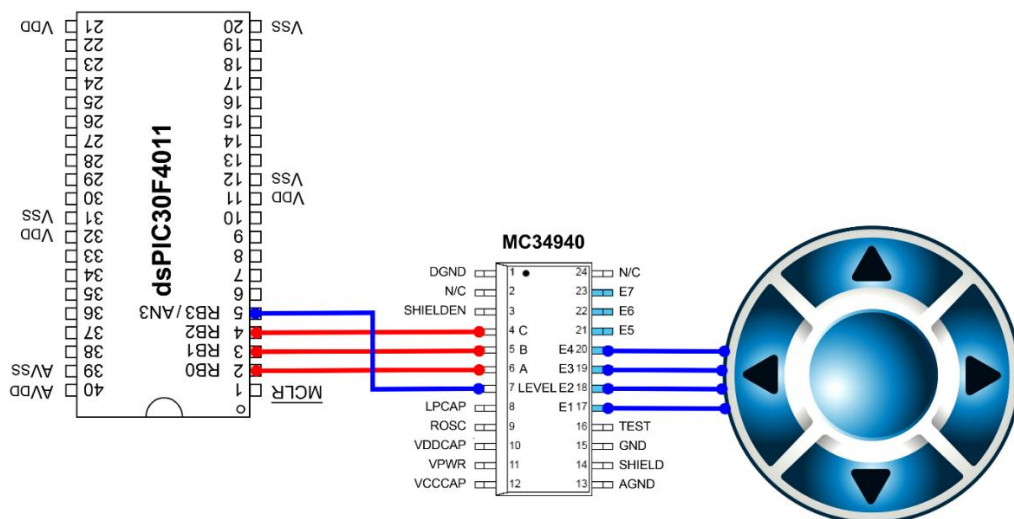
Gráfico 2 – Gráfico tensão de saída (LEVEL) em função da distância



Fonte: elaborada pelo autor

Deve ser observado que, embora o circuito integrado MC34940 seja alimentado com tensão de 12V, sua tensão de saída analógica no pino LEVEL é de no máximo 5V, pois internamente ao dispositivo existe um sistema de condicionamento de sinal constituído por um regulador abaixador de tensão que reduz a tensão de saída. Isso significa que não foi necessário fazer uso de nenhum tipo de condicionamento de sinal externo, como por exemplo, divisor de tensão, para diminuir o nível de tensão do terminal de saída, para ser possível conectar ao microcontrolador. Nesse trabalho, a entrada do conversor *Analog-to-Digital Converter* (ADC) do dsPIC30F4011 (entrada AN3/RB3) foi conectada diretamente ao terminal LEVEL do MC34940 para realizar a leitura de tensão. O esquema de conexão entre os dois dispositivos pode ser visualizado na Figura 57:

Figura 57 – Diagrama de conexão da entrada analógica do microcontrolador



Fonte: elaborada pelo autor

A sequência de conexões entre o microcontrolador e o MC34940 está resumida na Tabela 5:

Tabela 5 – Descrição da legenda da tabela

CONEXÕES	
dsPIC30F4011	MC34940
5 -(RB3/AN3)	7 - (LEVEL)
2 - (RB0)	6 -ENTRADA (A)
3 -(RB1)	5 -ENTRADA (B)
4-(RB2)	4 -ENTRADA (C)

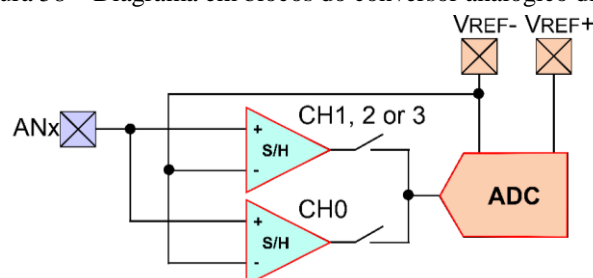
Fonte: elaborada pelo autor

Como já foi mencionado, o cabo que conecta a placa de controle e o MC34940 foi construído por 5 fios de 0,32 mm<sup>2</sup> de diâmetro e entrelaçados formando um cabo flexível com 3 metros de comprimento. Distâncias maiores podem ser utilizadas desde que se utilize cabo com uma blindagem externa de forma à bloquear qualquer interferência eletromagnética externa.

#### 4.10 Conversor analógico digital

Para obter a leitura do nível de tensão constante no pino 7 (LEVEL) do circuito integrado MC34940 foi utilizado o conversor analógico/digital do dsPIC30F401 que converte a tensão medida para um valor numérico. O Conversor Analógico/Digital do dsPIC30F4011 possui resolução de 10 bits de alta velocidade e permite a conversão de um sinal de entrada analógico para um número digital de 10 bits. Este módulo é baseado na arquitetura de registro de aproximação sucessiva (SAR), fornecendo uma taxa de amostragem máxima de 1 *Mega samples per second* (MSPS). O módulo ADC possui 16 entradas analógicas que são multiplexadas em quatro amplificadores de amostra e retenção ou *sample and hold* (S/H). A saída do S/H é a entrada para conversor que gera o resultado. Na Figura 58, é possível observar o diagrama em blocos contendo a estrutura básica de conexão entre o amplificador S/H e o ADC do microcontrolador.

Figura 58 – Diagrama em blocos do conversor analógico digital



Fonte: Adaptado de Microchip (2021)

A referência para os níveis de tensão analógica são selecionáveis por software, de forma que o dispositivo pode utilizar as tensões de alimentação AVDD/AVSS ou o nível de tensão aplicado nos terminais no VREF+/VREF- como níveis de tensão de referência. Isso significa que o conversor analógico/digital pode medir tensões situadas numa faixa de valores que estejam entre os terminais VREF+/VREF-. Para essa aplicação, os níveis de tensão utilizadas foi AVDD/AVSS, ou seja, o s níveis de alimentação do microcontrolador (5V e GND). Na Figura 59, é mostrado todos os registradores referentes ao módulo do conversor analógico/digital do dsPIC30F4011.

Figura 59 – Conjunto de registradores do módulo ADC

SFR Name	Addr.	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
ADCBUF0	0280	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 0									
ADCBUF1	0282	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 1									
ADCBUF2	0284	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 2									
ADCBUF3	0286	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 3									
ADCBUF4	0288	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 4									
ADCBUF5	028A	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 5									
ADCBUF6	028C	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 6									
ADCBUF7	028E	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 7									
ADCBUF8	0290	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 8									
ADCBUF9	0292	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 9									
ADCBUFA	0294	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 10									
ADCBUFB	0296	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 11									
ADCBUFC	0298	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 12									
ADCBUFD	029A	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 13									
ADCBUFE	029C	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 14									
ADCBUFF	029E	—	—	—	—	—	—	ADC Data Buffer 15									
ADCON1	02A0	ADON	—	ADSIDL	—	—	—	FORM<1:0>	SSRC<2:0>			—	SIMSAM	ASAM	SAMP	DONE	
ADCON2	02A2	VCFG<2:0>			—	—	CSCNA	CHPS<1:0>	BUFS	—	SMPI<3:0>				BUFM	ALTS	
ADCON3	02A4	—	—	—	SAMC<4:0>				ADRC	—	ADCS<5:0>						
ADCHS	02A6	CH123NB<1:0>		CH123SB	CH0NB	CH0SB<3:0>			CH123NA<1:0>		CH123SA	CH0NA	CH0SA<3:0>				
ADPCFG	02A8	—	—	—	—	—	—	—	PCFG8 <sup>(2)</sup>	PCFG7 <sup>(2)</sup>	PCFG6 <sup>(2)</sup>	PCFG5	PCFG4	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
ADCSSL	02AA	—	—	—	—	—	—	—	CSSL8 <sup>(2)</sup>	CSSL7 <sup>(2)</sup>	CSSL6 <sup>(2)</sup>	CSSL5	CSSL4	CSSL3	CSSL2	CSSL1	CSSL0

Fonte: Adaptado de Microchip (2010, p. 149)

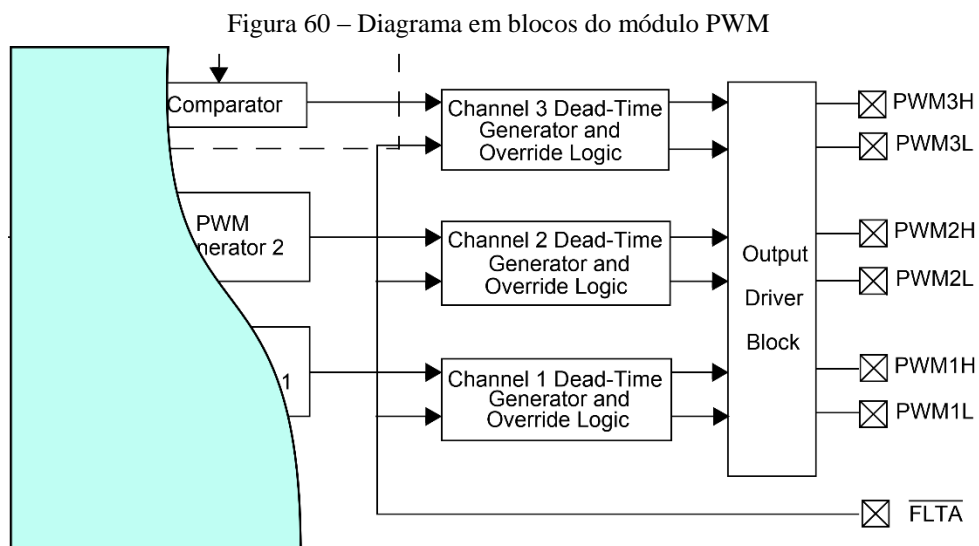
Apesar do dispositivo permitir realizar uma interrupção na execução do programa ao alcançar o final de uma conversão, nesse trabalho, esse recurso não foi utilizado. A leitura do valor de tensão fornecido pelo circuito integrado MC34940 é lido diretamente no registrador de 16 bits ADCBUFx.

#### 4.11 Controle PWM

O controle de movimentos dos motores do braço robótico é realizado através do envio de um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) para o circuito interno dos respectivos motores, no qual é ajustando o ciclo de trabalho desse sinal para realizar os movimentos desejados. O sinal PWM é gerado internamente ao dsPIC30F4011 e possui uma frequência de operação de 50 Hz para que os servomotores operem adequadamente. Um sinal PWM pode ser implementado usando uma programação via software, entretanto, para esse trabalho, optou-se usar o módulo interno do microcontrolador para realizar essa tarefa.

Dessa forma, com o objetivo de facilitar o controle dos motores, foi utilizado o módulo *Motor Control PWM Module* (MCPWM) interno do dsPIC30F4011. Esse módulo permite controlar vários tipos de motores: motor de indução trifásico, motor de relutância variável, motor sem escovas BLDC ou servomotores.

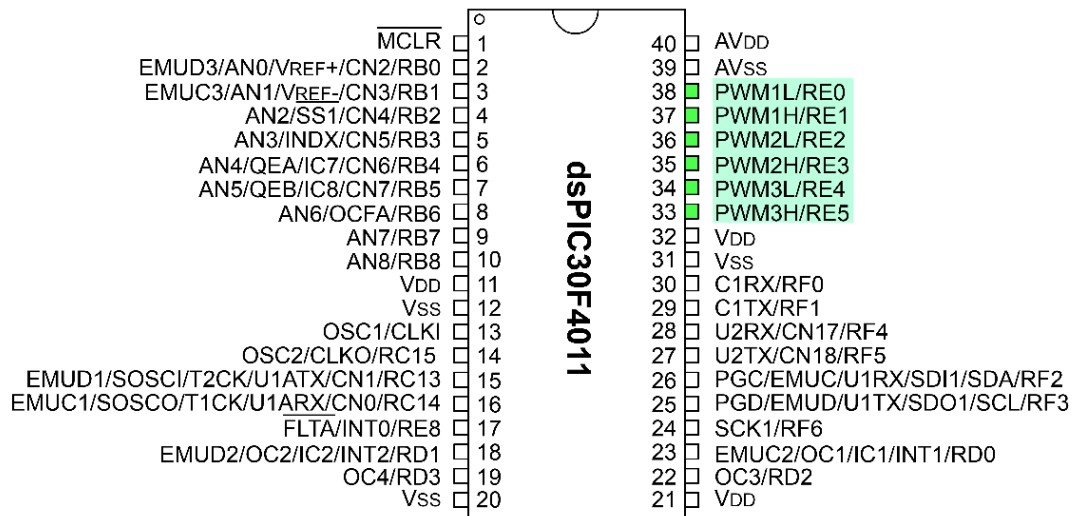
Esse módulo simplifica bastante a tarefa de gerar múltiplos sinais PWM sincronizados com o clock interno do microcontrolador e permite controlar todos os motores simultaneamente. Esse módulo possui seis pinos de saída PWM com três geradores de ciclo ativo de 16 bits. O diagrama em blocos funcional simplificado na Figura 60 exibe alguns blocos referente ao módulo PWM interno e os pinos de saída para conexão dos motores.



Fonte: Adaptado de Microchip (2010, p. 98)

O diagrama de pinos do microcontrolador é exibido na Figura 61, na qual é possível visualizar a posição real de todos os terminais de saída referentes ao módulo PWM.

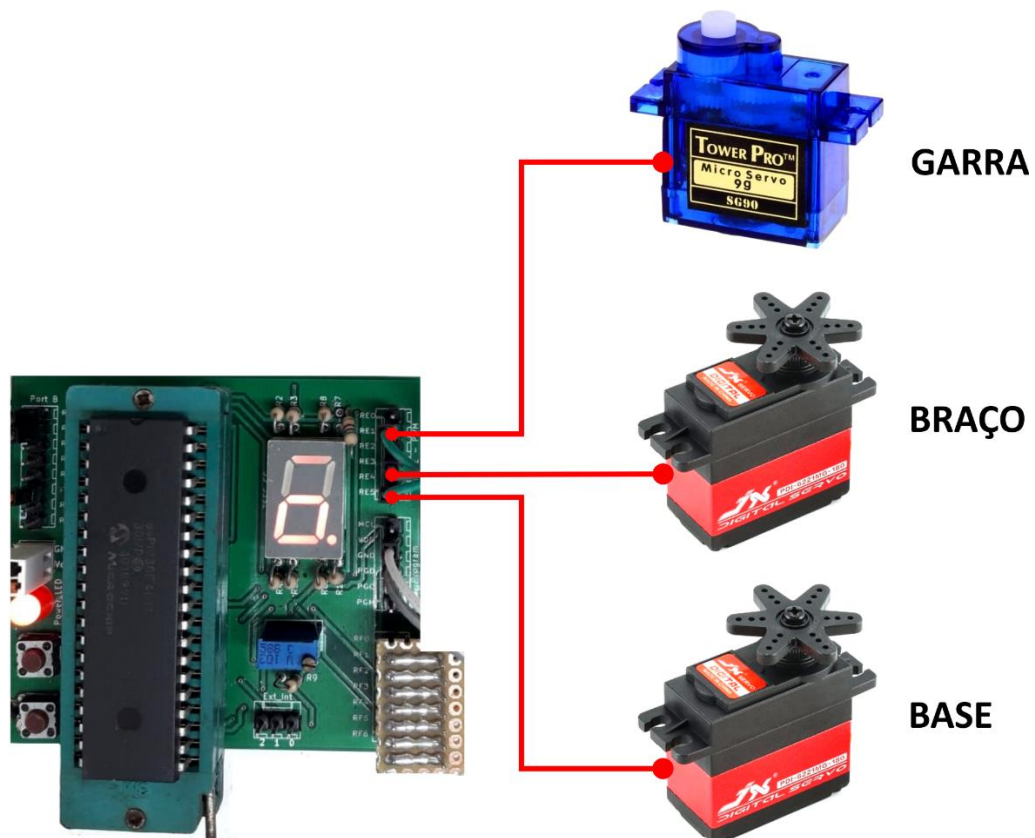
Figura 61 – Diagrama de pinos do dsPIC304011



Fonte: Adaptado de Microchip (2010, p. 5)

Na Figura 62, é possível observar as conexões dos terminais de saída dos módulos geradores de sinal PWM com cada servomotor usado no braço robótico.

Figura 62 – Conexão das saídas PWM do dsPIC304011 com os servomotores



Fonte: elaborado pelo autor (2010, p. 5)

O módulo PWM do dsPIC30F4011 possui três geradores de ciclo ativo (*duty cycle*) independentes, sendo um para cada canal PWM. Essa característica permite ajustar a razão cíclica de cada servomotor de forma individual, permitindo realizar movimentos independentes do braço robótico. O módulo PWM possui 6 saídas designadas por: PWM1H, PWM1L, PWM2H, PWM2L, PWM3H e PWM3L. Para o controle dos servo motores foram utilizados os seguintes pinos descritos na Tabela 6 com seus correspondentes servo motores.

Tabela 6 – Descrição dos terminais de saída PWM para os servomotores

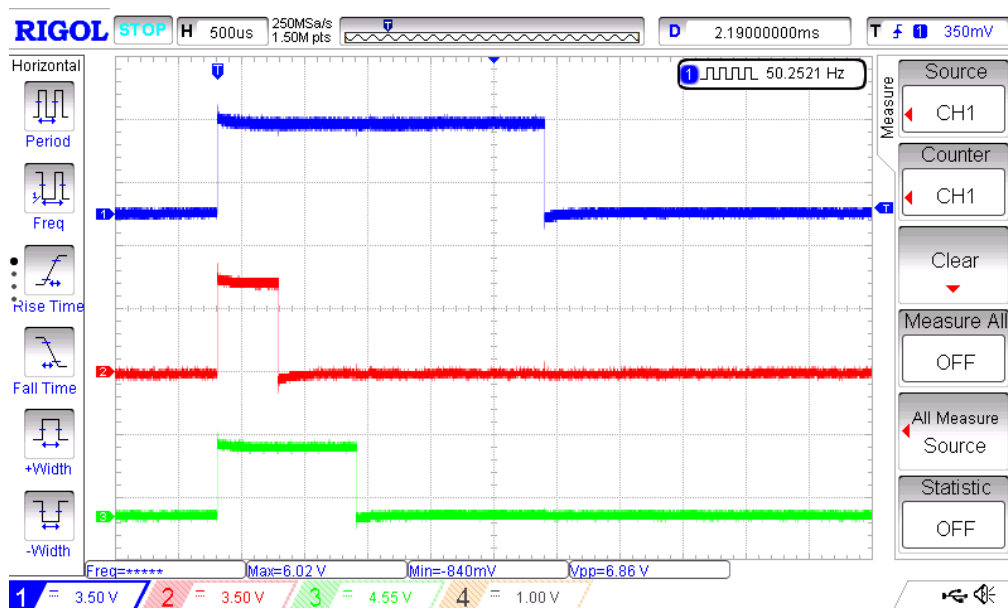
Nº do Pino	DESCRIÇÃO	SERVO MOTOR
37	PWM1H	GARRA
35	PWM2H	BRAÇO
33	PWM3H	BASE

Fonte: elaborada pelo autor

As saídas complementares PWM1L, PWM2L e PWM3L do módulo PWM não foram utilizadas nesse trabalho, visto que esses pinos são indicados para gerarem o sinal PWM complementar para realizar comutação de chaves em sistemas de controle de potência.

Na Figura 63, é mostrado os sinais PWM dos servomotores obtidos com auxílio de um osciloscópio. A primeira curva em azul corresponde ao sinal PWM do servomotor da base do manipulador, a segunda curva em vermelho corresponde ao servomotor do braço e a curva inferior de cor verde corresponde ao servomotor que atua na garra.

Figura 63 – Sinais PWM dos servomotores



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme pode ser observado na Figura 63, a razão cíclica de cada motor pode ser ajustado de forma independente, permitindo assim, movimentos independentes de cada motor, embora movimentos simultâneos possam ser obtidos.

Para especificar o período de operação do sinal PWM o fabricante disponibiliza no manual técnico do dsPIC30F4011 a seguinte equação:

Equação 8 – Equação para cálculo do período dos sinais PWM

$$T_{PWM} = T_{CY} \cdot (PTPER + 1) \cdot PTMR_{Prescale\ Value}$$

Fonte: Microchip (2010, p. 100)

Onde:

$T_{CY}$  – É o ciclo de clock interno do microcontrolador;

$PTPER$  – É o registrador da base de tempo do período do sinal PWM;

$PTMR_{Prescale\ Value}$  – É um fator de divisão;

Realizado um reajuste nos termos da Equação 8, é possível expressar o valor do registrador PTPER, que é o registrador responsável por configurar o período do sinal PWM, em função das demais variáveis, conforme a equação 9:

Equação 9 – Equação para cálculo do período dos sinais PWM

$$PTPER = \frac{FCY}{F_{PWM} * (PTMR_{Prescale\ Value})} - 1$$

Fonte: Adaptado de Microchip (2010, p. 100)

Onde:

$F_{FCY}$  – Frequência interna de operação;

$F_{PWM}$  – É a frequência do módulo PWM;

$PTMR_{Prescale\ Value}$  – É um fator de divisão de frequência;

Portanto, uma vez escolhido o valor do período do sinal PWM, que nessa aplicação corresponde à 20ms, visto que esse período corresponde à frequência de 50 Hz, é necessário calcular o valor que deverá constar no registrador PTPER. Adotando a frequência do oscilador de 4MHz ( $FCY = 1\text{MHz}$ ), um *prescaler* de 1:4 e frequência do PWM de 50 Hz, o valor do registrador PTPER será:

Equação 10 – Cálculo do valor de PTPER

$$PTPER = \frac{1.000.000}{50 \text{ Hz} * (4)} - 1 = 4999$$

Fonte: elaborado pelo autor

Esse valor de PTPER foi inserido no código-fonte do dsPIC30F4011, para a correta configuração do sinal PWM do braço robótico. Inicialmente houve certa dificuldade para controlar os servomotores pelo fato deles funcionarem com uma frequência muito baixa, em torno de 50Hz. Para que o módulo interno PWM do microcontrolador pudesse trabalhar um frequência tão baixa, foi necessário reduzir o clock do processador. Nesse caso, foi usado um cristal externo de 4MHz de maneira que a frequência interna do sistema ficou sendo de 1MHz. Dessa forma, foi possível obter um sinal PWM na frequência compatível com a utilização dos servomotores. Na Figura 64, é exibido o sinal PWM dos três servomotores do braço robótico, no qual é possível observar que a frequência de operação do sinal é de 50,2 Hz.

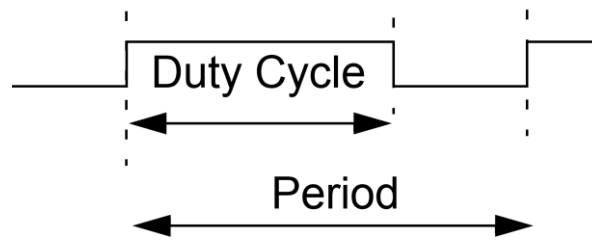


Fonte: elaborado pelo autor

Ciclo de trabalho, razão cíclica ou *duty cycle*, em termos gerais, é definido como proporção de tempo em que o sinal PWM permanece em nível lógico alto em relação ao tempo em que o sinal permanece em nível baixo, geralmente expresso em termos percentuais. Para exemplificar esse conceito, a forma de onda de um sinal PWM é exibida na Figura 65:



Figura 65 – Duty cycle de um sinal PWM



Fonte: Adaptado de Microchip (2010, p. 101)

Para especificar o valor do ciclo ativo desejado, deve-se inserir um valor numérico nos registradores PDC1, PDC2 e PDC3. Cada um desses registradores possui largura de 16 bits e ajusta o ciclo ativo de cada servomotor individualmente. O registrador PDC1 controla o servomotor da base, o registrador PDC2 controla o servomotor do braço e o registrador PDC3 controla o servomotor da garra. A medida que os valores constantes nesses registradores são modificados, a porcentagem do ciclo ativo do sinal PWM varia na mesma proporção. Para realizar o controle dos motores de forma adequada, foi necessário limitar a razão cíclica de cada motor de forma a estabelecer limites no ângulo deslocado, principalmente no motor da garra, pois esta tem um limite de abertura. Na Figura 66, é exibido o valor mínimo da razão cíclica do sinal PWM usada no controle do motor da base do braço robótico.

Figura 66 – Razão cíclica mínima do sinal PWM do motor da base



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 67, é exibido o valor máximo da razão cíclica do sinal PWM usada no controle do motor da base do braço robótico.

Figura 67 – Razão cíclica máxima do sinal PWM do motor da base



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 68, é exibido o valor mínimo da razão cíclica do sinal PWM usada no controle do motor do braço robótico.

Figura 68 – Razão cíclica mínima do sinal PWM do motor do braço



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 69, é exibido o valor máximo da razão cíclica do sinal PWM usada no controle do motor do braço robótico.

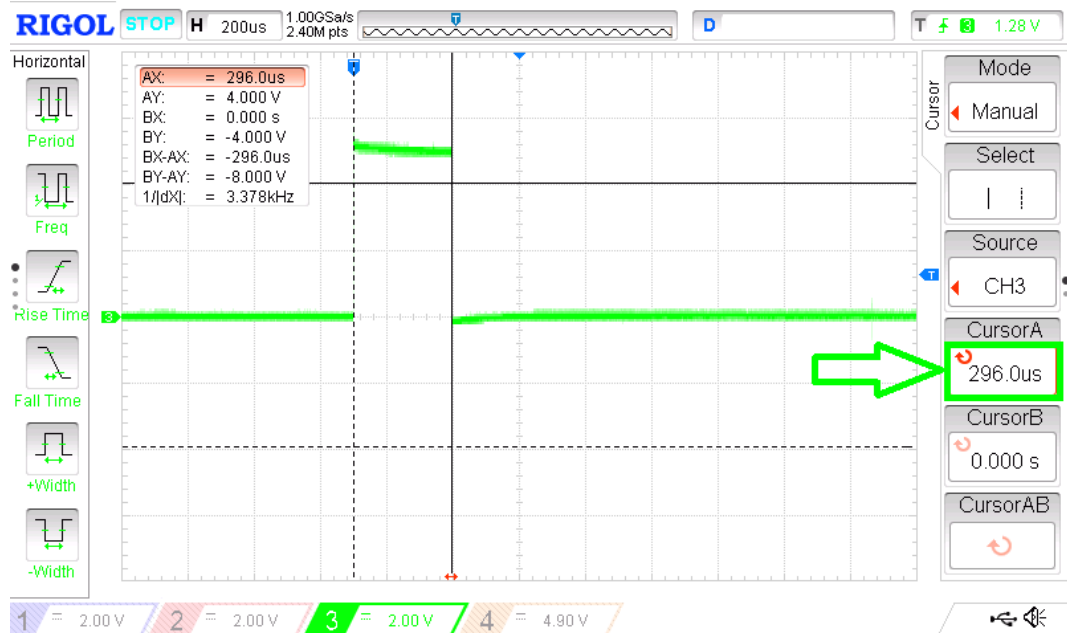
Figura 69 – Razão cíclica máxima do sinal PWM do motor do braço



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 70, é exibido o valor mínimo da razão cíclica do sinal PWM usada no controle do motor da garra.

Figura 70 – Razão cíclica mínima do sinal PWM do motor da garra



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 71, é exibido o valor mínimo da razão cíclica do sinal PWM usada no controle do motor da garra.

Figura 71 – Razão cíclica máxima do sinal PWM do motor da garra



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 7 resume a porcentagem máxima e mínima das razões cíclicas usadas para cada motor do braço robótico.

Tabela 7 – Porcentagens de razão cíclica usadas

SERVOMOTOR	Tempo Mínimo (ms)	Tempo Máximo (ms)	Mínimo (%)	Máximo (%)
BASE	0,076	1,360	0,38	6,8
BRAÇO	0,208	1,168	1,04	5,84
GARRA	0,296	0,896	1,48	4,48

Fonte: elaborada pelo autor

Como pode-se observar à partir da Tabela 7, a porcentagem dos valores mínimos e máximos, em relação ao período máximo de razão cíclica possível, é bastante reduzida. Esse fato consistiu em uma das maiores dificuldades encontradas para realizar o controle dos servomotores com precisão e com suavidade nos movimentos, pois uma mínima variação da razão cíclica já era suficiente para promover grandes variações de movimento no eixo do motor. Entretanto, como o módulo PWM possui uma resolução total de 16 bits, foi possível realizar o controle dos servomotores de maneira satisfatória para os propósitos desse trabalho.

O Quadro 2 foi extraído do *datasheet* do dsPIC30F4011 e nele consta todos os registradores que controlam o módulo PWM do dispositivo. Todas as configurações necessárias para permitir o adequado funcionamento do módulo PWM foi realizado na programação do

dispositivo e seus valores salvos na memória EEPROM interna. Sempre que o microcontrolador fosse alimentado, a rotina de programação recuperava os dados da EEPROM e carregava-os nos registradores responsáveis pelo controle PWM.

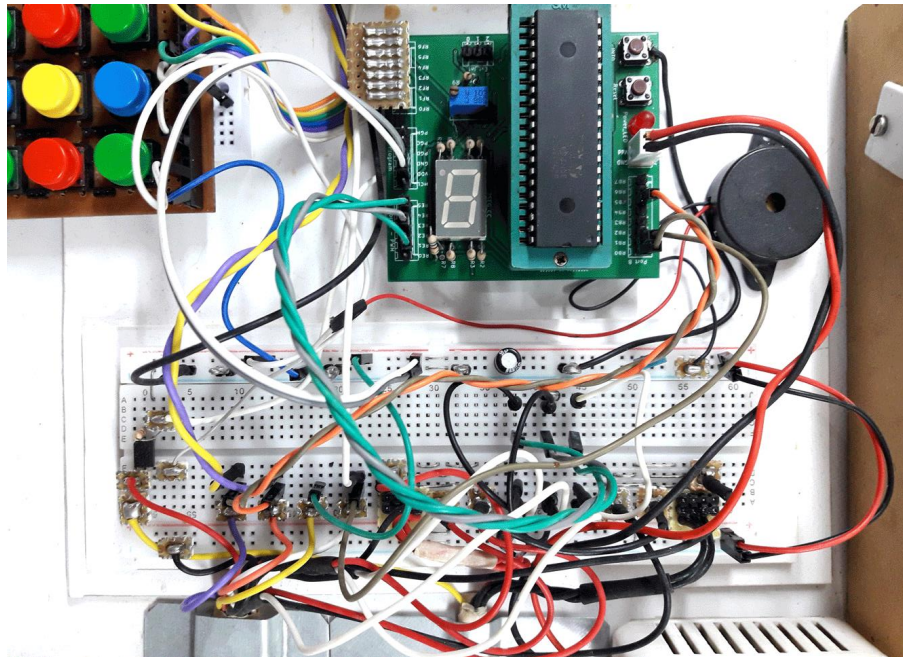
Quadro 2 – Quadro dos registradores do módulo PWM do dsPIC304011

SFR Name	Addr.	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Reset State
PTCON	01C0	PTEN	—	PTSIDL	—	—	—	—	—	PTOPS<3:0>			PTCKPS<1:0>		PTMOD<1:0>		0000 0000 0000 0000	
PTMR	01C2	PTDIR	PWM Timer Count Value														0000 0000 0000 0000	
PTPER	01C4	—	PWM Time Base Period Register														0111 1111 1111 1111	
SEVTCMP	01C6	SEVTDIR	PWM Special Event Compare Register														0000 0000 0000 0000	
PWMCON1	01C8	—	—	—	—	—	PTMOD3	PTMOD2	PTMOD1	—	PEN3H	PEN2H	PEN1H	—	PEN3L	PEN2L	PEN1L	0000 0000 1111 1111
PWMCON2	01CA	—	—	—	—	—	SEVOPS<3:0>			—	—	—	—	—	IUE	OSYNC	UDIS	0000 0000 0000 0000
DTCON1	01CC	—	—	—	—	—	—	—	—	DTAPS<1:0>		Dead-Time A Value					0000 0000 0000 0000	
FLTACON	01D0	—	—	FAOV3H	FAOV3L	FAOV2H	FAOV2L	FAOV1H	FAOV1L	FLTAM	—	—	—	—	FAEN3	FAEN2	FAEN1	0000 0000 0000 0000
OVDCON	01D4	—	—	POVD3H	POVD3L	POVD2H	POVD2L	POVD1H	POVD1L	—	—	POUT3H	POUT3L	POUT2H	POUT2L	POUT1H	POUT1L	1111 1111 0000 0000
PDC1	01D6	PWM Duty Cycle 1 Register																0000 0000 0000 0000
PDC2	01D8	PWM Duty Cycle 2 Register																0000 0000 0000 0000
PDC3	01DA	PWM Duty Cycle 3 Register																0000 0000 0000 0000

Fonte: Microchip (2010, p. 107)

De forma à facilitar as conexões da placa de controle contendo o dsPIC30F4011 com os motores e com o circuito integrado MC34940, responsável por medir a capacitância, foi utilizado uma protoboard de interconexão. A Figura 72 mostra a imagem dessa solução empregada.

Figura 72 – Protoboard usada para expandir as conexões da placa de controle



Fonte: elaborada pelo autor

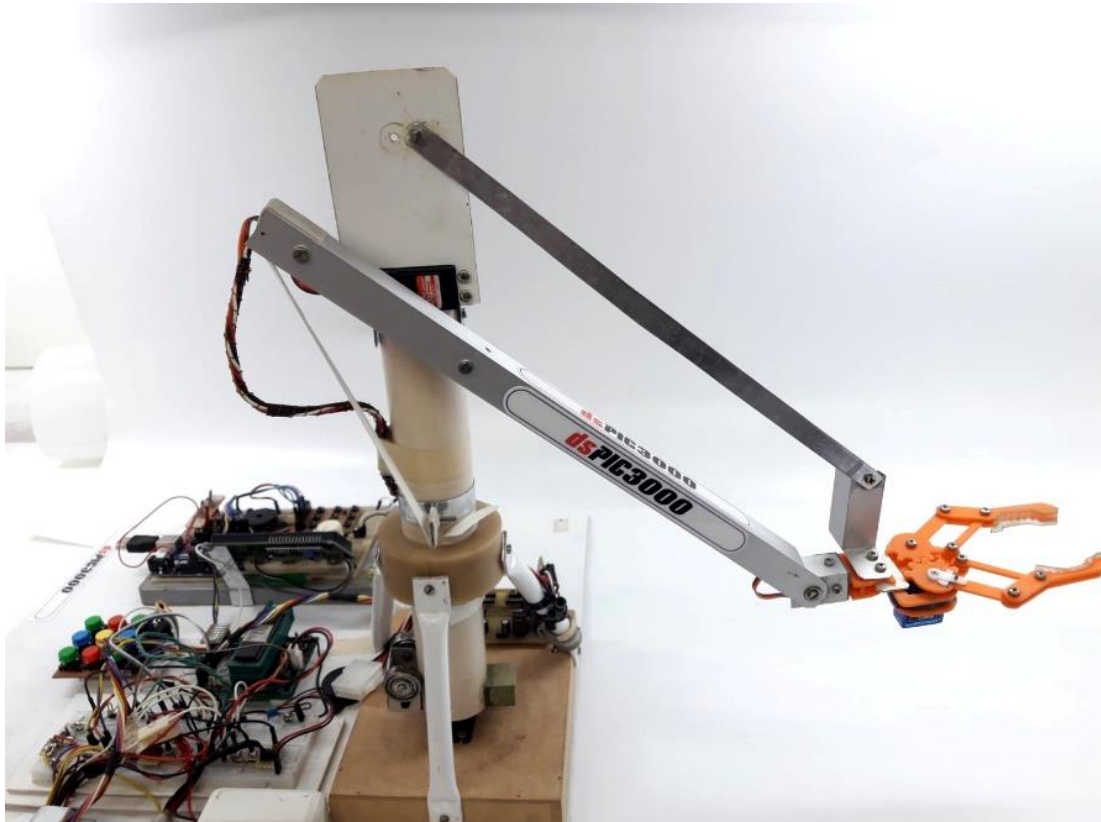
Conforme é possível observar na Figura 72, essa solução foi necessária, pois a placa de controle só disponibilizava uma única saída/entrada para cada pino do microcontrolador e a

protoboard expandiu a quantidade de pinos, permitindo fazer conexões simultâneas em cada pino do dsPIC30F4011.

#### 4.12 Braço Robótico

Para montar a estrutura física do braço robótico foi utilizado vários materiais distintos: alumínio, zinco, *Polyvinyl chloride* (PVC), resina poliéster e madeira MDF. O braço robótico completamente montado pode ser visualizado na Figura 73:

Figura 73 – Braço robótico

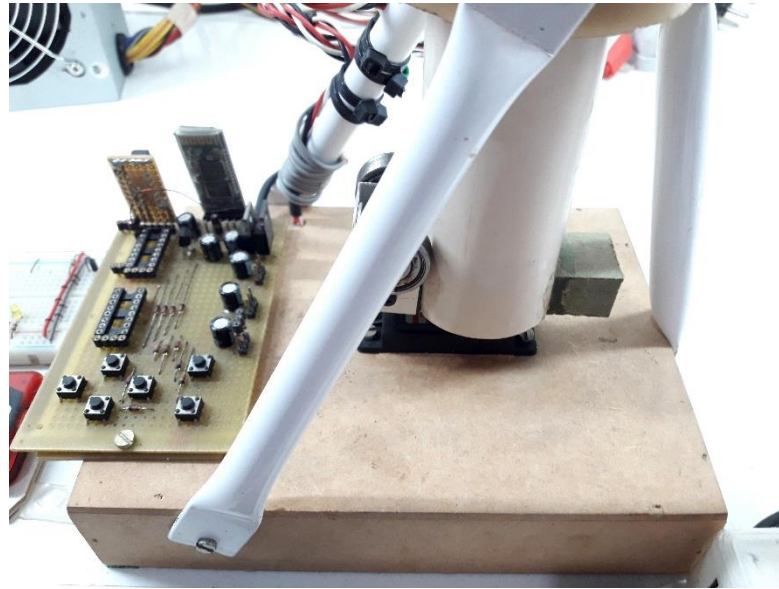


Fonte: elaborada pelo autor

A base de sustentação do braço robótico foi feita de madeira MDF, permitindo assim, um apoio sólido à toda estrutura do manipulador. A escolha desse material para ser usado como base ofereceu como vantagens adicionais: possibilidade fixação do primeiro servomotor, oferecer apoio ao elo central, apresentar excelente rigidez mecânica para os elementos auxiliares de sustentação e permitir fácil perfuração de parafusos. A Figura 74 mostra a base do braço robótico com barras de sustentação de apoio lateral fixados ao mesmo.



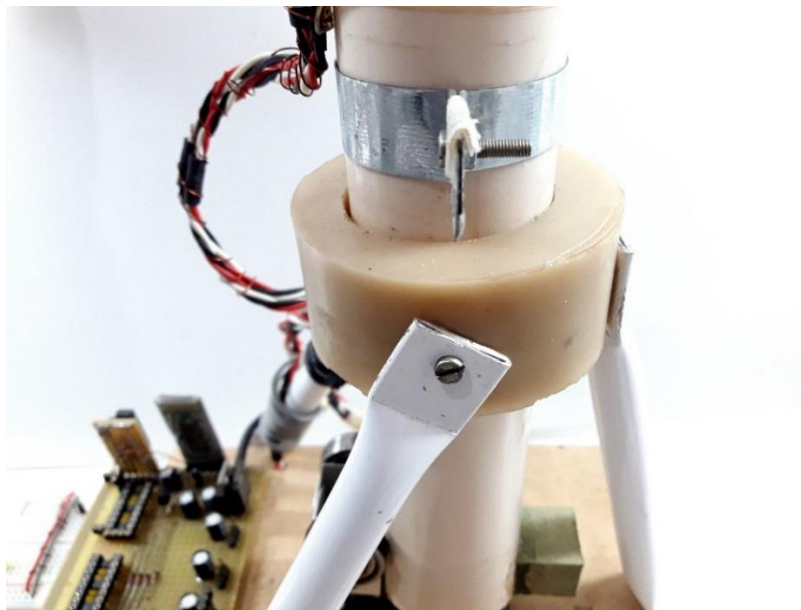
Figura 74 – Base de MDF do braço robótico



Fonte: elaborada pelo autor

Na figura 75, é possível observar a presença de barras de sustentação lateral do braço robótico. Essas barras são circulares fabricadas em alumínio possuindo 10 mm de diâmetro, cuja finalidade é oferecer apoio ao braço quando este estiver movendo cargas, evitando que o braço realize qualquer movimento de inclinação.

Figura 75 – Barras de sustentação e suporte central de apoio



Fonte: elaborada pelo autor

As barras de sustentação são fixadas na base na sua parte inferior e numa estrutura circular na parte superior. Essa estrutura circular foi fabricada de resina poliéster e tem a função

de apoiar o primeiro elo do manipulador, conforme pode ser observado na Figura 76:

Figura 76 – Primeiro elo do braço robótico



Fonte: elaborada pelo autor

Esse primeiro elo do manipulador foi fabricado usando um cano circular de 40 mm de diâmetro fabricado em PVC de alta rigidez e reforçado internamente com resina poliéster. Esse elo permite o braço robótico realizar movimentos circulares no seu ambiente de trabalho e é apoiado lateralmente pela estrutura fabricada em resina poliéster.

Na Figura 77, pode-se perceber estrutura do segundo elo do braço robótico. Esse elo foi construído usando uma cantoneira de alumínio medindo 25mm de espessura.

Figura 77 – Segundo elo do braço robótico



Fonte: elaborada pelo autor



A escolha do alumínio como material para fabricação desse elo foi baseada na sua elevada rigidez e por ser relativamente leve. A proposta inicial era fazer esse elo fabricado de resina poliéster, entretanto, seu elevado peso dificultava os movimentos e forçava os servomotores no momento do acionamento.

#### 4.13 Servomotores

Nesse trabalho foram utilizados três servomotores para realizar os movimentos do braço robótico. Foi escolhido o modelo PDI-6221MG de alto torque para movimentar os dois elos principais que compõe braço e um servo motor de baixo torque modelo SG-90S para abrir e fechar a garra. Na Figura 78(a) é exibido o modelo PDI-6221MG e na Figura 78(b) é exibido o modelo SG-90S.

Figura 78 – Servomotores utilizados



Fonte: Filipeflop (2021)

Os servomotores responsáveis por movimentar o braço possuem engrenagens de ferro com torque aproximado de 20kgf/cm. Tal servo foi escolhido por proporcionar um elevado torque para o braço robótico, visto que o mesmo deve ter torque suficiente para suportar o peso do braço e de sua garra acoplada em uma de suas extremidades.

Figura 79 – Servomotores utilizados



Fonte: elaborada pelo autor

Conforme pode ser observado na Figura 79, a estrutura mecânica do motor modelo PDI-6221MG é extremamente robusta. Foi utilizado um desses motores na base para realizar os movimentos de rotação e outro para realizar os movimentos verticais. Foi observado que nenhum dos movimentos foram comprometidos, mesmo utilizando pequenas cargas na garra.

#### 4.14 Efetuador (garra)

O efetuador utilizado nesse trabalho é uma garra robótica produzida em liga PVC de alta resistência, em formato de pinça com função de agarrar objetos, possuindo uma abertura de aproximadamente 5.5cm. Na Figura 80, é exibida o aspecto da garra utilizada nesse trabalho.

Figura 80 – Garra robótica



Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 81, é exibido o servomotor modelo SG-90S utilizado na garra. Deve-se observar que essa garra possui um ângulo de abertura limitado, portanto, exigiu uma atenção especial no controle do ciclo ativo do sinal PWM de forma que o limite de abertura da garra não fosse extrapolada.

Figura 81 – Servomotor utilizado na garra robótica

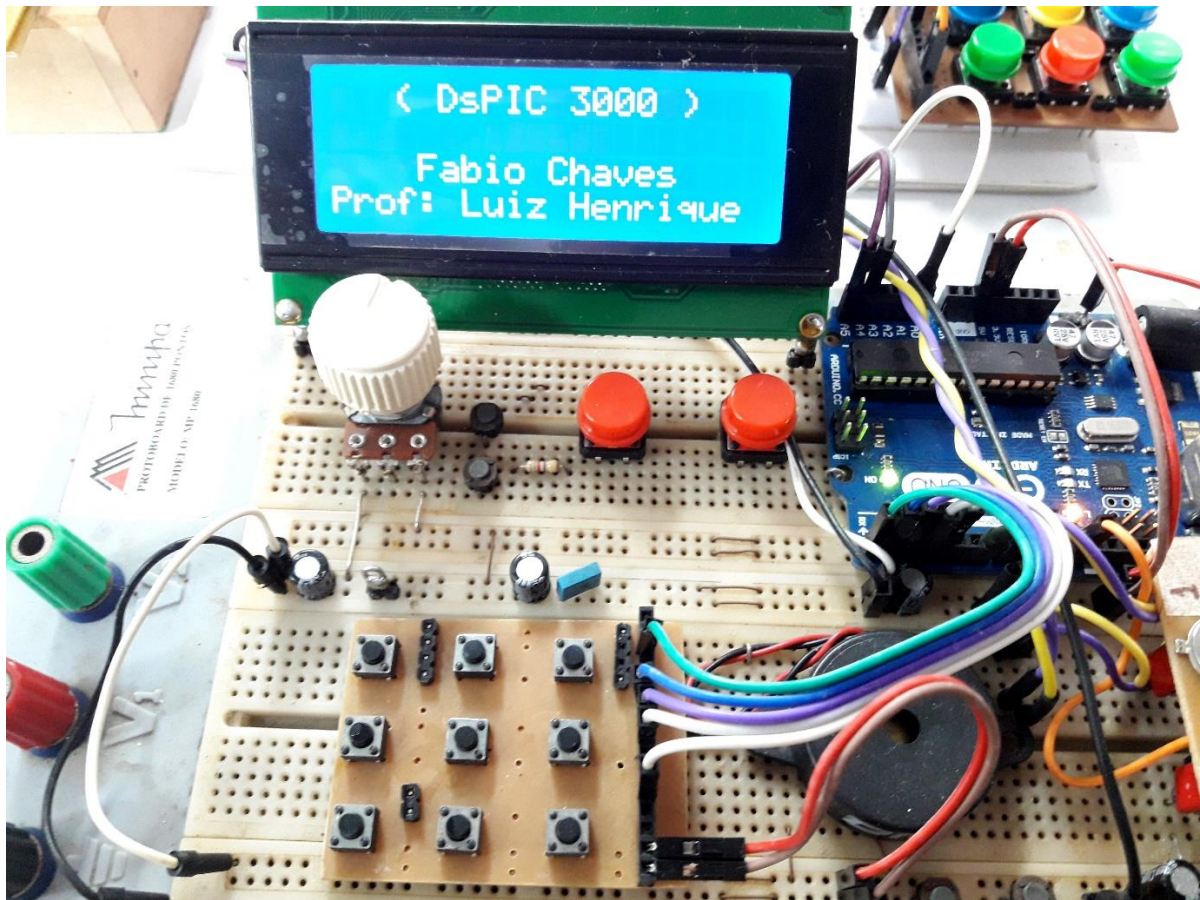


Fonte: elaborada pelo auto

#### 4.15 Arduino

Durante a operação do braço robótico houve a necessidade de monitorar os níveis de tensão do circuito integrado MC34940 correspondente à cada sensor capacitivo. Para isso foi utilizado um Arduino Uno conectado a um display 20x4 dotado de módulo conversor I<sup>2</sup>C. Essa montagem pode ser visualizada na Figura 82:

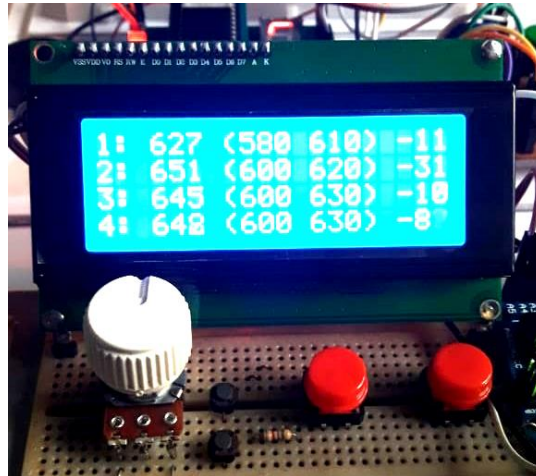
Figura 82 – Servomotor utilizado na garra robótica



Fonte: elaborada pelo auto

Com o objetivo de monitorar a tensão de saída no terminal LEVEL do MC34940, foi realizada uma integração com um Arduino Uno. Usando o conversor analógico/digital do Arduino foi possível monitorar a tensão no terminal LEVEL do MC34940 e exibir seu valor correspondente no display, permitindo assim, a visualização dos valores lidos nos sensores em tempo real e auxiliando na configuração da sensibilidade de cada sensor. Foi usado um display LCD com resolução de 20x4 usando comunicação I<sup>2</sup>C com o Arduino, conforme pode ser observado na Figura 83:

Figura 83 – Display LCD e conexão com Arduino



Fonte: elaborada pelo autor

Cada linha horizontal do display exibe quatro valores numéricos referentes à informações de cada sensor em particular. O primeiro valor numérico exibido corresponde ao resultado da conversão analógico/digital referente ao nível de tensão no terminal (LEVEL), que representa a leitura instantânea da capacitância de um sensor em particular.

O segundo valor representa o valor máximo de capacitância lido pelo sensor, o terceiro valor representa o valor mínimo de capacitância e o quarto valor corresponde à diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da capacitância medida.

Uma outra função do display é exibir barras gráficas correspondendo ao valor da capacitância lida para cada sensor individualmente, de maneira que o usuário consiga perceber a variação da capacitância com a aproximação da mão ao mesmo tempo em que pode visualizar numericamente esses valores.

Figura 84 – Barra gráfica no display LCD



Fonte: elaborada pelo autor



A troca entre a visualização dos valores numéricos e as barras gráficas pode ser realizada através de um botão do tipo *push-button* na *proto-board*. Deve ser observado, entretanto, que a presença da placa Arduino e do display LCD nesse trabalho é dispensável para a completa operação do braço robótico usando sensores capacitivos, visto que, esses itens foram inseridos no presente trabalho somente para visualização dos valores sendo monitorados pelo dsPIC30F4011. Fica claro, portanto, que o projeto pode ser implementado sem a necessidade desses dispositivos auxiliares.

#### 4.16 Programação

A programação do microcontrolador foi realizada inicialmente a través do compilador XC16 v.1.24 instalado no ambiente de desenvolvimento MPLABX v.5.15 fornecido pela empresa Microchip, que é o mesmo fabricante do microcontrolador dsPIC30F4011 usado nesse trabalho. Entretanto, à medida que o código-fonte foi crescendo, com a implementação de novas funções para controle do braço robótico, foi ficando cada vez mais difícil a utilização da linguagem nativa da Microchip, pois o nível de complexidade na programação aumentou proporcionalmente.

Para contornar esse problema, foi utilizado um outro compilador capaz de facilitar a programação. Foi utilizado o compilador CCS C fornecido pela empresa CCS Inc., que é uma plataforma *Integrated Development Environment* (IDE), ou seja, é um ambiente de programação integrado que usa linguagem de programação C específico para microcontroladores PIC. Na Figura 85, é possível ver a tela inicial desse programa com parte do código-fonte braço robótico exibido.

Figura 85 – Ambiente de programação integrado CCS C

```

1 #include <30F4011.h>
2 #device = 16c802
3 //#uses XT_PLL4,NOCDT,NOCPROTECT,NOBROWNDOUT,NODEBUG
4 //#uses XT_PLL4,NOCDT,NOCPROTECT,NOBROWNDOUT,NODEBUG,LPOL_HIGH,HPOL_HIGH,NOPIPPIN, PWRPIN
5 //#uses XT_PLL4,NOCDT,NOCPROTECT,NOBROWNDOUT,NODEBUG,LPOL_HIGH,HPOL_HIGH,NOPIPPIN, PWRPIN
6 //#use delay( crystal=4MHz, clock=10MHz)
7
8 //#use delay(clock=4MHz) //1MHz
9 #use delay(clock=64MHz) //10MHz
10 #use rs232 (baud=4800, parity=N, xmit=pin_f3, rcv=pin_f2, bits = 8)
11
12 #use fixed_io[0_outputs=PIN_B0,PIN_B2,PIN_B3,PIN_B4,PIN_B5,PIN_B6,PIN_B7,PIN_B8]
13
14 static int atraso = 0;
15 static int conta_sobe = 0, conta_desce = 0, conta_left = 0, conta_right = 0;
16 //static int conta_abre_garra = 0, conta_fecha_garra;
17 static int duty, duty_2,duty_3 = 0;
18 static int flag_abre_garra = 0, flag_fecha_garra = 0;
19
20 //int S_SOBRE,S_DIREITA,S_DESCER,S_ESQUERDA;
21
22 //int tempo = 0;
23
24
25
26
27 #define N 20 // número de valores da media móvel
28 static int V[N];
29 static int v2[N];
30 static int v3[N];
31 static int v4[N];
32 long soma, media = 0;
33
34

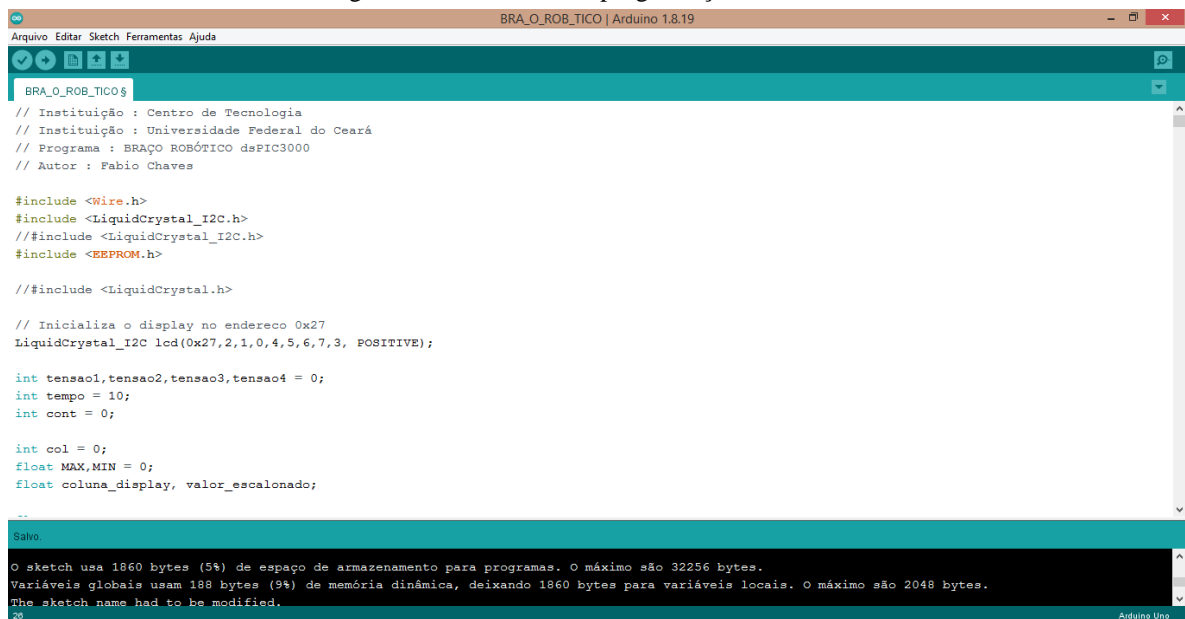
```

Fonte: elaborada pelo autor

O compilador CCS C integra operadores padrões da linguagem C e também funções específicas para manipulação dos registradores do dsPIC30F4011, permitindo a compilação do firmware, depuração do código desenvolvido e proporcionando ao desenvolvedor uma excelente experiência de programação desse tipo de dispositivo. O compilador CCS C traduz o programa do usuário, elaborado em linguagem padrão C, para linguagem de máquina e para isso, o compilador gera um arquivo de saída com extensão (\*.hex) que pode ser carregado pelo programa de gravação para realizar a programação do microcontrolador.

Um sketch é o nome do ambiente de programação usada na plataforma Arduino que contém o código-fonte que será carregado e executado na placa Arduino. Na Figura 86, é exibido o ambiente de programação do Arduino com um fragmento do programa utilizado no projeto desenvolvido nesse trabalho.

Figura 86 – Ambiente de programação do Arduino



```

BRA_O_ROB_TICO $
// Instituição : Centro de Tecnologia
// Instituição : Universidade Federal do Ceará
// Programa : BRAÇO ROBÓTICO dsPIC3000
// Autor : Fabio Chaves

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
//#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <EEPROM.h>

//#include <LiquidCrystal.h>

// Inicializa o display no endereço 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

int tensao1, tensao2, tensao3, tensao4 = 0;
int tempo = 10;
int cont = 0;

int col = 0;
float MAX, MIN = 0;
float coluna_display, valor_escalonado;

...
Salvo.
O sketch usa 1860 bytes (5%) de espaço de armazenamento para programas. O máximo são 32256 bytes.
Variáveis globais usam 188 bytes (9%) de memória dinâmica, deixando 1860 bytes para variáveis locais. O máximo são 2048 bytes.
The sketch name had to be modified.
20
Arduino Uno

```

Fonte: elaborada pelo autor

A linguagem de programação utilizada no Arduino é a linguagem C++, que é uma linguagem de alto nível, mas no caso do Arduino, apresenta pequenas modificações em relação ao C++ nativo.

#### 4.17 Gravação do firmware

Para gravar no microcontrolador o firmware desenvolvido no programa CCS C, foi utilizado o gravador USB PICKit 3, fabricado pela empresa Microchip. Trata-se de um

programador/gravador totalmente compatível com o software MPLAB, também da empresa Microchip, no qual é possível realizar a gravação do firmware e realizar depuração do programa em busca de erros. Na Figura 87, é possível observar o gravador utilizado nesse trabalho.

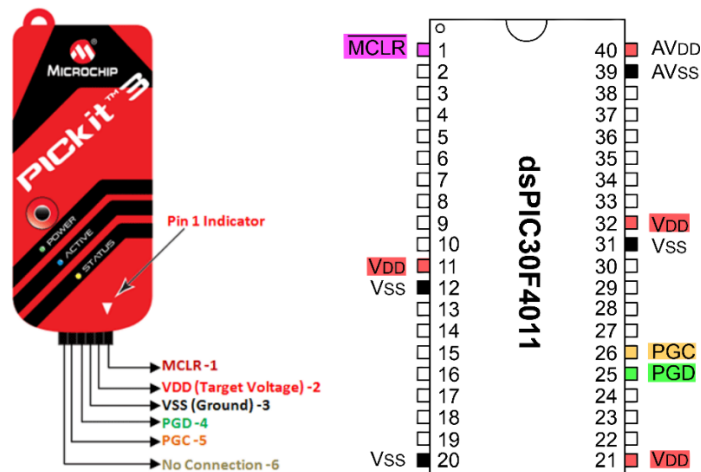
Figura 87 – Gravador/depurador USB Pickit 3



Fonte: CasaDaRobotica.com (2021)

O programador PICKit 3 possui capacidade ser conectado diretamente ao microcontrolador para operar no modo *In-circuit Serial Programming* (ICSP). Esse tipo de operação permite gravar o firmware no microcontrolador sem a necessidade de retirá-lo da placa de controle, facilitando bastante o trabalho e reduzindo consideravelmente o tempo de conclusão do projeto. O programador possui um conector dotado de cinco pinos de I/O necessários para colocar o dsPIC em modo de gravação e realizar a transferência do código compilado para dentro da memória *flash* do dispositivo. Na Figura 88, é possível visualizar todos os terminais de conexão do gravador PICKit3 e os terminais correspondentes no microcontrolador dsPIC30F4011, para que seja possível realizar a gravação do firmware no dispositivo.

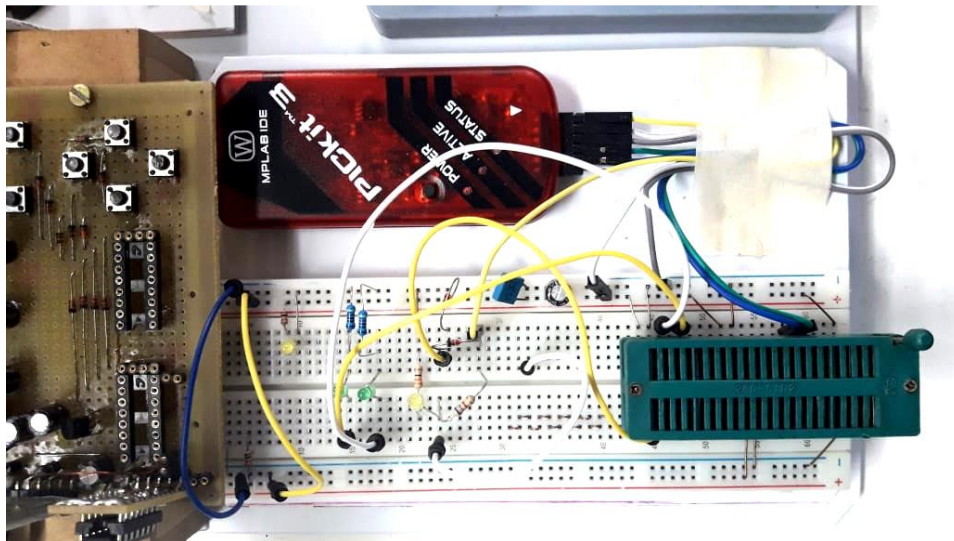
Figura 88 – Terminais de conexão do gravador Pickit 3



Fonte: elaborada pelo autor

Entretanto, nesse trabalho optou-se por fazer a gravação do firmware retirando o microcontrolador da placa de controle, pois ao utilizar a programação In-circuit, foi percebido que os motores eram acionados involuntariamente durante a operação de programação. Para tanto foi utilizada uma protoboard conectada ao programador PICKit 3 e utilizando um soquete do tipo *Zero Insertion Force (ZIF)*, conforme pode ser observado na Figura 89:

Figura 89 – Adaptação do gravador PICKit3



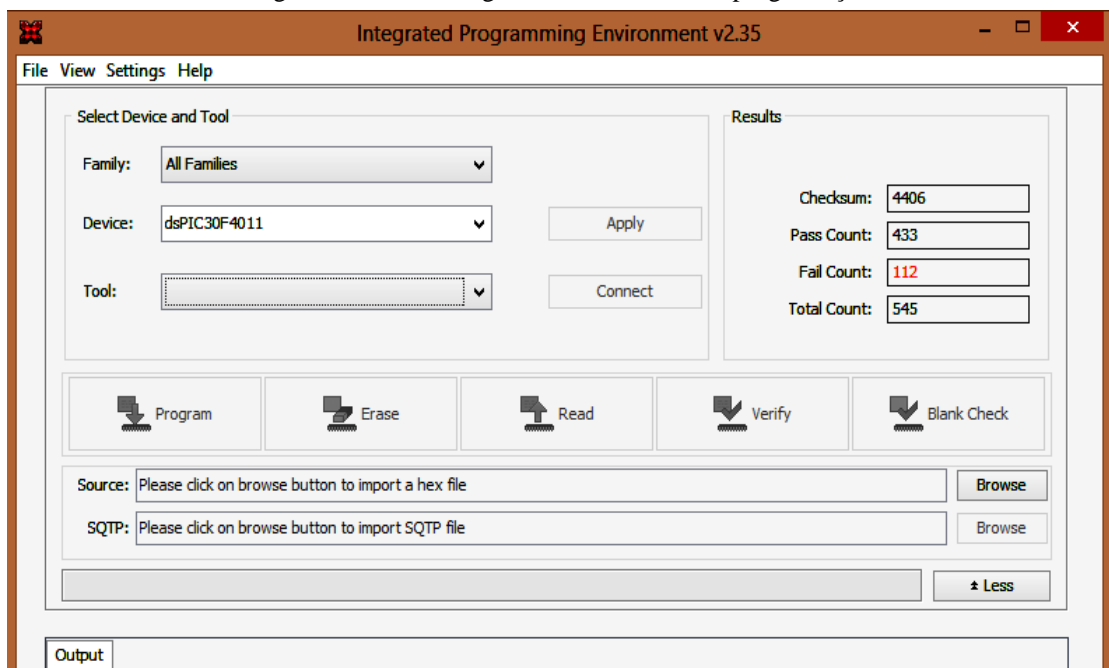
Fonte: elaborada pelo autor

O Programador PICKit 3 permite a depuração e programação de microcontroladores PIC e dsPIC usando a interface gráfica MPLAB. O MPLAB IDE, ou ambiente de desenvolvimento integrado, é uma interface gráfica do usuário que possui integração com o gravador, no qual é possível realizar a programação e também a gravação do firmware. Nesse



trabalho optou-se por utilizar o módulo *Integrated Programming Environment (IPE)*, versão 2.35. O software IPE é uma interface de gravação de firmware contido dentro do ambiente do MPLAB e permite gravar firmwares desenvolvidos em qualquer linguagem de programação e em qualquer outra plataforma apenas carregando o arquivo com extensão (\*.hex). Esse software permite identificar o microcontrolador que será gravado e faz verificação de erros após realizar a gravação. Na Figura 90, é possível observar a interface gráfica do ambiente de programação IPE V2.35.

Figura 90 – Interface gráfica do ambiente de programação



Fonte: elaborada pelo autor

Resumindo, para gravação do código-fonte no dsPIC30F4011 foi utilizado o gravador PICkit™ 3 da Microchip™ e o ambiente de programação MPLAB IPE v2.35, no qual foram realizados um total de 545 gravações de firmware até a conclusão do projeto.

#### 4.18 Modos de operação

Em termos gerais, o funcionamento do braço robótico se baseia na leitura da capacitância pelos sensores e em seguida realizar o movimento correspondente no braço. Existem duas possibilidades de operar o manipulador através de sensores capacitivos. Na primeira possibilidade, os movimentos no manipulador acompanham gradualmente o movimento da mão do operador sobre a face dos sensores.

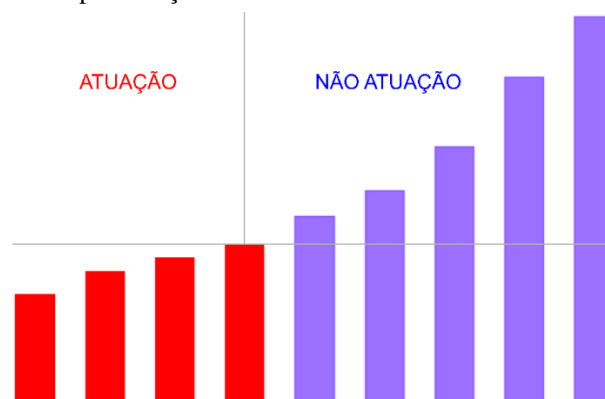
Ou seja, se o operador desloca sua mão a partir de um determinado ponto do espaço e vai aproximando gradualmente em direção à superfície do sensor, então, o braço robótico acompanhará esse movimento de forma suave. Do contrário, quando o operador afastar a mão novamente, o braço robótico responderá da mesma forma, deslocando-se num movimento de retração, da mesma forma que a mão do operador faz. Dito de outra maneira, o braço robótico acompanhará todos os movimentos realizados pela mão do operador em cada instante de tempo.

Outra possibilidade de operação é fazer o braço robótico se movimentar somente à partir de um determinado valor de capacitância, tomado como valor de referência, medida pelos sensores. Esse valor de capacitância de referência fica armazenado na memória interna (EEPROM) do microcontrolador dsPIC30F4011 e será usado como valor base na tomada de decisão para realizar ou não um determinado movimento do braço robótico.

Ou seja, nesse tipo de atuação, os movimentos do braço já não serão tão suaves quanto na primeira possibilidade. Os movimentos serão de acionamento e parada em relação à um determinado valor de capacitância programada, sendo portanto, esse tipo de acionamento adotado nesse trabalho. Entretanto é possível realizar aperfeiçoamentos futuros no projeto de forma a operar de acordo com a primeira possibilidade de acionamento. A diferença básica entre os dois modos de operação está no sistema de controle utilizado, que no primeiro caso, utiliza sistema de controle em malha fechada e no segundo caso utiliza sistema de controle em malha aberta.

Apenas para exemplificar o conceito envolvido no método de operação usado nesse trabalho, no Gráfico 3, é exibido um conjunto de barras representando genericamente a distância medida da mão do operador em relação à face do sensor, sendo a barra à direita, a maior distância tomada como ponto de partida para esse exemplo teórico.

Gráfico 3 – Representação em barras da distância da mão à face do sensor



Fonte: elaborada pelo autor

À medida que o operador aproxima a mão da face do sensor, a capacitância aumenta gradativamente. Em uma determinada distância, representada pelos blocos vermelhos, a capacitância medida alcança um valor limite que é igual ao valor programado no microcontrolador. A partir desse ponto, qualquer valor de capacitância que seja acrescentada ao sensor, ou seja, aproximando mais ainda a mão do operador, o circuito ativa os motores e passa à realizar movimentos no braço robótico. Se a mão for afastada novamente da face do sensor, o motor pausa o movimento e o braço fica inerte. Portanto, esse método ativa ou desativa os motores do braço robótico em função da capacitância tomada como referência, sendo esse método de operação adotado nesse trabalho. Na subseção sobre calibração dos sensores será abordado o método empregado para realizar a configuração e programação do valor de capacitância que será tomada como referência par o movimento do braço robótico.

#### 4.19 Calibração dos sensores

Para configurar e salvar o valor de capacitância que será tomada como valor de referência para acionamento dos motores do braço robótico basta realizar dois procedimentos bastante simples, que será demonstrado em seguida.

Para realizar o procedimento de salvamento do valor de capacitância desejado, foi utilizado o botão central do tipo *push button* da placa de controle manual do braço robótico. A Figura 91 exibe novamente a placa de controle manual do braço robótico utilizada nesse trabalho com destaque do botão central em cor amarela, que será usado para salvamento do valor de capacitância de referência.

Figura 91 – Botões de controle manual do braço robótico



Fonte: elaborada pelo autor

O primeiro procedimento a ser realizado para configuração do sensor é posicionar a mão do operador sobre a face do sensor à uma distância desejada, conforme é indicado na Figura 92. Nessa distância escolhida, o sensor capacitivo medirá um valor de capacitância que será o valor de referência para controle do braço robótico.

Figura 92 – Posicionamento da mão do operador sobre a face do sensor



Fonte: elaborada pelo autor

Deve ser observado que, quanto mais afastado estiver a mão do operador, uma vez salvo esse valor como referência, mais distante o operador poderá manusear o braço robótico. Portanto, em termos práticos, mais sensível será a detecção dos movimentos pelo circuito leitor de capacitância. Outro fato que deve ser observado é que, só é necessário escolher um único sensor para realizar essa configuração e todos os demais sensores serão configurados automaticamente com o mesmo valor de referência.

Uma vez que a mão do operador está posicionada à uma distância desejada do sensor, então, para realizar o segundo procedimento de configuração dos sensores, basta pressionar o botão amarelo localizado no centro da placa de controle manual do braço robótico, conforme pode ser observado na Figura 93:

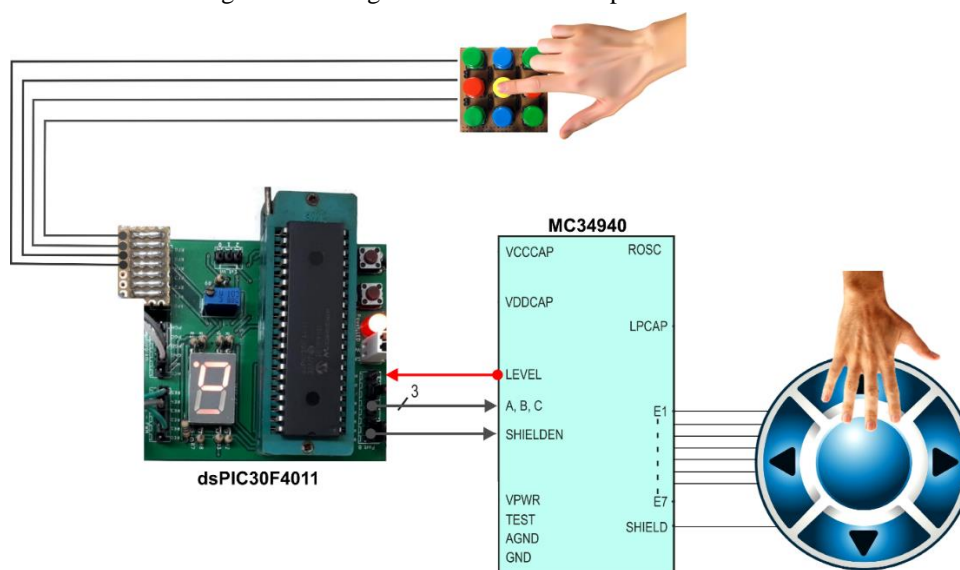
Figura 93 – Procedimento de gravação do valor de capacitância de referência



Fonte: elaborada pelo autor

Então, a partir desse ponto, os sensores estarão completamente configurados e prontos para uso. Ao pressionar o botão amarelo no centro da placa de controle manual, uma rotina de programa executará os procedimentos de salvar o valor de tensão na memória EEPROM interna do microcontrolador dsPIC30F4011. Esse valor de tensão é medido no pino LEVEL do MC34940, que corresponde ao valor da capacitância medida naquele momento. Na Figura 94, é possível observar as conexões entre a placa de controle manual e os demais itens de controle do braço robótico.

Figura 94 – Diagrama de conexões da placa de controle



Fonte: elaborada pelo autor

Portanto, de forma resumida, o procedimento de configuração dos sensores se resume em dois passos básicos:

- 1 – Posiciona a mão sobre o sensor na distância pretendida;
- 2 – Pressiona o botão amarelo na placa de controle;

Após realizar a configuração dos sensores, o manipulador robótico estará apto a ser movimentado através do deslocamento da mão do operador sobre a face dos sensores capacitivos.

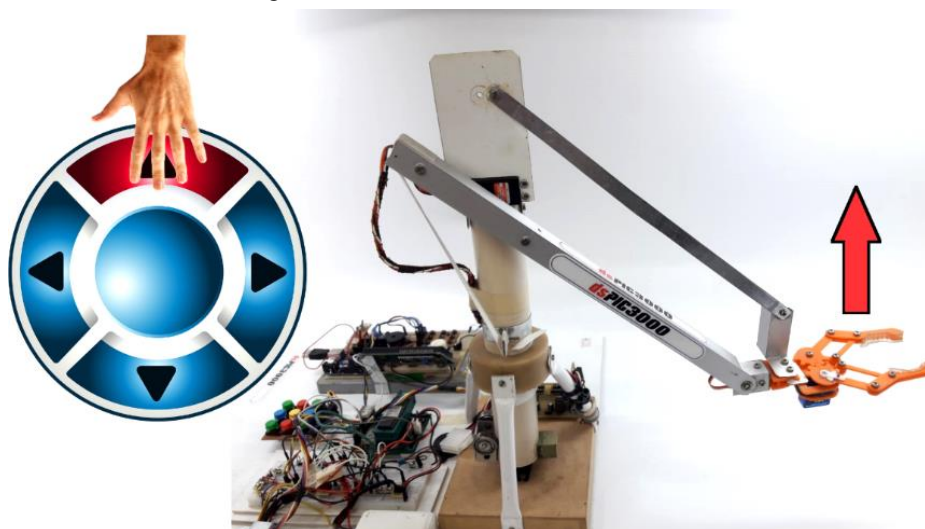
#### 4.20 Movimentação do braço robótico

A movimentação do braço robótico pode ser realizado através dos quatro sensores disponíveis, que são suficientes para efetuar todos os movimentos necessários para essa

aplicação. Cada movimento realizado no braço robótico será acompanhado de uma descrição de quais sensores devem ser utilizados.

Para realizar o movimento de deslocamento vertical para cima, basta posicionar a mão sobre o sensor superior, e este aciona o motor responsável por realizar esse movimento. A Figura 95 exibe a posição do sensor e o movimento correspondente no braço robótico.

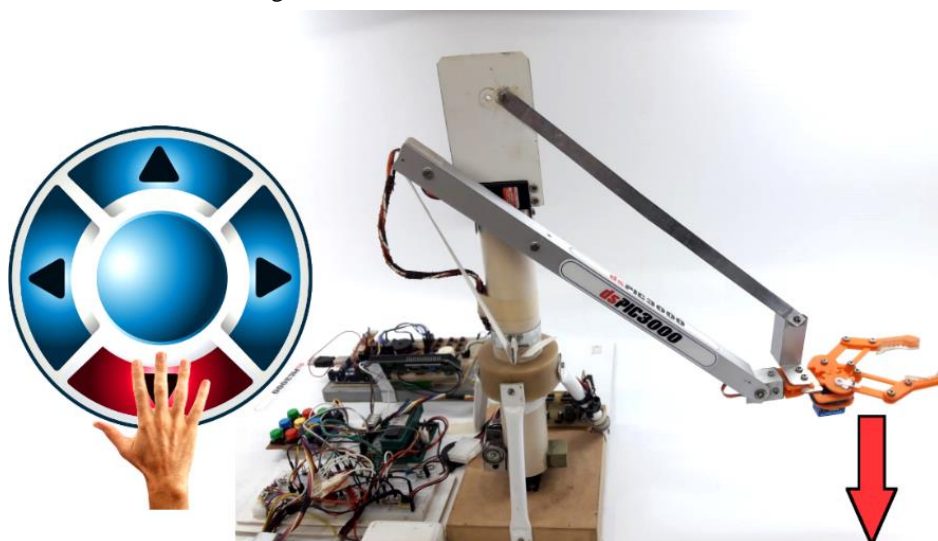
Figura 95 – Movimento vertical de subida



Fonte: elaborada pelo autor

Para realizar o movimento de deslocamento vertical para baixo, basta posicionar a mão sobre o sensor inferior, e este aciona o motor responsável por realizar esse movimento. A Figura 96 exibe a posição do sensor e o movimento correspondente no braço robótico.

Figura 96 – Movimento vertical de descida

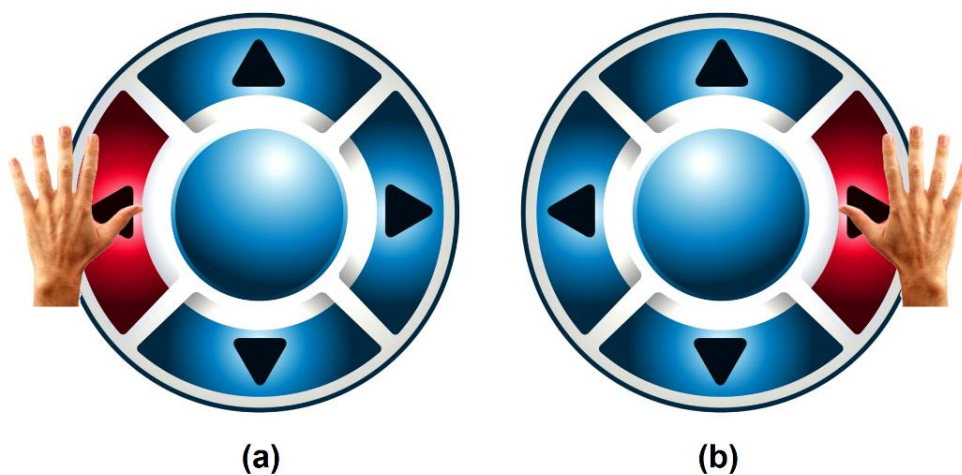
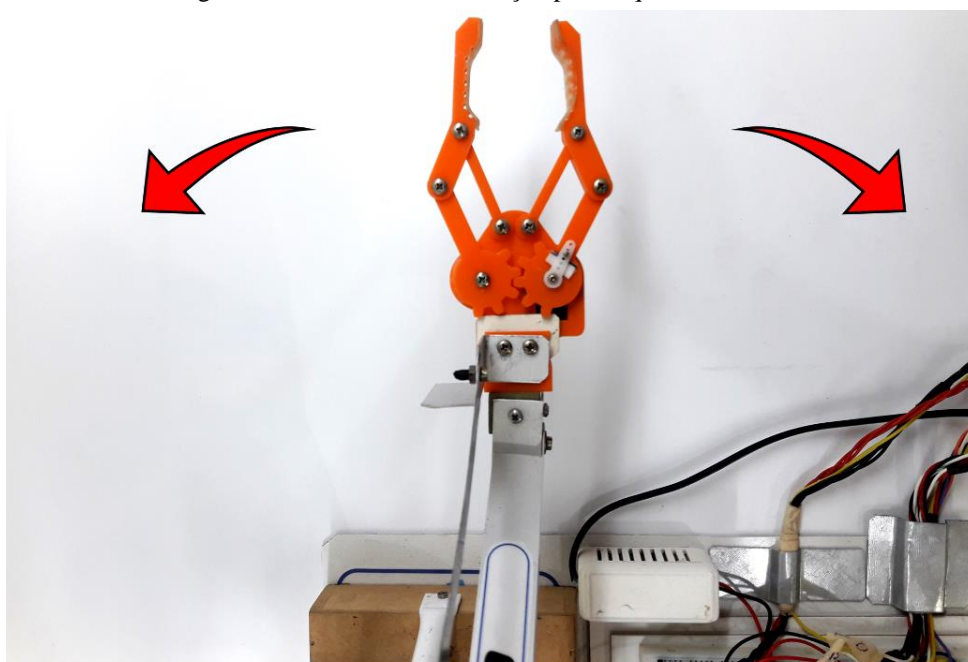


Fonte: elaborada pelo autor



Para realizar o movimento de giro horizontal para direita ou para esquerda, basta posicionar a mão sobre um dos sensores laterais, e estes acionam os motores responsáveis por realizar esses movimentos. A Figura 97(a) exhibe o movimento de giro para esquerda e a Figura 97(b) mostra o movimento de giro para direita

Figura 97 – Movimento de rotação para esquerda ou direita



Fonte: elaborada pelo autor

Para realizar o movimento de abertura da garra, basta posicionar as mãos nos dois sensores localizados na horizontal, de forma simultânea, conforme mostra a Figura 98(a). Para realizar o movimento de fechamento da garra basta posicionar as mãos nos dois sensores localizados na vertical de forma simultânea, conforme indica a Figura 98(b):

Figura 98 – Movimentos de abertura e fechamento da garra



Fonte: elaborada pelo autor

Portanto, conforme é possível perceber, os procedimentos de manuseio do braço robótico, utilizando sensores capacitivos, são extremamente fáceis e práticos, caracterizando uma maneira eficiente de realizar esse tipo de operação.

#### 4.21 Alimentação

Para realizar alimentação de todos os componentes do braço robótico, foi utilizado uma fonte de alimentação de computador ATX modelo RS-350-PSAR-I3 da marca CoolerMaster com potência nominal de 350W RMS conforme a Figura 99:

Figura 99 – Fonte de alimentação do braço robótico

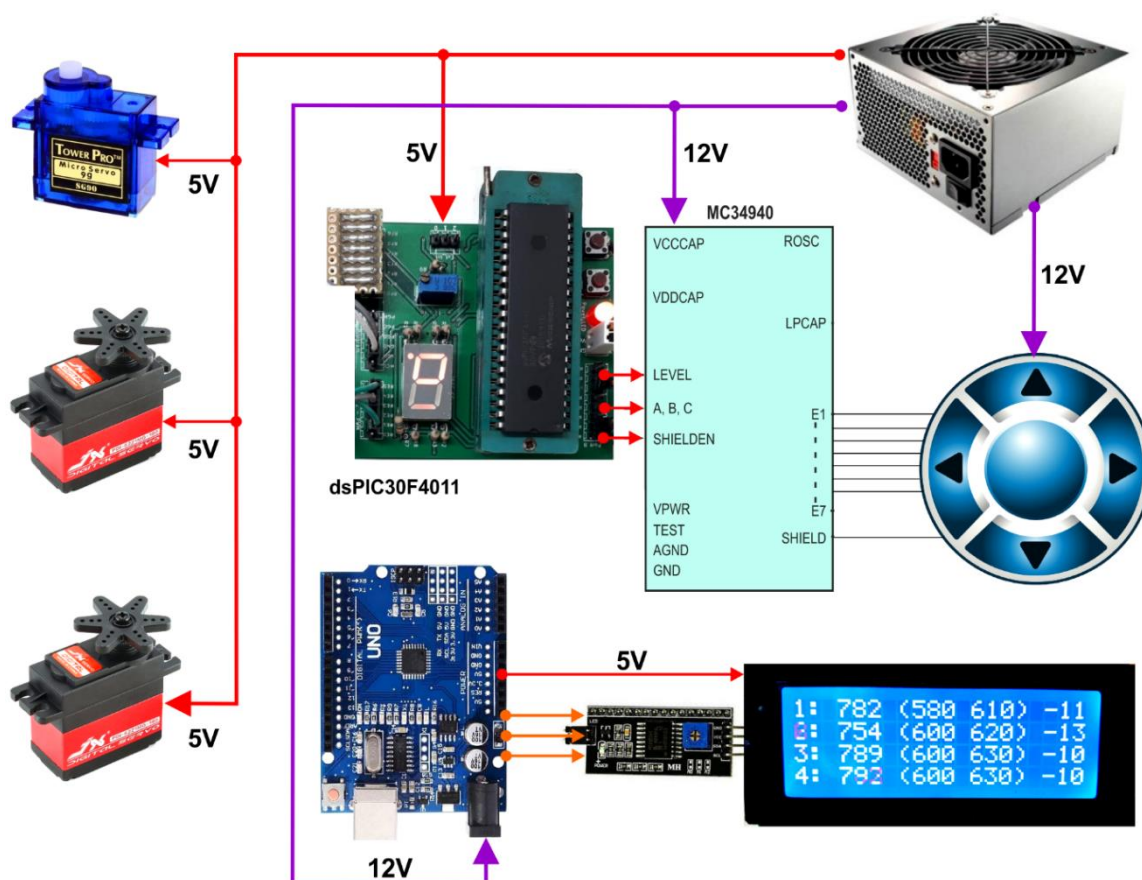


Fonte: CoolerMaster (2021)



A escolha no uso de uma fonte computador para alimentar todos os componentes do braço robótico foi o fato de fornecer um potência suficiente para alimentar os motores, pois são motores de elevado torque apresentam um consumo considerável. Outro motivo dessa escolha é o fato da fonte ATX possuir saídas com nível de tensão 12V e 5V, pois os circuitos eletrônicos do baço robótico apresentam níveis de tensão distintos, conforme pode ser visualizado na Figura 100:

Figura 100 – Níveis de tensão na alimentação do braço robótico



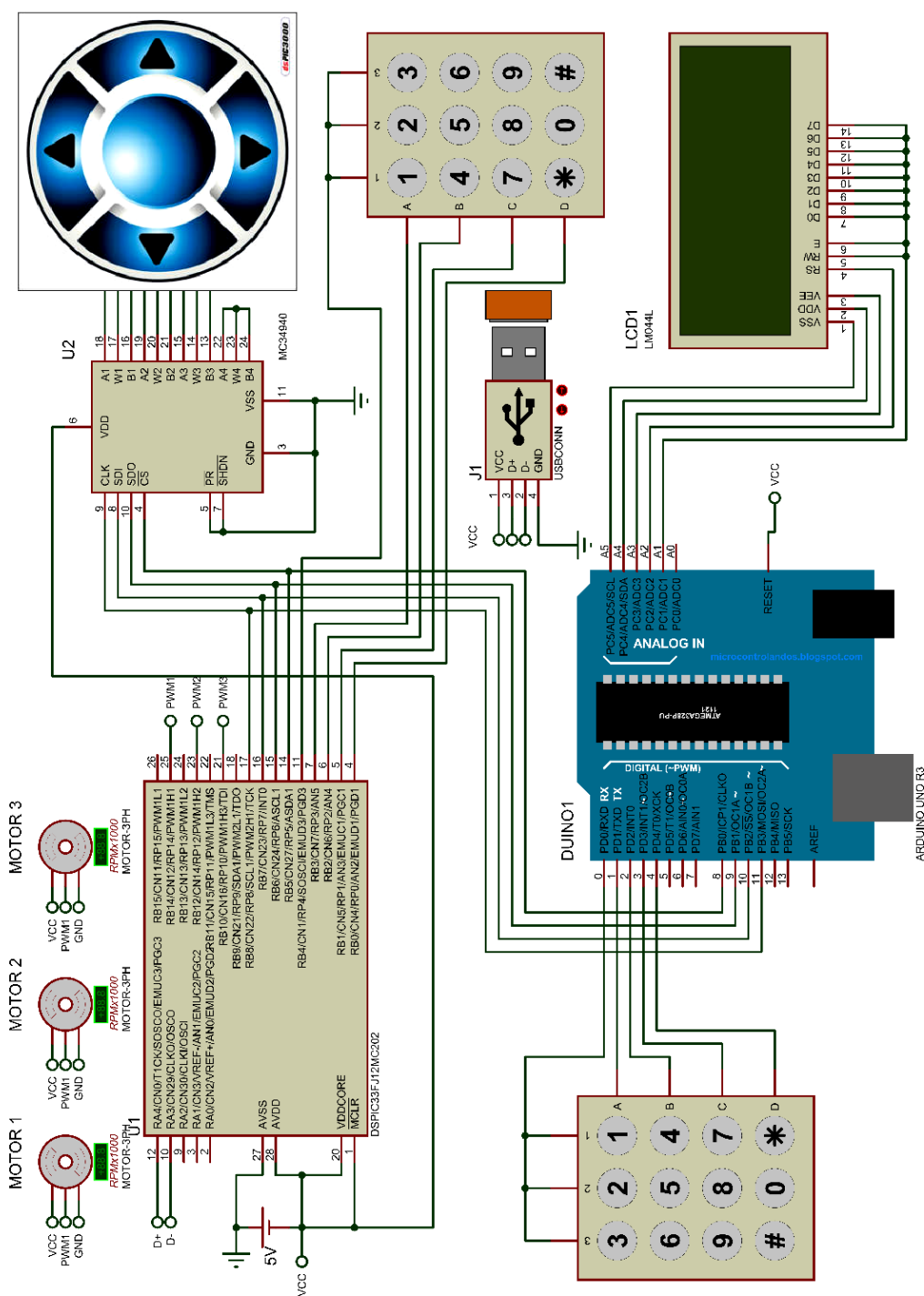
Fonte: elaborada pelo autor

Portanto, conforme foi possível observar na Figura 100, diferentes circuitos utilizam níveis de tensão alimentação diferentes, Assim, a escolha por utilizar uma boa fonte de computador pareceu ser uma opção óbvia.

## 4.22 Esquemático

A Figura 101 apresenta um esquemático de toda a montagem elaborada no software Proteus ISIS versão 8.9 SP0 desenvolvido pela empresa Labcenter Electronics.

Figura 101 – Esquemático da montagem



Fonte: elaborada pelo autor

Esse diagrama esquemático foi elaborado com o propósito de visualização das conexões entre os elementos que compõe o sistema de controle do braço robótico. Entretanto, não foi possível realizar a simulação do circuito no software Proteus, pois alguns componentes não existem na biblioteca oficial do programa e portanto impossibilitando a simulação.

### 4.23 Problemas encontrados

Durante o processo, aconteceram alguns problemas, sendo:

1. A programação do DsPIC diretamente na placa de controle usando ICSP não funcionou muito bem. Na grande maioria das tentativas a gravação falhou! O problema foi sanado inserindo um diodo 1N4148 no pino MCLR, pois sem esse diodo, a corrente enviada pelo gravador não era o suficiente para gravar, pois parte dessa corrente era desviada para o Vcc;
2. A confecção dos sensores foi desafiador, pois pequenas diferenças nas dimensões modificavam significativamente as leituras. O problema foi resolvido usando cortes precisos nas placas de zinco;
3. O ajuste do ciclo de trabalho no módulo PWM foi crítico, pois o clock do sistema inicialmente estava muito alto para ser usado nesse tipo de servomotor. O problema foi corrigido reduzindo o clock do sistema para 1MHz e para isso foi usando um cristal de 4MHz;
4. A confecção da placa de circuito impresso que contém o MC34940, inicialmente foi trabalhosa por conta das trilhas muito finas. Com o aperfeiçoamento da técnica (usando método fotográfico) foi possível fazer a PCI com uma espessura de trilha adequada.

De uma forma abrangente, as dificuldades encontradas serviram de base para o aprimoramento das técnicas utilizadas para confecção dos elementos constituintes do braço robótico e os sensores, permitindo o aperfeiçoamento dos métodos empregados e uma compreensão global do projeto.

### 4.24 Material utilizado

Para a confecção do braço mecânico e dos sensores capacitivos, foram utilizados os materiais relacionado a seguir:

- 2 - Sevos motores 20Kgf/cm modelo PDI6221MG;
- 1 – Servo motor modelo SG90S;
- 1 – Garra robótica PVC de alta densidade;
- 1 – Cantoneira de alumínio e Tubo de alumínio (1 metro);
- 1 – Madeira MDF;

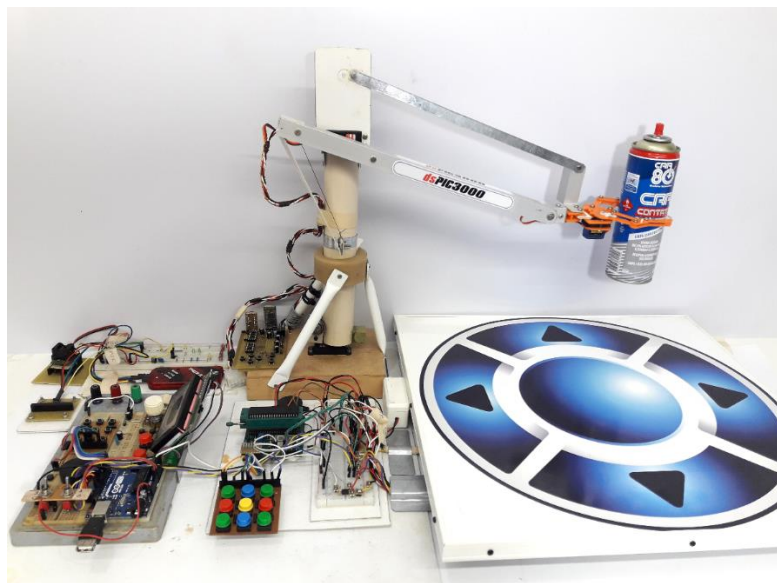
- 1 – Arduino UNO R3;
- 1 – Display LCD 20x4 com Módulo I<sup>2</sup>C para Arduino;
- 1 – Protoboard Minipa;
- 1 – Circuito Integrado MC34940;
- 1 – Microcontrolador dsPIC30F4011;
- 1 – Gravador PICKit3;
- 1 – Folha de PVC 3mm e Cano PVC 65 mm;
- 1 – Vinil com Impressão material gráfico;
- 2 – Soquetes ZIF;
- 9 – Botões Push-Button;
- 2 – Placa PCI, Fotolito, Tinta foto-sensível, Jumpers, Resina;

Para concepção desse trabalho, como pode ser observado, requer uma quantidade apreciável de componentes. Entretanto, alguns itens podem ser suprimidos do projeto, visto não serem essenciais para o perfeito funcionamento do braço robótico.

#### 4.25 Montagem final

Na Figura 102, é possível observar a montagem final do braço robótico com os sensores capacitivos ao lado.

Figura 102 – Montagem final do braço robótico com os sensores capacitivos



Fonte: elaborada pelo autor

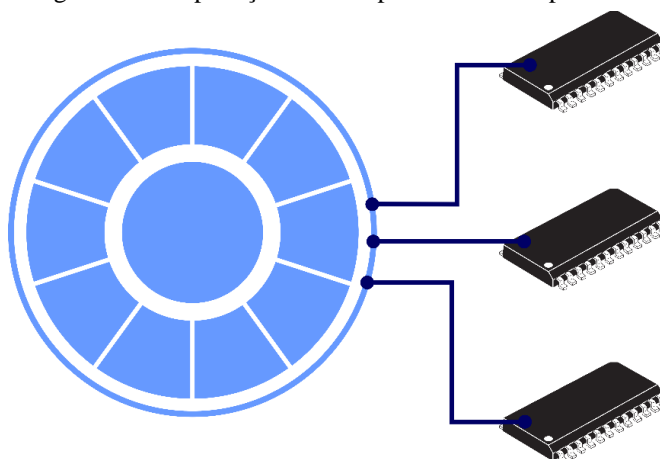
Como se trata de um projeto cuja finalidade é apresentar o conceito e a flexibilidade de controle usando sensores capacitivos, o uso de protoboards foi fundamental nos testes. Isso fez com que a estrutura final do dispositivo se apresentasse volumosa. Entretanto, em uma concepção mais profissional, pode-se condensar todos os componentes eletrônicos em uma única placa de circuito impresso, fazendo com que o volume final seja drasticamente reduzido.

#### 4.26 Sugestão de melhorias

Uma possibilidade de aperfeiçoamento do controle do braço robótico é utilizar método de controle em malha fechada usando estratégia *Proportional, Integral, Derivativo* (PID) para suavizar os movimentos.

Outra possibilidade de aperfeiçoamento envolve a ampliação da quantidade de sensores de forma à ser possível integrar os medidores de capacitância em um sistema de múltiplos sensores. Uma das possibilidades para expandir a quantidade de dispositivos à serem usados para medir capacitância é cascadeando vários MC34940 ou usar outro modelo com mais sensores de entrada, como por exemplo, o MC33794 que possui nove entradas de sensores. A Figura 103 exibe uma possibilidade de implementação.

Figura 103 – Aplicação de múltiplos sensores capacitivos



Fonte: elaborada pelo autor

A vantagem de se utilizar uma quantidade maior de sensores está no fato de se poder suavizar a transição entre as posições que o braço robótico pode ocupar. Outra possibilidade de melhoria está na possibilidade de usar Bluetooth ou Wifi como forma de substituir os cabos de comunicação entre os sensores e a placa de controle, permitindo o controle do braço robótico à distância.

## 5 CONCLUSÃO

Toda a montagem do braço robótico e a fabricação dos sensores capacitivos para controle do braço foram feitas utilizando-se elementos de fácil aquisição no mercado. A estrutura física do braço robótico foi concebida usando vários elementos rígidos para dar robustez do braço, e todo o processo é detalhado em 26 tópicos constantes no capítulo de desenvolvimento. Como resultado final, foi apresentado o braço robótico completamente operacional, funcionando sob controle manual sem contato físico, por meio dos sensores capacitivos desenvolvidos.

Conforme constatado em testes práticos, o controle do braço robótico usando sensores capacitivos apresentou excelentes resultados, superando até mesmo as expectativas, visto que a correspondência dos movimentos do braço robótico em relação aos movimentos desejados e realizados nos sensores ocorreu de forma suave e precisa, ainda que não tenha sido utilizado nenhum tipo de controle em malha fechada, o que garantiria uma precisão ainda maior dos movimentos. Observou-se, também, que o sistema apresentou excelente estabilidade em todos os momentos em que os testes foram realizados, desde a sua concepção até a presente data. Então, pode-se concluir que o trabalho tem potencial de oferecer benefícios tais como, aperfeiçoamento dos controladores usados nos manipuladores robóticos industriais, aumentando sua durabilidade, pois não usa elementos mecânicos, permitir que operadores portadores de alguma deficiência manual possam operar o braço robótico, além da possibilidade de implantar a tecnologia de controle capacitivo em outros sistemas que necessitem de um operador controlador.

É importante salientar que parte do valor de uma pesquisa científica está no fomento a novas iniciativas que dela possam partir. Assim, sugere-se, a título de futuros estudos, ampliar a quantidade de graus de liberdade do braço robótico, assim como integrar sensores nas juntas alimentando um sistema de controle em malha fechada e elaborar o controle com um maior número de sensores capacitivos. É iniciativa também possível a adaptação do sistema para outras finalidades que não sejam braços robóticos.

O projeto desenvolvido neste trabalho permitiu ampliar e solidificar conhecimentos à respeito do uso de sensores capacitivos numa aplicação específica da robótica. A concepção deste projeto não é limitativa, pois permite sua aplicação em muitas outras áreas de interesse da engenharia, visto que o sensoriamento capacitivo pode ser aplicado em qualquer operação em que se deseje controlar. Nesta aplicação particular do presente trabalho, o sistema de controle do braço robótico utilizando sensores capacitivos apresentou desempenho bastante satisfatório, comprovando a robustez e eficácia na utilização desse tipo de aplicação.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Mônica Raquel. **Identificação experimental do atrito em atuadores pneumáticos**. 2018. 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica – Campus Panambi) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, DCEEng - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, 2018. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/5407/Monica%20Raquel%20Alves.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 jan. 2022.

BORIM, Andréa Carla Alves; PINTO, Carlos Alberto Ramos. **Medição de umidade no solo através de sensores capacitivos**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, [s. l.], v. 16, n. 16, p. 51-60, 2021. Disponível em: <https://exatastechnologias.pgskroton.com.br/article/view/2395/2299>. Acesso em: 3 fev. 2022.

BUENO, Felipe Oliveira. **Desenvolvimento e construção de um robô pneumático do tipo gantry para aplicações agrícolas em estufas**. 2018. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica – Campus Panambi) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2018. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/5406/Felipe%20Oliveira%20Bueno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 2 fev. 2022.

CARRARA, Valdemir. **Introdução à robótica industrial**. São José dos Campos: INPE, 2015. 101 p. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.25.14.16/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2022.

CARVALHO, Renon Steinbach. **Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade**. 2009. 136 p. Dissertação Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106655/264491.pdf?se>. Acesso em: 29 jan. 2022.

CASA DA ROBÓTICA. **Catálogo: Microcontroladores PIC**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.casadarobotica.com/componentes-eletronicos/componentes/microcontroladores-pic/programador-kit3-pickit-3-gravador-de-pic-adaptador-zif-40-pinos>. Acesso em: 15 jan. 2021.

COOLER MASTER. **Catálogo: Power Supplies**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.cooler-master.com/catalog/power-supplies/#!/sort=Series>. Acesso em: 15 jan. 2021.

COOPER, Donald; SCHINDLER, Pamela. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Artmed, 2001.

FILIFELOP. **Servos**. Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://www.filieflop.com/categoria/robotica/servos>. Acesso em: 15 jan. 2021.

FREESCALE, Semiconductor. **Electric Field Imaging Device**: Technical Data. Freescale Semiconductor: NXP, 2006. 12 p. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC34940.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, W. **Fundamentos de Física**. v. 3, 9. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2013.

HAYT, William H., Jr.; Buck John A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: AMGH Editora Ltda - McGrawHill, 2013.

JACINTO, Laura Aparecida; BUGATTI, Ildeberto de Genova. Garra robótica automatizada. **Revista Eletrônica e-F@tec**, Fatec Garça, ano 2017, p. 1-12, 2017. Disponível em: <https://fatecgarca.edu.br/ojs/index.php/efatec/article/view/39/37>. Acesso em: 28 jan. 2022.

KEEN, R. G. **Effects Building Techniques Version 1.2**. [S. l.], 1999. Disponível em: [http://www.geofex.com/Article\\_Folders/protostyles/proto\\_styles.htm](http://www.geofex.com/Article_Folders/protostyles/proto_styles.htm). Acesso em: 15 jan. 2021.

MAZZAROPPI, Marcelo. **Sensores de movimento e presença**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ - Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001369.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2022.

MENDONÇA, Lucas Gonçalves Dias. **Micro-sensor capacitivo para avaliação da qualidade de combustíveis automotivos**. 2008. 133 p. Dissertação Mestrado (Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2008. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-30092008-173401/publico/Micro\\_sensor\\_Capacitivo\\_Revisada\\_01.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-30092008-173401/publico/Micro_sensor_Capacitivo_Revisada_01.pdf). Acesso em: 4 jan. 2022.

MENDONÇA, Márcio *et al.* Desenvolvimento de um braço robótico controlado por arduino. **Fundamentos Gerais de Projetos das Máquinas**: Engenharia III, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p. 191-197, 2016. Disponível em: <https://ojs.ifsp.edu.br/index.php/sinergia/article/view/83/339>. Acesso em: 18 nov. 2021.

DSPIC30F4011. **Catálogo**: Microchip Microcontrollers. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/dsPIC30F4011>. Acesso em: 15 jan. 2021.

RMC Series Thick Film Resistors - SMD. **Catálogo**: Film Resistors. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://br.mouser.com/c/passive-components/resistors/film-resistors/thick-film-resistors-smd/?series=RMC&pop=2f6le>. Acesso em: 17 jan. 2021.

OLIVEIRA, Jonatan de. **Projeto e construção do protótipo de um robô articulado com três graus de liberdade acionado por motores elétricos**. 2017. 98 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica – Campus Panambi) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2017. Disponível em:



<https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/4737/Jonatan%20de%20Oliveira.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 jan. 2022.

REIS, L. G. **Produção de monografia: da teoria à prática**. 2. Ed. Brasília: SENAC-DF, 2008.

ROMANO, V.; DUTRA, M. Introdução a robótica industrial. *In: Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processo*, São Paulo: Edgard Blücher, p. 1-19, 2002.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

SILVA, Victor Furtado da. **Sensor capacitivo microcontrolado**. 2013. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia de Computação) - Centro Universitário de Brasília - Uniceub, Brasília, 2013. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/187129715.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2021.

Touch Sensing. **Catálogo: Touch Sensing**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.synaptics.com/technology/touch-sensing>. Acesso em: 13 jan. 2021.

FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications. [S. l.]: Texas Instruments, 2014. Disponível em: [https://www.ti.com/lit/an/snoa927a/snoa927a.pdf?ts=1642944505513&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/snoa927a/snoa927a.pdf?ts=1642944505513&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). Acesso em: 9 jan. 2022.

Adesivo Vinil PVC – Fluorescente Azul. **Catálogo: Vinil**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://www.trianguloscreenonline.com.br/store/?product=adesivo-vinil-pvc-fluorescente-azul-alto-brilho>. Acesso em: 05 jan. 2021.

VALDIERO, Antonio Carlos. **Controle de robôs hidráulicos com compensação de atrito**. 2005. 177 p. Dissertação Doutorado (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102934/210658.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 jan. 2022.

WEBER, Guilherme Heim; LONGO, Jean Paulo Nakatu; MURAKAMI, Henrique Weiss. **Aplicação de sensores capacitivos para monitoramento da formação de parafina em oleodutos**. 2013. 81 p. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia Industrial Elétrica/automação) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Curitiba, 2013. Disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/8289/2/CT\\_COEAU\\_2012\\_2\\_05.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/8289/2/CT_COEAU_2012_2_05.pdf). Acesso em: 2 fev. 2022.

WENDLING, Marcelo. **Sensores**: Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá. Campus de Guaratinguetá. Unesp, 2010. 19 p. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.