



Eletroadesão como Tecnologia de Futuro nos Soft Grippers

CARLA SOFIA ROSA FARIA

julho de 2021

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Eletroadesão como Tecnologia de Futuro nos *Soft Grippers*

Carla Sofia Rosa Faria

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Julho, 2021

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas.

Candidato: Carla Sofia Rosa Faria, N.º 1160885, 1160885@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Lino Figueiredo, lbf@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Roberto Silva, roberto.silva@reiman.pt

Empresa: Engimotion

Orientador: Filipe Rei, filipe.rei@engimotion.pt



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Julho, 2021

Agradecimentos

O meu agradecimento às pessoas que, directamente ou indirectamente, permitiram que esta tese se realizasse.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Filipe e ao Roberto, por me darem oportunidade de fazer parte do seu grupo de trabalho, agradeço ainda o trato simples, correcto e científico, com que sempre abordaram as nossas reuniões semanais, sem nunca terem permitido que o desalento se instalasse, mesmo quando as coisas não corriam bem.

Agradecer ao Rui, Eduarda e Chico, por todos os momentos passados ao longo destes cinco anos enquanto estudante. Agradeço o bom convívio, as boas discussões e a alegria que por vezes se instalava.

E por último, e não menos importante, os meus pais. Agradecer por todos os valores que me transmitiram ao longo destes anos, por toda a confiança e apoio.

Resumo

A robótica industrial foi originalmente desenvolvida para suplementar ou substituir os humanos, pois estes fazem trabalhos que envolvem mais monotonia, ou então trabalhos mais perigosos. O objectivo principal da garra robótica durante o processo de agarrar e levantar o objecto é aplicar força suficiente para evitar o risco do objecto cair, bem como qualquer outro dano ao objecto.

A eletroadesão é uma atracção electrostática entre dois materiais em contacto quando há uma diferença de potencial entre eles. Assim, temos um *gripper* que é constituído por um *pad* eletroadesivo, que pretende agarrar num substrato por atracção electrostática.

O projeto em questão tem como objetivo desenvolver uma tecnologia de eletroadesão para ser aplicada num *gripper*, para que este seja capaz de pegar em materiais mais sensíveis, como vidro, tecidos, pele, etc, sem os danificar. Para tal foram desenvolvidos *pads* eletroadesivos que sejam capazes de gerar uma força eléctrica, foram testados vários *pads* com diferentes materiais e medidas.

Palavras-Chave: Electrostática, *Gripper*, Alta Tensão, *Pad* Eletroadesivo, Descarga

Abstract

Industrial robotics was developed to supplement or replace humans, as they do jobs that involve more monotony, or more dangerous. The main purpose of the robotic grip during the process of grabbing and lifting the object is to apply sufficient force to avoid the risk of the object falling as well as any other damage to the object.

Electroadhesion is an electrostatic attraction between two materials in contact when there is a potential difference between them. Thus, we have a gripper that is made up of an electro-adhesive pad, which intends to grip a substrate by electrostatic attraction.

The project in question aims to develop an electroadhesion technology to be applied to a gripper, so that it is able to grip more sensitive materials, such as glass, fabrics, skin, etc., without damaging them. For this purpose, electro-adhesive pads that are capable of generating an electrostatic force were developed. Several pads with different materials and measurements were tested.

Keywords: Electrostatic, Gripper, High Voltage, Electro-adhesive *Pad*, Discharge.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
Lista de Símbolos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	2
1.2 Definição do Problema	2
1.2.1 Objetivos	2
1.3 Plano de Trabalho	3
1.4 Organização da Dissertação	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Princípio de Funcionamento dos <i>Pads</i> Electroadesivos	6
2.1.1 Condensadores	6
2.1.2 Comportamento do Dieléctrico	7
2.1.3 Polarização	9
2.2 Metodologia dos <i>Pads</i> Electroadesivos	12
2.2.1 Princípio da eletroadesão	12
2.2.2 Construção do <i>pad</i>	15
2.2.3 Factores que influenciam nas forças eletroadesivas	19
2.2.4 Exemplos de <i>pads</i> feitos para testes	24
2.3 Tecnologia eletroadesão VS outras tecnologias	26
2.4 <i>Grippers</i> eletroadesivos desenvolvidos	27
3 Sistema	31
3.1 Arquitetura do sistema	32
3.2 Sistema de Potência	34
3.2.1 Disjuntor e fonte comutada	35
3.2.2 Conversor abaixador	37
3.2.3 Conversor elevador	39

3.2.4	Fusíveis	41
3.2.5	Ventoinha	43
3.3	Sistema de Controlo	43
3.3.1	Arduino	43
3.3.2	Módulo de 8 relés	45
3.3.3	Relé de estado sólido	46
3.3.4	Botão de pressão	48
3.3.5	Optoacoplador	48
3.4	PAD	49
3.5	GUI Visual Studio	51
4	Projecto	53
4.1	Hardware	53
4.1.1	Controlo da tensão	54
4.1.2	Relé de estado sólido	57
4.1.3	Optoacoplador	58
4.2	Software	59
4.2.1	Arduino	59
4.2.2	Interface	63
4.2.3	Comunicação arduino e interface	64
5	Testes e Resultados	67
5.0.1	1º Teste realizado	67
5.0.2	2º Teste realizado	68
5.0.3	3º Teste realizado	69
5.0.4	4º Teste realizado	70
5.0.5	5º Teste realizado	72
5.0.6	6º Teste realizado	72
5.0.7	7º Teste realizado	73
5.0.8	8º Teste realizado	73
5.0.9	9º Teste realizado	74
5.0.10	10º Teste realizado	75
6	Conclusões	77
6.1	Trabalho Futuro	77
	Referências	79
A	Anexo A	85
A.1	Esquema eléctrico geral do circuito	85

B Anexo B	87
B.1 Código Arduino	87
C Anexo C	95
C.1 Código Visual Studio	95

Lista de Figuras

1.1	Gráfico de Gantt	3
2.1	Campo eléctrico criado pelas placas do condensador [21].	6
2.2	Campo eléctrico criado pelas placas do condensador com dieléctrico [23].	8
2.3	Representação do momento de um dipolo eléctrico gerado por duas cargas (de magnitude q) separadas por uma distância s [24].	10
2.4	Dipolo eléctrico num campo eléctrico [24].	10
2.5	Polarização electrónica [25].	11
2.6	Polarização iónica [25].	11
2.7	Polarização molecular [25].	11
2.8	Polarização interfacial [25].	12
2.9	Design com dois eléctrodos [28].	13
2.10	Circuito equivalente de dois eléctrodos adjacentes em série [29].	13
2.11	Vista do corte transversal do sistema eletroadesivo [29].	14
2.12	Esquemático do <i>pad</i> electroadesivo [32].	15
2.13	Valores das constantes dieléctricas de alguns materiais a 20°C [24].	16
2.14	O efeito do <i>design</i> do eléctrodo nas forças de atracção obtidas [33].	17
2.15	Simulação 3D para diversos <i>designs</i> [33].	18
2.16	Simulação 3D para diversos <i>designs</i> [34].	19
2.17	Resposta eletroadesiva dinâmica típica e curva de força em relação ao tempo [35].	20
2.18	Visão transversal de um sistema EA típico. (a) Eletroadesão em materiais condutores. (b) Eletroadesão em materiais isolantes [35].	21
2.19	Carregamento na superfície de substratos condutores [35].	21
2.20	Polarização de isoladores [35].	22
2.21	Forças eletroadesivas medidas num período de 5 dias [34].	22
2.22	Principais parâmetros de influência na eletroadesão.	24
2.23	Comparação das propriedades de material dieléctrico [37].	25
2.24	Comparação da tecnologia eletroadesão com outras tecnologias.	27
2.25	<i>Grippers</i> Electroadesivos rígidos [35]	28
2.26	<i>Grippers</i> Electroadesivos Flexíveis[35]	29
2.27	<i>Stretchable Grippers</i> [35]	29

3.1	Sistema geral de eletroadesão.	31
3.2	Componente conversor DC/HVDC proporcional [40].	32
3.3	Esquema eléctrico do conversor DC/HVDC [41].	33
3.4	Sistema de potência.	33
3.5	Sistema de controlo.	34
3.6	Fonte comutada de 24V [43].	36
3.7	Disjuntor da Siemens [44].	36
3.8	Conversor abaixador de tensão [45].	37
3.9	Conversor abaixador de tensão [45].	37
3.10	Conversor abaixador de tensão [46].	38
3.11	Forma de onda da tensão aplicada ao filtro de saída. [46].	38
3.12	Forma de onda da tensão aplicada ao filtro de saída. [46].	39
3.13	Conversor elevador de tensão [45].	39
3.14	Conversor elevador de tensão [45].	40
3.15	Conversor elevador de tensão [45].	40
3.16	Multiplicador de tensão típico [47].	40
3.17	Conversor elevador de tensão.	41
3.18	Fusíveis automáticos de 4A e 10A [49] [50].	42
3.19	Fusível de 10 mA e o porta-fusível [51] [52].	42
3.20	Ventoinha [54].	43
3.21	Placa de Arduino Uno com microcontrolador ATmega328P [55].	44
3.22	Pinos do microcontrolador ATmega328P [55].	45
3.23	Módulo de 8 relés compatível com arduino [57].	46
3.24	Esquemático de um relé electromecânico.	46
3.25	Relé de estado sólido [58].	48
3.26	Botão de pressão [59].	48
3.27	Esquemático do optoacoplador num circuito eléctrico [61].	49
3.28	Optoacoplador 4N25 [61].	49
3.29	Esquema de um <i>pad</i> com eléctrodos interdigitados incorporados.	50
3.30	Contactador [62].	50
3.31	Esquemático do contactador com o sistema de potência e o <i>pad</i>	51
3.32	Interface	52
4.1	Princípio do funcionamento de um potenciómetro analógico.	54
4.2	Linearidade da tensão na entrada do conversor <i>boost</i>	55
4.3	Valor das resistências para cada valor de tensão.	55
4.4	Tabela em binário que mostra a conjugação de relés.	56
4.5	Esquema simplificado do funcionamento dos relés.	57
4.6	Esquema eléctrico com os módulos relés.	57
4.7	Esquema eléctrico com o relé de estado sólido e botão de pressão.	58

4.8	Esquema eléctrico com o optoacoplador.	58
4.9	Fluxograma do módulo de relés.	60
4.10	Fluxograma do relé de estado sólido.	61
4.11	Fluxograma do botão de pressão.	62
4.12	Fluxograma de funcionamento do optoacoplador com o arduino. . .	63
4.13	Modo de funcionamento da interface.	64
4.14	Trama que a interface envia para o arduino.	65
5.1	<i>Pad</i> do primeiro teste.	68
5.2	<i>Pads</i> do segundo teste.	69
5.3	<i>Pad</i> do terceiro teste.	70
5.4	<i>Pads</i> do quarto teste.	71
5.5	<i>Pads</i> do quinto teste.	72
5.6	<i>Pad</i> do sexto teste.	73
5.7	<i>Pad</i> do oitavo teste.	74
5.8	<i>Pad</i> do nono teste.	75
5.9	<i>Pads</i> do décimo teste.	76

Lista de Tabelas

2.1	Fórmulas para o calcular o valor de diferentes tipos de condensador .	8
3.1	Efeitos de um choque eléctrico no corpo humano [48].	42
4.1	Resistências correspondentes a cada relé.	56
5.1	Caraterísticas dos <i>pads</i> do primeiro teste.	67
5.2	Caraterísticas dos <i>pads</i> do segundo teste.	68
5.3	Caraterísticas do <i>pad</i> do terceiro teste.	69
5.4	Características dos <i>pads</i> do quarto teste.	71
5.5	Características dos <i>pads</i> do quinto teste.	72
5.6	Características do <i>pad</i> no sexto teste.	73
5.7	Características do <i>pad</i> do oitavo teste.	74
5.8	Caraterísticas do <i>pad</i> do nono teste.	74
5.9	Caraterísticas dos <i>pads</i> do décimo teste.	75

Lista de Acrónimos

CA	<i>Alternate Current</i>
CMOS	<i>Complementary symmetry Metal Oxide Semiconductor</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DIN	<i>Deutsche Industrie Normen</i>
EA	Electroadesivo
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EMI	Interferência eletromagnética
FPC	Circuito Impresso Flexível
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
Led	<i>Light-emitting diode</i>
MCBs	<i>Miniature Circuit Breakers</i>
MIPS	<i>Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages</i>
Mosfet	<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
PEN	Polietileno-naftalato
PET	Polietileno-tereftalato
PI	Poliimida
PDMS	Dimetil Polissiloxano
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SSR	<i>Solid State Relay</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
Q	carga acumulada no condensador	C
ε_0	permissividade no vácuo	F/m
A	área	m^2
d	distância	m
V	tensão	V
C	condensador	F
ε_d	permissividade do meio dielétrico	F/m
L	comprimento	m

Capítulo 1

Introdução

A robótica industrial foi originalmente desenvolvida para suplementar ou substituir os humanos, pois estes fazem trabalhos que envolvem mais monotonia, ou então trabalhos mais perigosos. O objectivo principal da garra robótica durante o processo de agarrar e levantar o objecto é aplicar força suficiente para evitar o risco do objecto cair, bem como qualquer outro dano ao objecto [1].

Os robôs executam uma variedade de tarefas nas indústrias. Por exemplo, eles são usados para mover peças correctamente para operações de montagem. Os processos de produção geralmente incluem movimentos de "pegar e colocar" feitos por robôs de manipulação. Os robôs industriais devem realizar essas tarefas o mais rápido possível, mantendo o grau de precisão e repetibilidade que cada tarefa exige [2].

Com o aumento das capacidades dos sistemas robóticos, suas aplicações foram promovidas de áreas industriais com tarefas simples e repetitivas para áreas mais desconhecidas com aplicações mais complicadas [3]. O agarrar é uma das coisas que tem sido um assunto importante para muitas pesquisas nas últimas 3 décadas e tem sido estudado sob diversos pontos de vista. Com o avanço da tecnologia, uma variedade de garras robóticas foi desenvolvida em flexibilidade e multifunções [4].

1.1 Contextualização

A eletroadesão é uma atracção electrostática entre dois materiais em contacto quando há uma diferença de potencial entre eles [5]. Assim, temos um *gripper* que é constituído por um *pad* eletroadesivo, que pretende agarrar num substrato por atracção electrostática. Este tipo de *gripper* tem sido utilizado para várias aplicações, mas é ainda uma matéria pouco conhecida. As aplicações já concebidas, inclui:

- Acessórios electrostáticos para segurar peças de trabalho [6];
- Método adesivo para missões espaciais, como manuseio de materiais [7] e manuseio de órbita terrestre controlável [8];
- Mandris electrostáticos para manuseio e apreensão de semicondutores nas indústrias [9];
- Efetores finais para agarrar materiais fibrosos, como tecido [10] e fibras de carbono [11];
- Mecanismo de adesão para robôs [12],[13];

Toda estas aplicações foram ou/e estão a serem desenvolvidas, pois a eletroadesão tem uma adaptabilidade aprimorada. Esta adere a materiais condutores e isolantes, como a superfícies lisas ou rugosas e ásperas [14]. Além disso, pode ser aplicado no vácuo, e portanto, em ambientes espaciais [7], [8]. Um *gripper* electrostático tem um método de manuseio suave, porque pode ser aplicado sem contacto com os substratos [15], o que é vantajoso para algumas tarefas de manuseio de materiais de alto valor, como pegar e colocar o silício *wafers* nas indústrias de semicondutores [16].

1.2 Definição do Problema

Apesar de já existir algumas aplicações que utilizam a eletroadesão, a informação é muito pouca, por isso é que a tecnologia eletroadesão deve ser estudada e compreendida devidamente, para avançar com uma tecnologia que usa a electrostática, mais especificamente um *gripper* electrostático. Os materiais a utilizar para criar os campos eléctricos suficientemente fortes para pegar em qualquer objecto e como se controla os mesmos, são dois factores que ainda são desconhecidos.

1.2.1 Objectivos

Os objectivos a realizar neste projecto começa por:

- Optimizar o *pad* eletroadesivo, de modo que crie um campo eléctrico suficientemente forte para pegar e largar qualquer objecto;

- Controlar as cargas e descargas do *pad* eletroadesivo;
- Projectar um primeiro modelo do *gripper*;
- Projectar um primeiro modelo do controlador;
- Programar uma aplicação para o controlo do *gripper*.

1.3 Plano de Trabalho

Este projecto está dividido em 4 fases.

A primeira fase é a pesquisa para o estado de arte. Compreender a tecnologia de eletroadesão, procurar tecnologias semelhantes, obter ideias para desenvolver o produto e perceber o que será necessário para desenvolvê-lo.

A segunda fase é o desenvolvimento do conceito. Projectar o primeiro modelo de rascunho para o *gripper* e para o controlador, e definir a estrutura de produtos como também o seu orçamento.

A terceira fase é o protótipo. Construir uma versão beta do produto, testar o sistema do protótipo, experimentar e programar o protótipo num cenário de aplicação robótica.

A quarta fase é a análise de viabilidade. Testar a confiabilidade do sistema, compreender a experiência do utilizador com a interface do sistema e analisar a facilidade de implementação e programação. A figura 1.1 mostra o gráfico de Gantt.

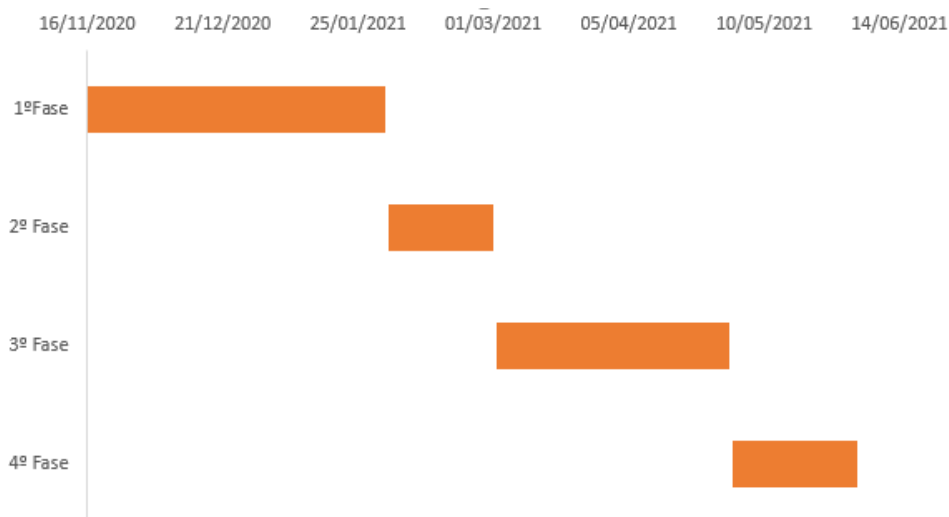


Figura 1.1: Gráfico de Gantt

1.4 Organização da Dissertação

Este relatório encontra-se dividido em 6 capítulos e 3 anexos.

No Capítulo 1, é feita uma contextualização da electrostática e da eletroadesão, É ainda explicado o problema proposto, definindo os seus objectivos e quais os resultados a esperar no fim do projeto.

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte. Explicando o princípio de funcionamento dos *pads* eletroadesivos, quais as suas metodologias. É também comparada a tecnologia de eletroadesão com outras tecnologias similares. Por fim, são apresentados alguns *grippers* eletroadesivos já desenvolvidos.

O terceiro capítulo, diz respeito à arquitetura do sistema. Sendo apresentados o sistema de potência, sistema de controlo, o *pad* e a *GUI* da Visual Studio desenvolvidos de modo a cumprir os objetivos propostos.

No quarto capítulo é explicado a forma como o sistema é implementado. Sendo demonstradas as ligações feitas entre os diferentes componentes de *hardware*. É ainda explicada a implementação do código desenvolvido para a comunicação entre o arduino e a interface gráfica, e desta para o sistema.

O quinto capítulo, diz respeito à apresentação dos resultados obtidos pelos vários testes de *pads*.

No sexto e último capítulo, fazem-se as conclusões finais retiradas da implementação do projecto numa ótica global, a resposta aos objetivos propostos com referência aos obstáculos e dificuldades encontradas na realização do projeto, assim como possíveis melhorias para obtenção de melhores resultados aquando da implementação.

Capítulo 2

Estado da Arte

O fenómeno electrostático foi considerado pela primeira vez pelos gregos. Eles observaram que quando dois pedaços de lã eram friccionados, os objectos leves como penas eram atraídos para eles. Mais tarde, no final dos anos 1700, o cientista francês Augustin de Coulomb tentou entender a força do campo eléctrico. Ele descobriu que cargas semelhantes se repelem, enquanto cargas opostas se atraem - lei de Coulomb. Essa lei forneceu a base para o conceito de adesão electrostática. Se produzir-se uma carga estática suficiente numa superfície, pode-se anexar qualquer objecto a essa superfície [17].

Também sabe-se que adesão é um fenómeno físico no qual camadas superficiais de dois materiais sólidos ou líquidos diferentes se conectam. É induzido pela interacção intermolecular das substâncias em contacto [18]. O fenómeno de adesão é comumente usado em fitas auto adesivas, colas adesivas especiais ou tintas. Répteis, anfíbios e insectos usam adesão para se mover em superfícies verticais de árvores, folhas ou rochas [19].

Um tipo de adesão é a eletroadesão, surgindo como um efeito da interacção do campo eléctrico pela aplicação de alta tensão. A força de eletroadesão é capaz de atrair qualquer objecto para o objecto que cria o campo eléctrico, a uma certa distância dependendo do valor da força [18].

2.1 Princípio de Funcionamento dos *Pads* Electroadesivos

Os *pads* funcionam como se fossem condensadores. Um *pad* consiste num condutor (alumínio, cobre, etc.), que actua como um eléctrodo, laminado com uma camada de material dieléctrico (*mylar*, *epoxy*, etc.). O substrato (objecto a ser pegado) actua então como a segunda placa do condensador. Os *pads* para criarem o campo eléctrico, precisam de ser ligados por uma fonte de alta tensão. Quando é fornecida a alta tensão, as cargas estáticas começam a se acumular no *pad* eletroadesivo. O objecto que se pretende pegar é aproximado dos *pads*, assim o objecto fica polarizado devido à indução electrostática e, portanto, fica aderido ao *pad* [20].

2.1.1 Condensadores

Quando uma tensão é aplicada num condensador, constituído por duas placas condutoras paralelas, separadas por uma distância d , onde existe o vácuo, como mostra a figura 2.1, uma das placas torna-se positivamente carregada, e a outra negativamente, com o correspondente campo eléctrico \vec{E} , dirigido do terminal positivo para o negativo [21].

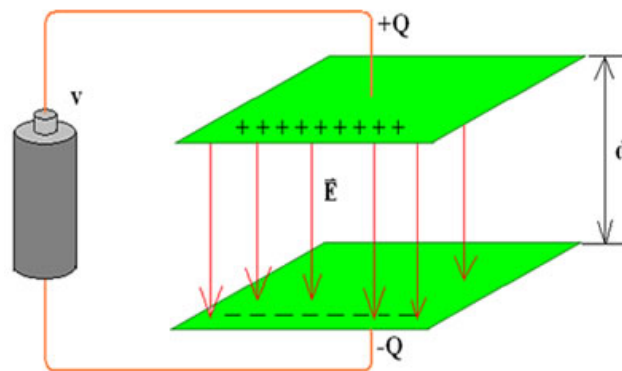


Figura 2.1: Campo eléctrico criado pelas placas do condensador [21].

Uma carga Q é acumulada em cada placa do condensador e é directamente proporcional à tensão aplicada e à área das placas, e inversamente proporcional à distancia entre elas, como mostra a equação 2.1.

$$Q = \epsilon_0 \times \frac{A}{d} \times V = C_0 \times V \quad (2.1)$$

O parâmetro ϵ_0 é chamado de permissividade do vácuo (ou constante dieléctrica do vácuo) e a constante universal tem o valor de $8,885 \times 10^{-12} \text{ F/m}^1$. C_0 é o condensador do sistema cujas unidades são Coulomb por Volt, ou Farads (F).

Um material com cargas altamente polarizáveis, quando colocado entre as placas de um condensador na presença de um campo eléctrico, influenciará acentuadamente as cargas que estão entre as placas. Com o material dieléctrico inserido na região entre as placas e mantendo-se a mesma tensão aplicada, o que irá ocorrer é uma polarização e também um adicionamento de cargas armazenadas. A variação do condensador é o reflexo directo da constante dieléctrica do material.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

A equação 2.2, mostra que Q é a carga armazenada (em Coulomb) e V é a tensão entre os condutores (ou as placas). Como mostra a equação 2.3, ao adicionar o material dieléctrico, este irá contribuir para aumentar a carga Q_1 .

$$Q_1 = \varepsilon_d \times \frac{A}{d} \times V = C \times V \quad (2.3)$$

ε_d é a permissividade do meio dieléctrico e terá um valor maior do que ε_0 . A relação entre os valores das placas do condensador com o vácuo e com o dieléctrico será:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon_d(\frac{A}{d})V}{\varepsilon_0(\frac{A}{d})V} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \Rightarrow C = \varepsilon_r C_0 \quad (2.4)$$

A relação $\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0}$ é a permissividade relativa ε_r , ou seja, a constante dieléctrica (k)², é maior que a unidade, para qualquer dieléctrico $\varepsilon_r > 1$ e representa o incremento na capacidade de armazenamento de carga pela inserção de um meio dieléctrico entre as placas. A constante dieléctrica, k , é uma propriedade do material e, deve ser uma das primeiras características a serem consideradas no condensador [22].

2.1.2 Comportamento do Dieléctrico

A constante dieléctrica, k (ou ε_r) do material compara a capacidade de armazenamento de cargas do material, com aquela do vácuo entre as placas de mesma geometria sob a acção de um campo eléctrico aplicado de mesma intensidade e indica quantas vezes a capacidade do sistema foi aumentada com a introdução do dieléctrico entre as placas do condensador. O valor de k depende não só da pureza do material, mas das condições ambientais, da frequência e da tensão aplicada. Como sugerido pela equação 2.5, o valor de todos os tipos de condensadores pode ser escrita sob a forma:

$$C = \varepsilon(L) \quad (2.5)$$

onde L , que é o comprimento, que depende da geometria das placas do condensador. De acordo com a descoberta de Faraday, para um condensador completamente preenchido por um dielétrico, a equação 2.6 torna-se então:

$$C = K\varepsilon_0 L = KC_{ar} \quad (2.6)$$

onde C_{ar} é o valor do condensador, com o ar a preencher o espaço entre as placas. Na tabela 2.1 são apresentadas as fórmulas para o cálculo de alguns tipos de condensador.

Tabela 2.1: Fórmulas para o calcular o valor de diferentes tipos de condensador

Condensador	Fórmula
Placas paralelas	$\varepsilon_d \frac{A}{d}$
Cilíndrico	$2\pi\varepsilon_0 \frac{L}{\ln(\frac{b}{a})}$
Esférico	$4\pi\varepsilon_0 \frac{ab}{\ln(b-a)}$
Esfera isolada	$4\pi\varepsilon_0 R$

O armazenamento de carga já foi ilustrado na figura 2.2, e é uma situação de vácuo, onde uma carga $+Q$ está armazenada na placa superior, e uma carga $-Q$ na placa inferior.

Quando um dielétrico é introduzido e um campo eléctrico é aplicado, o sólido introduzido dentro das placas torna-se polarizado, como mostra a seguinte figura.

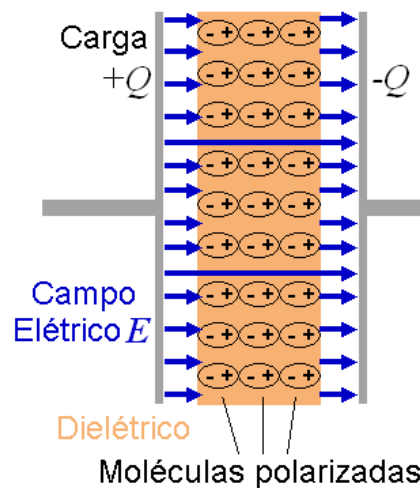


Figura 2.2: Campo eléctrico criado pelas placas do condensador com dielétrico [23].

Com o resultado desta polarização, há um acumulo adicional de carga negativa de magnitude $-Q$ na superfície do dielétrico próxima da placa positivamente carregada,

e de forma similar, uma carga adicional $+Q$ na superfície adjacente à placa negativa.

Para a zona do dieléctrico mais distante destas superfícies, os efeitos de polarização não são importantes. Assim se cada placa e as suas superfícies adjacentes do dieléctrico forem consideradas como uma simples entidade, a carga induzida pelo dieléctrico ($+Q$ ou $-Q$) pode ser considerada como uma "anulador" de cargas que originalmente existiam na placa para a condição de vácuo.

Outro efeito do dieléctrico é limitar a diferença de potencial que pode ser aplicado entre as placas do condensador a um certo valor, $V_{máx}$. Se este valor for ultrapassado, o material dieléctrico vai romper, originando um caminho condutor entre as placas. A relação entre a máxima diferença de potencial que um dieléctrico pode suportar sem que ocorra sua ruptura (*breakdown*) e a sua espessura denomina-se por rigidez dieléctrica do material. Seu valor é, geralmente, expresso por V/m e depende da área específica, porosidade, defeitos e pureza do material, assim como da frequência da tensão aplicada, tempo de aplicação da tensão e condições ambientais (temperatura, humidade, etc.).

Todo material dieléctrico possui, então, como característica uma rigidez dieléctrica que é o valor máximo do campo eléctrico que o material pode tolerar sem haver ruptura. A rigidez dieléctrica de materiais sólidos, medida em campos eléctricos uniformes e evitando o efeito de descargas superficiais, varia de 0,5 a 10^5 KV/m, para cristais halogenetos alcalinos. Varia de 2 a 2×10^6 KV/m para alguns materiais inorgânicos, tais como, óxido de alumínio, mica, etc [24].

2.1.3 Polarização

A maioria dos materiais dieléctricos tem um número reduzido de electrões ou iões móveis que permitem pequena passagem de corrente eléctrica quando submetidos a um campo eléctrico. O campo eléctrico interage nos isolantes eléctricos (dieléctrico) provocando um ligeiro deslocamento no balanço das cargas positivas e negativas dentro do material para formar um dipolo eléctrico. Duas cargas pontuais de módulo q e sinais opostos, separados entre si de uma distância, s , (eixo do dipolo), constituem um dipolo eléctrico, a figura 2.3 mostra isso. O dipolo, \vec{p} , é uma grandeza vectorial de módulo, qs , com a direcção da recta que une as duas cargas e sentido da carga negativa para a positiva [24].

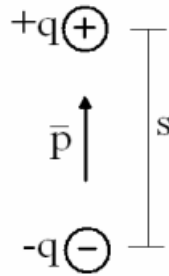


Figura 2.3: Representação do momento de um dipolo elétrico gerado por duas cargas (de magnitude q) separadas por uma distância s [24].

Supõem-se que as cargas estejam ligadas entre si mecanicamente, de tal forma que a distância s , seja sempre constante. Colocando esse dipolo elétrico num campo elétrico uniforme, de intensidade \vec{E} , externo. A extremidade positiva do dipolo é atraída para a direita, e a negativa para a esquerda, por uma força \vec{F} que actuará sobre o dipolo para orientá-lo com o campo aplicado, de intensidade $q\vec{E}$, como mostra a figura 2.4 [24].

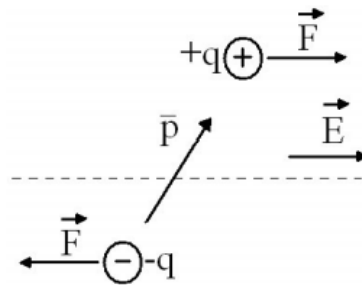


Figura 2.4: Dipolo elétrico num campo elétrico [24].

O campo elétrico fornece um trabalho ao dipolo para girá-lo até que a sua direção e sentido sejam os mesmos do campo. Este processo de alinhamento do dipolo chama-se polarização. Polarização é então, o alinhamento induzido ou permanente dos dipolos de moléculas ou átomos por efeito de um campo externo [24].

Os materiais dielétricos, dependendo do tipo de material e das condições de aplicação do campo externo, podem apresentar três tipos de polarização (um, dois ou mais simultaneamente), electrónica, iónica, molecular e interfacial. A polarização electrónica resulta do deslocamento de nuvens de electrões em relação a núcleos atómicos. A figura 2.5 apresenta a polarização electrónica.

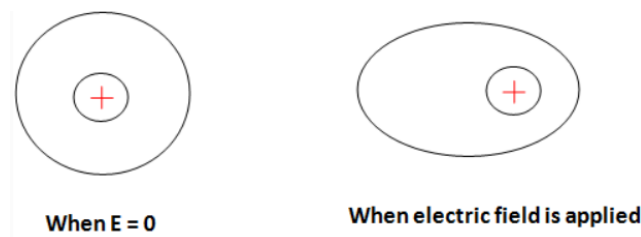


Figura 2.5: Polarização electrónica [25].

A polarização iónica resulta do deslocamento de iões em relação a outros iões, como mostra a figura 2.6:

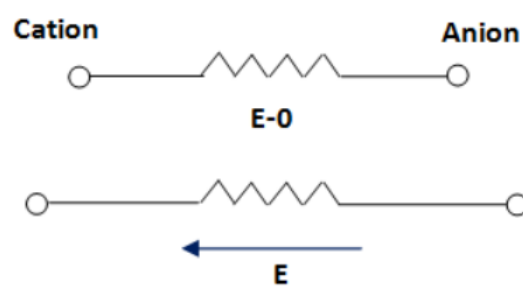


Figura 2.6: Polarização iónica [25].

A polarização molecular ou polarização orientacional resulta da mudança de orientação de moléculas com o dipolo eléctrico permanente por efeito do campo externo aplicado, como representa a figura 2.7.

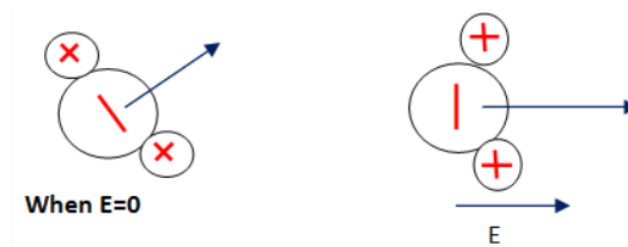


Figura 2.7: Polarização molecular [25].

A polarização interfacial, também é conhecida como polarização de carga espacial. Neste caso, devido ao campo eléctrico periférico na interface do eléctrodo e do material ocorre a orientação dos dipolos de carga, isso é, quando um campo eléctrico periférico é implementado, algumas cargas positivas movimentam-se para o limite do eléctrodo, resultando num acumulo de cargas eléctricas nas interfaces estruturais. A figura 2.8 representa a polarização interfacial.

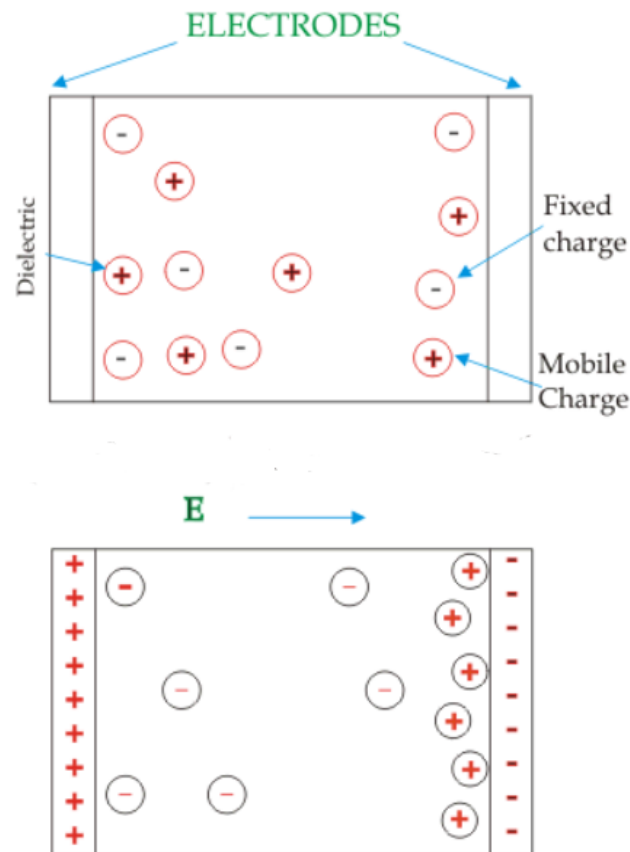


Figura 2.8: Polarização interfacial [25].

2.2 Metodologia dos *Pads* Electroadesivos

O *pad* eletroadesivo contém os eléctrodos condutores incorporados no material dieléctrico. Os eléctrodos condutores são conectados a fontes de alta tensão, geralmente na faixa de kV. Os materiais dieléctricos são úteis para prevenir a neutralização de carga e a ruptura do dieléctrico. O sistema de controlo controla a activação e desactivação do sistema de eletroaderência.

A eletroaderência é um fenómeno multidisciplinar, complicado e dinâmico de atracção electrostática com imensas variáveis, que influenciam as forças eletroadesivas obtidas entre o *pad* eletroadesivo e o substrato [26].

2.2.1 Princípio da eletroadesão

Para substratos condutores, as forças eletroadesivas são geradas principalmente por indução electrostática. O fenómeno de indução electrostática é um processo onde há uma separação de cargas negativas de um lado e cargas positivas no lado oposto do condutor, que foram induzidas pelo campo electrostático externo produzido por um isolador carregado .

Os materiais condutores geralmente tem grande quantidade de electrões livres. Esses electrões são capazes de reorganizar-se de forma rápida e fácil. Cargas iguais e opostas são induzidas na superfície de substratos condutores após a aplicação da alta tensão no *pad* eletroadesivo. As forças eletroadesivas entre o *pad* e o substrato condutor são assim formadas [27].

O design com dois eléctrodos é o design mais comum nas aplicações eletroadesivas, como mostra a figura 2.9.

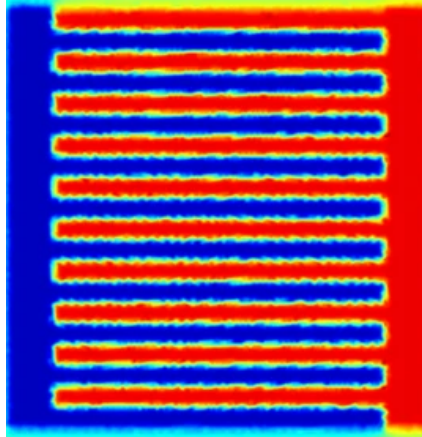


Figura 2.9: Design com dois eléctrodos [28].

Para o eletroadesivo do tipo coulomb, as forças electroadesivas entre o *pad* e o substrato podem ser derivadas de uma série de conexões paralelas de vários condensadores ideais tendo o dieléctrico em série, como mostra a figura 2.10.

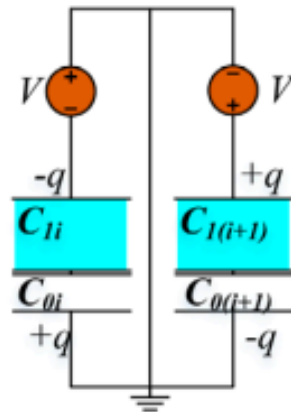


Figura 2.10: Circuito equivalente de dois eléctrodos adjacentes em série [29].

Onde C_{1i} é o valor capacitivo do material dieléctrico e C_{0i} é o valor capacitivo entre o dieléctrico e o substrato, ou seja, do ar. Portanto, o valor capacitivo entre o

pad e o substrato é dado como,

$$C_e = \sum_{i=1}^n \frac{C_{0i}C_{1i}}{C_{0i}C_{1i}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{r1}S}{\varepsilon_{r1}g + t_1} \quad (2.7)$$

Onde, n é o número total de condensadores em série ou número de pares de eléctrodos, S é a área efectiva do *pad* eletroadesivo, ε_0 é a permissividade do ar, e ε_{r1} é a permissividade relativa do material do dieléctrico. Pela figura 2.11, sabe-se que g é o entre ferro efectivo entre o *pad* e o substrato, e t_1 é a espessura dieléctrica.

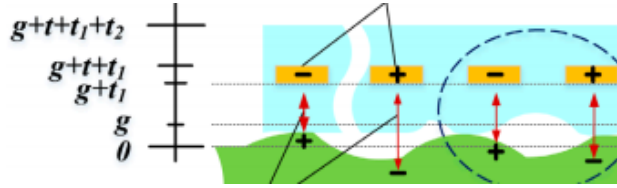


Figura 2.11: Vista do corte transversal do sistema eletroadesivo [29].

Com base nas forças de Coulomb, as forças entre o *pad* e o substrato são obtidas por:

$$F_z = -\frac{1}{2} \frac{Q^2}{\varepsilon_0 S} = -\frac{1}{2} \frac{C_e^2 U^2}{\varepsilon_0 S} \quad (2.8)$$

onde, U é a tensão, Q é a carga superficial acumulada e o sinal negativo corresponde às forças de atracção.

O efeito J-R, investigado inicialmente por Johnsen e Rahbek, ocorre quando anexa-se os *pads* electroadesivos feitos com dieléctricos imperfeitos e com resistividade de volume finito, como materiais semicondutores, em substratos de metal. A transferência de carga ocorrerá através dos pontos de contacto entre os *pads* e os substratos. Também há uma forte atracção electrostática que é gerada pelas interfaces acumuladas por cargas entre as áreas sem contacto. Assim, estas pequenas lacunas são devido às regularidades da superfície do dieléctrico, contribuindo para fortes forças de adesão. Portanto, para o electroadesivo do tipo J-R, as forças de atracção electrostática J-R entre o *pad* e o substrato são independentes do material dieléctrico [30], dando que,

$$F_z = -\frac{1}{2} \frac{C_0^2 V_{J-R}^2}{\varepsilon_0 S_{J-R}} \quad (2.9)$$

onde, $C_0 = \frac{\varepsilon_0 S_{J-R}}{g}$ é o valor capacitivo das áreas sem contacto, V_{J-R} é a tensão entre as interfaces, S_{J-R} é a área efetivas sem contacto. A tensão entre as interfaces é fornecida através da seguinte equação [30].

$$V_{J-R} = \frac{R_c}{R_c + R_d} U \quad (2.10)$$

onde R_d é a resistividade de volume do material dieléctrico e R_c , geralmente muito maior do que R_d , é a resistência de contacto sujeito à textura da superfície, propriedade do material dieléctrico e áreas de contacto.

Além das forças eletroadesivas J–R, as forças Coulomb convencionais também são geradas entre os eléctrodos e os substratos [30], proporcionando assim:

$$F_z = F_{Coulomb} + F_{J-R} = -\frac{1}{2} \left(\frac{C_e^2 U^2}{\varepsilon_0 S} + \frac{C_0^2 V_{J-R}^2}{\varepsilon_0 S_{J-R}} \right) \quad (2.11)$$

Para substratos isolantes, as forças eletroadesivas são geradas principalmente por polarizações eléctricas. Assim, polarização total de um sistema dieléctrico arbitrário pode ser escrita como [31]:

$$P_{total} = P_e + P_i + P_o + P_d + P_{others} \quad (2.12)$$

onde, P_e é a polarização eléctrica, P_i é a polarização iónica, P_o é a polarização orientacional, P_d é a polarização de carga espacial e P_{others} são outros tipos de polarização. Assim, as forças eletroadesivas geradas em substratos isolantes podem então ser expressas por [31]:

$$F_z = P_{total} E \quad (2.13)$$

2.2.2 Construção do *pad*

O *pad* eletroadesivo é composto por a base dieléctrica, os dois eléctrodos e o dieléctrico, que funciona como isolador. Assim, os campos eléctricos são gerados entre os eléctrodos e usam o isolador como meio de transporte. Os componentes são dispostos em camadas, conforme mostrado a figura 2.12, com a camada dieléctrica voltada para a superfície de teste (substrato).

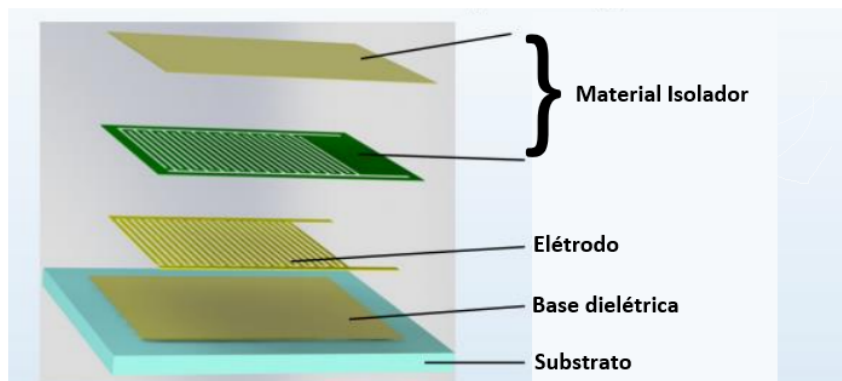


Figura 2.12: Esquemático do *pad* electroadesivo [32].

Os parâmetros controlados são: a espessura do dieléctrico, a forma do eléctrodo e a sua área. O isolador funciona como um inibidor para evitar a condutância eléctrica, que pode levar à interrupção eléctrica durante o seu funcionamento.

Existe uma ampla escolha de materiais para os componentes do *pad* a ser desenvolvido. Geralmente, qualquer material electricamente condutor é uma escolha pronta para o eléctrodo, como o cobre ou o alumínio. Para a base dieléctrica são a mica, o vidro, o acrílico. A consideração é dada para um material dieléctrico com uma alta constante dieléctrica e rigidez dieléctrica [32]. A figura 2.13 fornece alguns valores das constantes dieléctricas a uma temperatura de 20°C.

Cristais inorgânicos	ϵ_r	Cerâmicas	ϵ_r
NaCl (seco)	5,5	Alumina	8,1-9,5
CaCO ₃	9,15	Porcelana	6,0-8,0
Al ₂ O ₃ , MgO	10,0; 8,2	Enstatita	5,5-7,5
		Forsterita	6,2
		Silicato de Alumínio	4,8
TiO ₂	100	Titanatos	50
BaTiO ₃	4100	Zirconia	8-10,5
Vidros	ϵ_r	Mica	5,4-8,7
Sílica fundida	3,8	Resinas poliméricas polares	ϵ_r
Pirex	5,1	Poli(cloreto de vinila)	3,2-3,6
Vidro soda-lime	6,9	Acetato de polivinil	3,2
Resinas poliméricas não polares	ϵ_r	Nylon 6,6	4,0-3,6
Polietileno	2,3	Polietileno tereftalato	3-2,5
Polipropileno	2,5-2,6	Epoxy	3,0-4,5
politetrafluoretileno	2,1	Policarbonato	2,9-3,0

Figura 2.13: Valores das constantes dieléctricas de alguns materiais a 20°C [24].

Como isolador, este tem que preencher os espaços vazios entre os eléctrodos e ter uma camada fina por cima dos mesmos, de modo a cobrir. Como material basta usar fita poliimida ou borracha de silicone [32].

Para otimizar o design dos *pads* electroadesivos foram projectados sete formas diferentes, enquanto que outros parâmetros, incluindo a área efectiva, largura do eléctrodo, espaçamento entre os eléctrodos e as permissividades relativas da camada dieléctrica foram mantidas constantes.

Primeiro, existem dois tipos de *pads*, os círculos interdigitados e os círculos concêntricos, que foram simulados para compreender a relação entre as geometrias do eléctrodo e as forças eletroadesivas geradas.

A simulação do eléctrodo interdigitado mostrou que a pressão eletroadesiva máxima ocorre nos cantos dos eléctrodos. Assim, de seguida, aumentou-se o número de cantos do eléctrodo, para aumentar a força eletroadesiva. Os resultados mostram

que, embora o número de pressões locais máximas aumente, a força eletroadesiva total para o *pad* diminui. Isso significa que os cantos do eléctrodo aumentam as pressões locais, mas têm efeitos negativos na área próxima.

A simulação de eléctrodos em círculos concêntricos revela que a forma curva dos eléctrodos resultam numa distribuição de pressão homogénea e o campo eléctrico é maior, resultando numa maior força eletroadesiva em comparação com os *pads* interdigitadas simples.

Também foi simulado eléctrodo em forma semi-hexagonal, para diminuir a nitidez dos cantos, e os resultados mostram uma melhoria na força eletroadesiva.

Um eléctrodo senoidal foi simulado por último, e proporcionou o melhor desempenho [33].

A figura 2.14 compara a força de atracção obtida e a capacidade total para diferentes estruturas do eléctrodo.


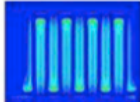
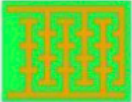
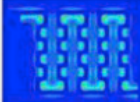

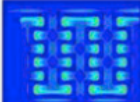

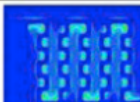



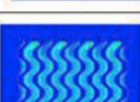


Pattern name	Shape of electrodes	Total area of electrodes(cm ²)	Total EA force (mN)	Total capacity (pF)	Maxwell stress
Interdigitated		146	14.483	962.69	
Interdigitated with teeth (1)		143	10.189	755.13	
Interdigitated with teeth (2)		146	11.381	835.57	
Interdigitated with teeth (3)		143	9.5595	712.43	
Concentric circles		142.17	15.031	1009	
Half-hexagonal		146	17.847	1279.7	
Sinusoidal shape		134	21.222	1700.8	

Figura 2.14: O efeito do *design* do eléctrodo nas forças de atracção obtidas [33].

A figura 2.15 mostra o efeito da forma do eléctrodo no campo eléctrico, gradiente do campo eléctrico e a tensão de Maxwell gerada. Os contornos do campo eléctrico indicam as partes do *pad* nas quais houve ruptura dieléctrica. Como no *design* interdigitado, a ruptura dieléctrica ocorre nos ângulos rectos dos eléctrodos. Uma vez que ocorre a quebra dieléctrica de um material, o caminho que partiu torna-se condutivo e o campo eléctrico é interrompido.

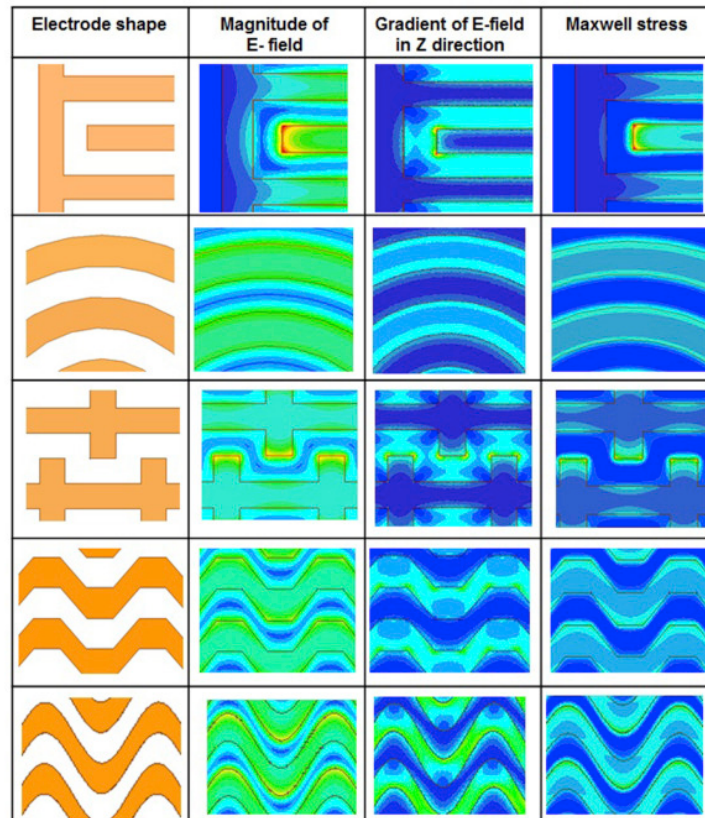


Figura 2.15: Simulação 3D para diversos *designs* [33].

Também foi verificado numa outra simulação que a espessura do dieléctrico, a largura dos eléctrodos, o espaçamento entre estes como também a tensão aplicada alternativamente nos eléctrodos tem influencia no campo eléctrico. Conforme a figura 2.16, observa-se que a força aumenta conforme aumenta a tensão, a largura ideal do eléctrodo é 2 mm como também o espaçamento entre eles e quanto mais fina for a camada dieléctrica maior é a força [34].

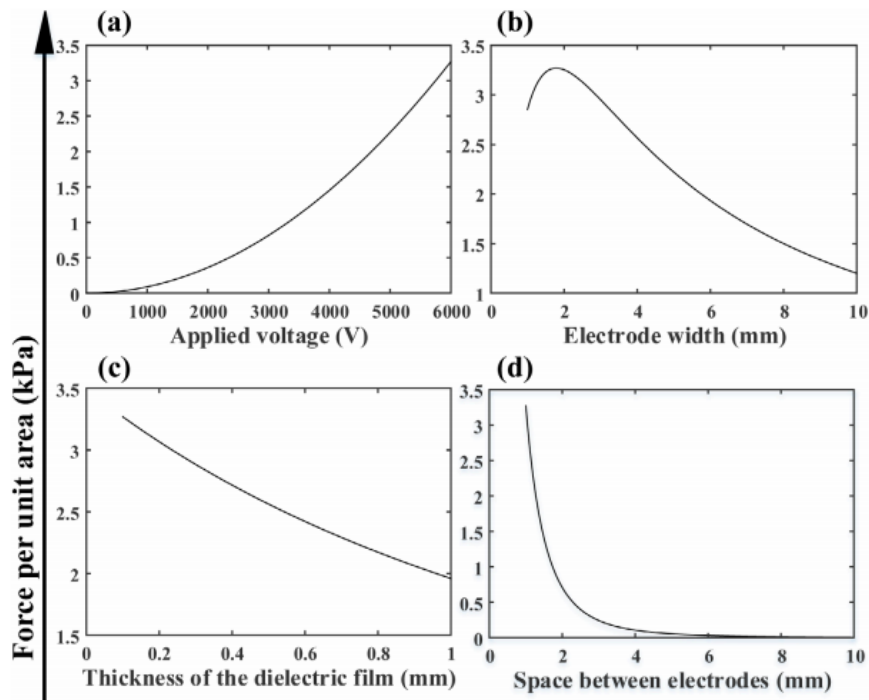


Figura 2.16: Simulação 3D para diversos *designs* [34].

Todo este estudo e todas estas simulações numéricas de sistemas electroadesivos que já foram realizadas, em que optimizaram desde as larguras e espaçamentos de eléctrodos até outros *designs*, são importantes pois prevê um melhor desempenho do actuador/*pad* electroadesivo.

2.2.3 Factores que influenciam nas forças eletroadesivas

A eletroadesão é uma tecnologia de adesão com várias variáveis que influenciam as forças eletroadesivas obtidas entre o *pad* e o material do substrato. Anteriormente viu-se que a tensão aplicada ao *pad*, material e design do eléctrodo e o material do dieléctrico são alguns factores que criam as forças electroadesivas. Mas existem outros factores que podem prejudicar nas forças criadas pelo *pad*, como o material do substrato e factores ambientais.

Quando é aplicada uma alta tensão nos eléctrodos, um forte campo eléctrico é formado entre estes. Neste período de tempo existe um acumulo de carga, consequentemente um acumulo de força electrostática, este período de tempo é finito e depende dos materiais do *pad* e do substrato. Quando a alta tensão é removida, a força eletroadesiva diminui. Essa descarga também leva um tempo finito, normalmente em segundos, mas também pode se estender por horas. Esses tempos de carga e descarga afectam no ciclo de adesão/aderência. A figura 2.17 mostra a resposta da

eletroadesão, desde o início da aplicação de uma alta tensão até conseguir uma força eletroadesiva máxima, até desligá-la e haver uma dissipação completa de cargas [35].

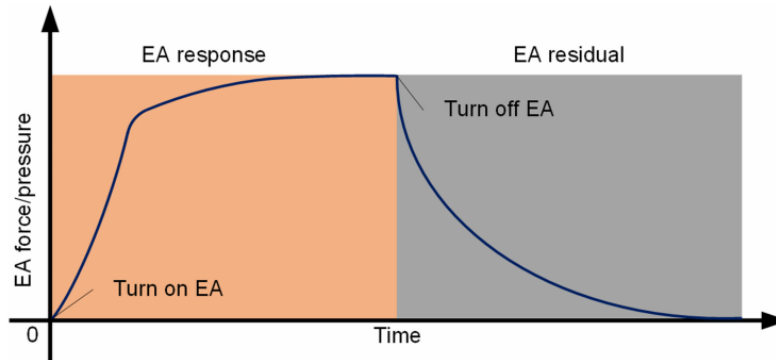


Figura 2.17: Resposta eletroadesiva dinâmica típica e curva de força em relação ao tempo [35].

A electrostática é alcançada em diferentes maneiras, dependendo se o substrato é condutor ou isolador.

Quando um *pad* está a aderir um substrato condutor, os campos eléctricos são gerados entre os dois eléctrodos com bastante facilidade. Cargas opostas começam a se formar sob os eléctrodos que criam a força atractiva para o substrato.

Quando o *pad* está a aderir um substrato não condutor, a força de atracção é gerada através da polarização eléctrica orientacional e interfacial do substrato causado pelo campo eléctrico, resultando na atracção entre as cargas aproximais dentro dos dipolos induzidos e o *pad* [35]. A figura 2.18 mostra o processo para o substrato condutor e isolador.

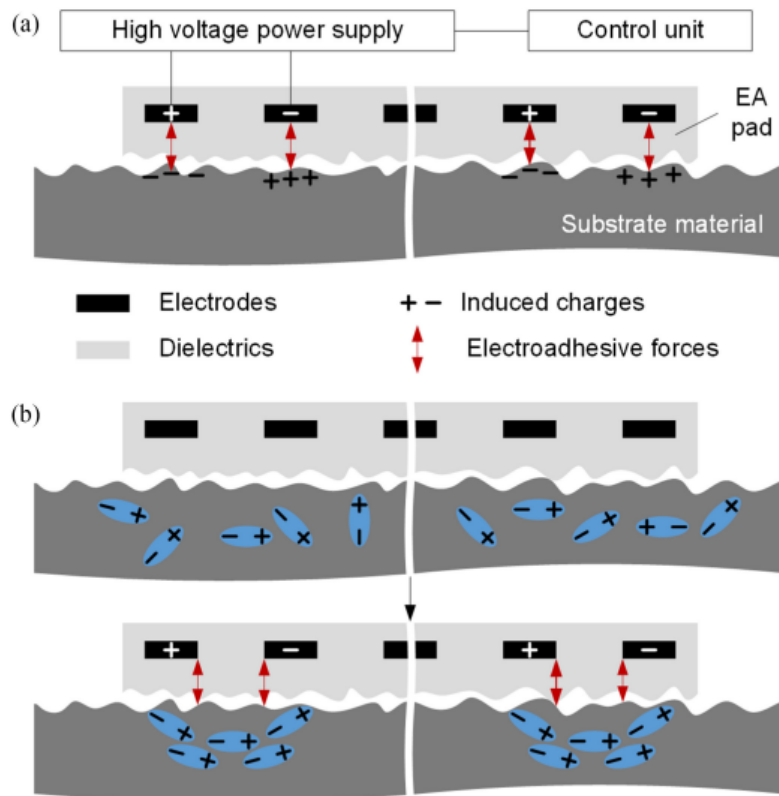


Figura 2.18: Visão transversal de um sistema EA típico. (a) Eletroadesão em materiais condutores. (b) Eletroadesão em materiais isolantes [35].

Nos substratos condutores, os campos eléctricos estarão concentrados principalmente abaixo dos eléctrodos, como indica a figura 2.19 .

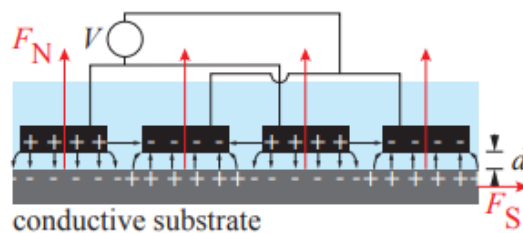


Figura 2.19: Carregamento na superfície de substratos condutores [35].

Já nos substratos isoladores, os campos eléctricos estão concentrados principalmente nas regiões entre os eléctrodos. Os campos eléctricos resultam nas forças de adesão normais e tangenciais (*shear*) entre o *pad* e a superfície do substrato, quando a fonte está ligada, como mostra a figura 2.20. A força tangencial ou *shear* (F_N) é

resultante de forças aplicadas em sentidos iguais ou opostos, neste caso opostos, em direcções semelhantes, mas com intensidades diferentes [35].

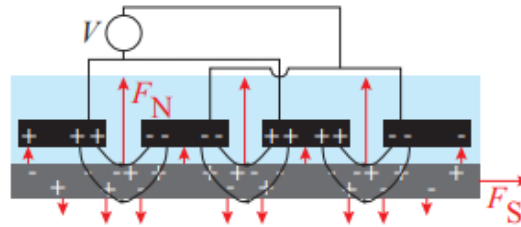


Figura 2.20: Polarização de isoladores [35].

As forças electroadesivas variam significativamente em diferentes substratos. Existe falha de adesão quando se muda o agarrar de materiais isolantes para materiais condutores, pois ocorre ruptura dielétrica quando uma alta tensão é aplicada a substratos condutores [35]. Por isso é que é tão importante criar um sistema otimizado, para produzir grandes forças a fim de conseguir agarrar diferentes materiais usando tensões mais baixas.

Por último, factor ambiental, que até ao momento, foram encontradas poucas evidências para investigar sistematicamente. A influência de factores ambientais nas forças eletroadesivas afectam e modificam as propriedades dielétricas de *pads* eletroadesivos, como rigidez dielétrica, permissividade e resistividade. Além disso, provocam descargas eléctricas e degradação dielétrica que causa a falha de adesão. Testes já foram realizados em laboratórios, em que todas as variáveis mantiveram-se constantes, excepto a temperatura, humidade e pressão do meio ambiente. A figura 2.21 mostra os resultados obtidos ao longo de um período de 5 dias [34].

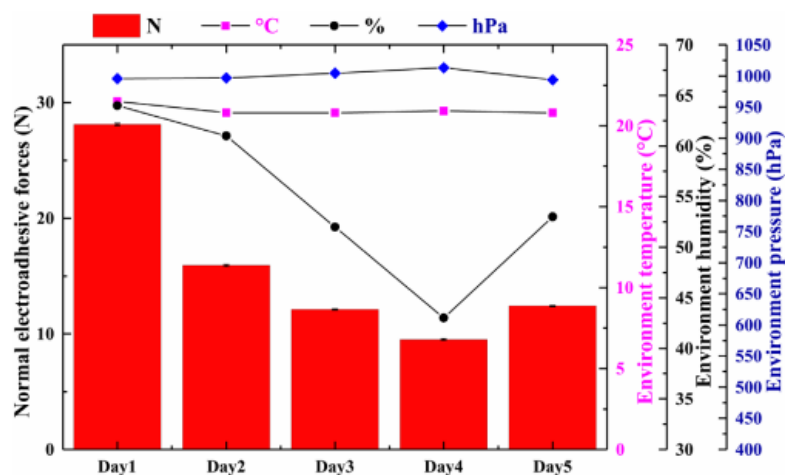


Figura 2.21: Forças eletroadesivas medidas num período de 5 dias [34].

Talvez seja o motivo que dificulta a aplicação actual de soluções eletroadesivas em ambientes industriais, onde forças instáveis e imprevisíveis podem ser atingidas.

A figura 2.22 mostra de forma resumida os principais parâmetros de influência na eletroadesão. De notar que existem outras variáveis que podem influenciar as forças eletroadesivas e que também devem ser investigadas mais detalhadamente. Por exemplo, se a tensão CA for usada, a frequência pode influenciar as forças electroadesivas. Além disso, algumas propriedades dieléctricas, como o factor de dissipação do dieléctrico também pode influenciar.

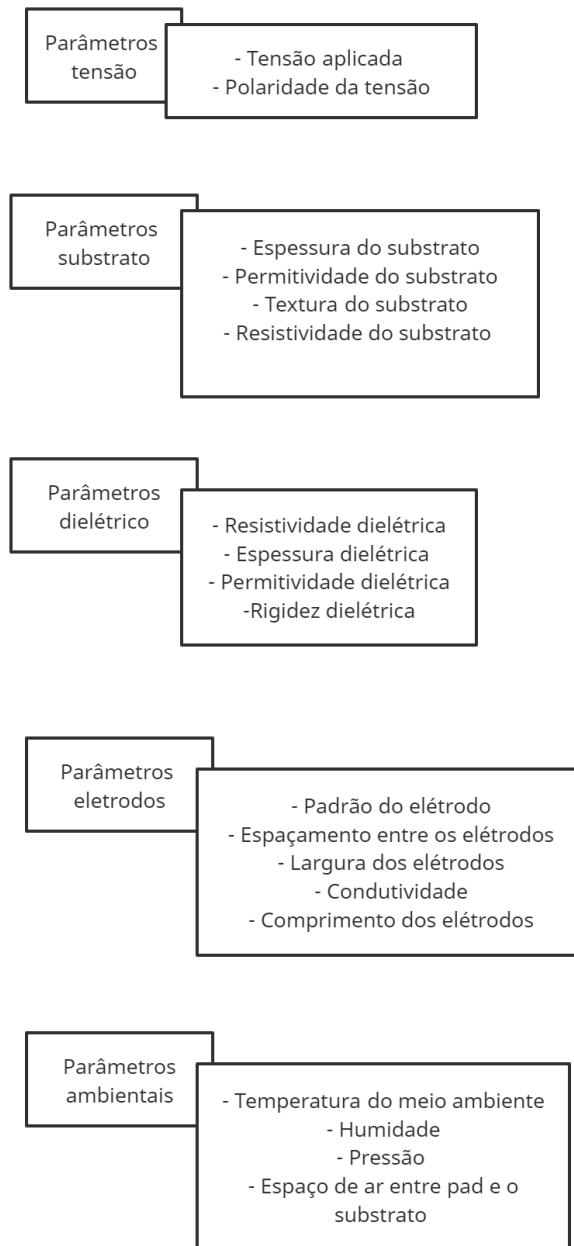


Figura 2.22: Principais parâmetros de influência na eletroadesão.

2.2.4 Exemplos de *pads* feitos para testes

Para iniciar com este projecto foi feita também uma análise de diferentes trabalhos já realizados, em que alguns deles usaram materiais idênticos e outros materiais diferentes. Esta pesquisa permitiu juntar conclusões, indicando uma direcção para o começo da realização dos primeiros testes.

- 1º Exemplo:

Num dos trabalhos realizados por Bin Sun e Xinyu Zhang, estes usaram um *pad* fabricado por processo de corrosão usando FPC (Circuito Impresso Flexível). A base dielétrica e a camada isoladora foram do material de poliamida (PI) com espessura de $25\mu\text{m}$ e os eléctrodos foram de cobre. A largura dos eléctrodos e o espaçamento entre eles foram de 1mm. Teoricamente, para alcançar uma força de electroadesão maior sem quebra de tensão, a camada de isolamento deve ser o mais fina possível.

Conclusão: os resultados experimentais indicaram que o *pad* eletroadesivo com os eléctrodos interdigitados conseguem agarrar numa variedade de materiais. Além disso, verificou-se que houve uma interrupção eléctrica do *pad*, ou seja, ruptura no eléctrodo, quando o valor de tensão ultrapassou os 1750V [36].

- 2º Exemplo:

Um trabalho feito por Donald Ruffatto, em que este também fabricou um *pad* de forma idêntica ao primeiro exemplo, os eléctrodos são de cobre, utilizaram como base dielétrica e como isolador a fita PI. Foi observado durante os testes que ao longo de um período de várias horas o desempenho da fita PI degradaria sob a exposição de uma alta intensidade do campo eléctrico, levando à ruptura da fita. Assim, fizeram outro estudo para materiais alternativos, como mostra a figura 2.23.

Property	PEN	PI	PPS	PET
Continuous use temp. (°C)	180	240	180	105
Dielectric breakdown (kV/mm)	300	280	320	280
Dielectric constant	2.9	3.3	2.8	3.1
Water absorption (%)	0.3	1.3	0.02	0.4

Figura 2.23: Comparação das propriedades de material dielétrico [37].

As fitas de polietileno-tereftalato (PET) e polietileno-naftalato (PEN) demonstraram servir como alternativas viáveis. PEN e PET não quebraram ou degradaram durante os testes a longo prazo. A fita de sulfeto de polifenileno (PPS) também poderia ser um bom dielétrico mas não foi testado devido a dificuldades de obtenção do material.

Conclusão: a fita PET e PEN não obtiveram qualquer quebra dielétrica ao longo de 5 semanas com uma tensão aplicada nos eléctrodos de 5kV, em comparação à fita PI que sofria consistentemente quebra dielétrica após algumas horas. De acordo com a figura acima, a fita PEN e PET tem taxas de absorção de água muito mais baixas do que PI. Esta taxa de absorção de água pode ser uma variável que

impede um bom funcionamento a longo prazo do PI relativamente a PEN e PET [37].

- 3º Exemplo:

Neste trabalho, também realizado por Donald Ruffatto, a montagem do *pad* foi os eléctrodos em cobre, a base dieléctrica em acrílico e a camada isoladora de dimetil polissiloxano (PDMS). Estes testes não consistiram em testar o material do *pad*, mas sim dos padrões dos eléctrodos. Com base nos testes o padrão círculo concêntrico forneceu os mais altos níveis de força tangencial, o design dos eléctrodos interdigitados também foram eficazes. Em materiais lisos, o *pad* criou campos suficientemente fortes, isto porque a área de contacto era alta. Em materiais ásperos, o *pad* proporciona maiores pressões de força tangencial.

Conclusão: no geral, neste trabalho, o *pad* eletroadesivo foi o mais robusto em diferentes tipos de superfícies devido à optimização da intensidade do campo eléctrico a partir dos padrões dos eléctrodos e a um novo processo de fabricação [38].

2.3 Tecnologia eletroadesão VS outras tecnologias

Esta nova tecnologia, eletroadesão, visa abordar algumas deficiências de outras tecnologias já desenvolvidas. Um dos principais benefícios da tecnologia de eletroadesão é a independência dos materiais a serem manuseados. Não importa se o material é electricamente condutor ou isolador, rígido ou flexível, permeável ao ar ou hermético.

Outro benefício da eletroadesão é a sua eficiência energética. O campo electrostático do *pad* aumenta em milissegundos. Uma vez que o campo esteja estável, o fluxo de corrente pára e nenhuma energia adicional é consumida. Dependendo do material e do processo, pulsos de recarga de corrente podem ser aplicados. Um *grripper* do tamanho de uma folha de papel DIN A4 só precisa de aproximadamente 4,5 kWh de energia eléctrica para um milhão de operações de prensão, o que é muito menos do que o consumo de energia de um *grripper* a vácuo.

A tecnologia eletroadesiva também opera sem ruído, tornando-a amiga do ambiente. Mesmo que sejam usadas altas tensões de vários kV, todo o processo é seguro pois tem isolamento adequado contra o meio ambiente [39].

A figura 2.24 mostra as vantagens e desvantagens de usar outras tecnologias com a tecnologia da eletroadesão.

Tecnologia	Grandes forças	Uso repetido de superfícies empoeiradas?	Funciona em superfícies ásperas e lisas?	Custo de energia para mover	Custo de energia para pousar	Não prejudicial/sem ruído	Materiais com classificação espacial
Adesão química	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho
Ventosas	Verde	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Verde	Verde	Vermelho
Gecko sintéticos	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo
Garras mecânicas	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Vermelho	Verde
Eletroadesão	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde

Figura 2.24: Comparação da tecnologia eletroadesão com outras tecnologias.

Como se pode observar, a tecnologia eletroadesão tem apenas duas desvantagens, não consegue pegar em objectos muito pesados por não criar grandes forças, e para pousar objectos, pois tem de haver uma descarga para conseguir fazê-lo.

2.4 *Grippers* eletroadesivos desenvolvidos

Devido aos benefícios mencionados no outro capítulo, incluindo adaptabilidade aprimorada, complexidade reduzida, baixo consumo de energia e características de manuseio de materiais, as tecnologias EA têm sido amplamente empregado em campos de robótica, incluindo preensão, rastejando / escalando, adesão controlável e activa.

Classifica-se os *Grippers* EA robóticos existentes em formas rígidas, flexíveis / complacentes e extensíveis [35].

Os *Grippers* Rígidos EA incluem eletroadesivo NASA, o *Gripper* Fraunhofer IPT EA, o *Gripper* Schmalz EA, e o *Gripper* Grabit EA, como mostra respectivamente a figura 2.25.

Os *Grippers* EA Rígidos são úteis para pegar objectos grandes, relativamente pesados e planos, mas não pode ser usado para levantar formas não planas.

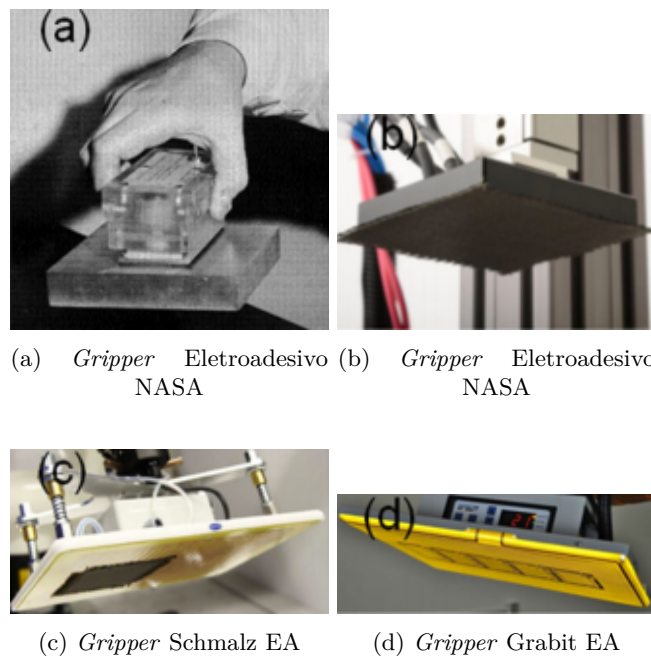


Figura 2.25: *Grippers* Electroadesivos rígidos [35]

Os *Grippers* Flexíveis incluem o Eletroadesivo Flexível da NASA, o *Gripper* EA Compatível com Monkman, o *Gripper* EA Flexível Choi e o *Gripper* EA Flexível JPL [35].

Os *Grippers* EA Flexíveis, como mostra a figura 2.26, podem ser usados para segurar uma ampla gama de desafios superfícies do que garras rígidas, como superfícies convexas.

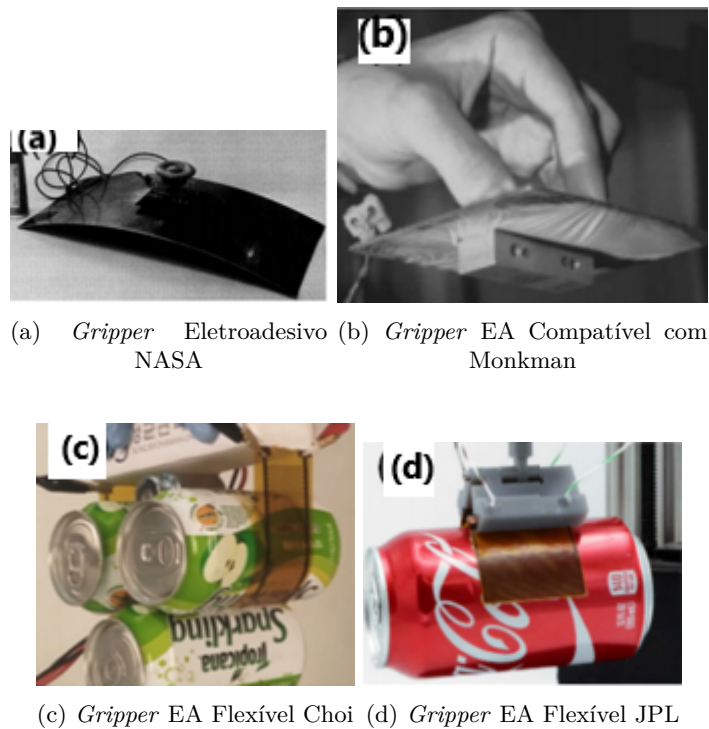


Figura 2.26: *Grippers* Electroadesivos Flexíveis[35]

Stretchable Grippers incluem a *Gripper Soft* Shintake DEA-EA, Guo's EA-DEA *Soft Composite Gripper* e o *Gripper* Guo PneuEA. As garras EA extensíveis, como indica a figura 2.27, são geralmente equipadas com capacidade de mudança de forma, o que significa que podem ser usadas para se adaptar morfologicamente a formas complexas usando sua capacidade de transformação e, em seguida, seleccioná-los usando sua função de eletroadesão [35].



Figura 2.27: *Stretchable Grippers*[35]

Capítulo 3

Sistema

Um sistema de eletroadesão geralmente é constituído por quatro tópicos essenciais:

- O PAD;
- O sistema de potência;
- O sistema de controlo;
- A interface.

Como já foi mencionado no capítulo 2 o *pad* eletroadesivo contém os eléctrodos embutidos em materiais dieléctricos. Os eléctrodos condutores são alimentados por alta tensão fornecido pelo sistema de potência, geralmente na faixa de kV. O sistema de controlo controla o sistema de potência. Por último, é a partir dos comandos da interface que controla-se o sistema de potência. A figura 3.1 mostra o sistema geral de eletroadesão.

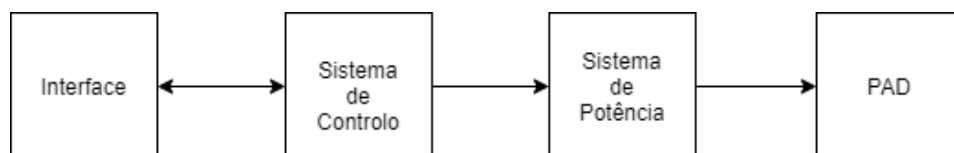


Figura 3.1: Sistema geral de eletroadesão.

3.1 Arquitetura do sistema

Para fornecer uma alta tensão ao *pad* eletroadesivo, é necessário uma fonte de alimentação de alta tensão que gera uma tensão nos intervalos de 5kV a 25kV, dependendo do componente. A figura 3.2 mostra um componente que é um conversor DC/HVDC proporcional.

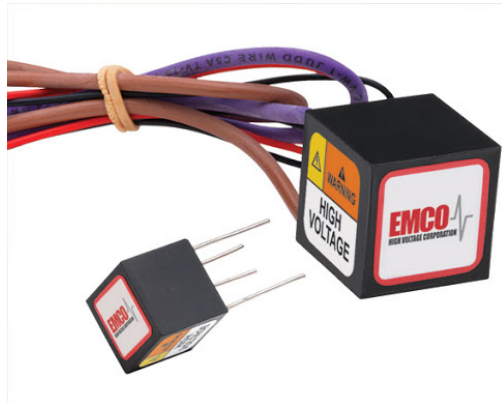


Figura 3.2: Componente conversor DC/HVDC proporcional [40].

Basicamente estes conversores DC/HVDC recebem na sua entrada uma corrente contínua e convertem para corrente contínua em alta tensão. A maioria dos trabalhos realizados usam este componente para criar a alta tensão, pois são ultra-miniaturizados. Definem assim um padrão da indústria em miniaturização de alta tensão pois apresentam uma montagem em PCB que fornece até 7kV a 3W de potência de saída contínua.

Esta série apresenta baixa ondulação, ruído e EMI (*Electromagnetic interference*/RFI (*Radio-frequency interference*)), utiliza um oscilador de onda quase senoidal, técnicas de filtragem e um transformador de núcleo de potenciômetro totalmente fechado.

A tensão de saída é directamente proporcional à tensão de entrada e é linear de aproximadamente 0,7V à entrada máxima. A saída isolada permite a polaridade de saída seleccionável pelo utilizador.

Desta maneira, a figura 3.3 apresenta o esquema eléctrico que o componente efectua.

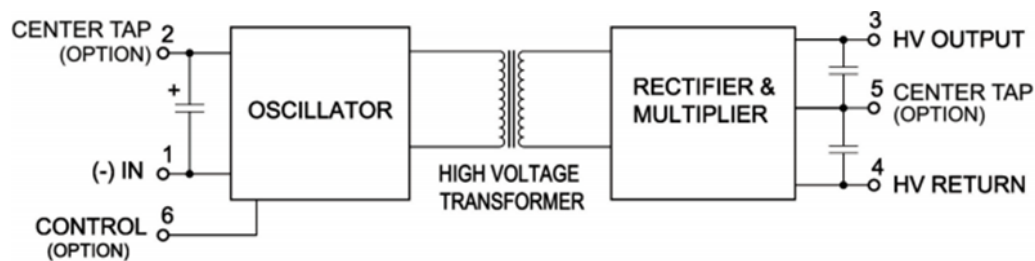


Figura 3.3: Esquema elétrico do conversor DC/HVDC [41].

Apesar de ser um componente que gera alta tensão, este é pouco flexível pois obtém-se pouco controlo, isto é, não consegue-se regular a tensão para valores desejados, o seu valor de tensão é fixo.

Como alternativa, utilizou-se quatro componentes importantes para fornecer uma alta tensão. A figura 3.4 representa o sistema de potência.

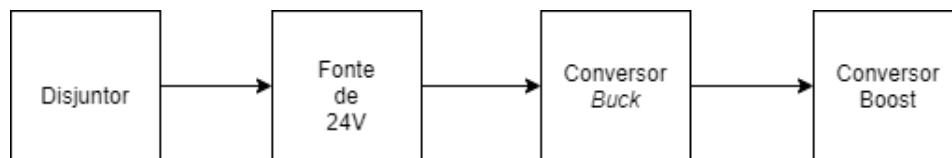


Figura 3.4: Sistema de potência.

Assim sendo, o disjuntor e a fonte de 24V (comutada) estão ligados à rede. A fonte de 24V alimenta o conversor *buck*, que tem a entrada nos intervalos 4-38VDC e a saída 1.25-36VDC, esta saída alimentará o conversor *boost*, que tem a entrada nos intervalos 5-12VDC e a saída 5KV-15KVDC.

No sistema de controlo, o arduino é o componente que controla todo o sistema do projeto. O relé, o botão de pressão e o módulo de relés são os componentes externos que atuam no sistema de potência de modo a controlar o mesmo. O optoacoplador transmite informação ao arduino sobre o sistema de potência. A figura 3.5 representa o sistema de potência.

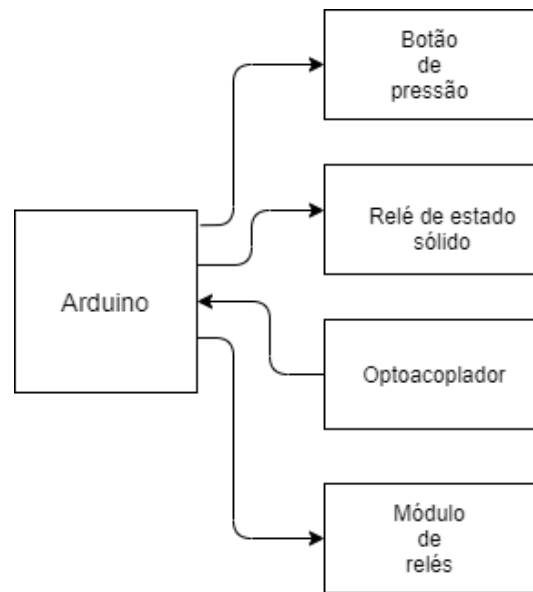


Figura 3.5: Sistema de controle.

É a partir da variação da tensão que se consegue controlar a força do *pad*, quanto maior for a tensão, maior o campo eléctrico, ou seja, maior será a força, e vice-versa. Por isso, este controlo será feito na variação da tensão no conversor *buck*, neste caso substituiu-se o potenciómetro analógico do conversor por uma conjugação de abertura e fecho de relés. Cada relé está ligado a resistência com um determinado valor, e aumenta-se ou diminui-se conforme abertura ou fecho desses relés. Portanto, criou-se um potenciómetro estático, com valores fixos, a partir do controlo de relés.

O relé de estado sólido tem como função ativar e desativar o sistema depois do conversor *buck*. Tanto pode ativar ou desativar a partir de um botão na interface como a partir de um botão de pressão. O optoacoplador serve para dar aviso na interface, caso o sistema de potência esteja ligado ou desligado.

3.2 Sistema de Potência

Para o sistema de potência adquiriu-se os seguintes constituintes para produzir uma alta tensão:

- Disjuntor;
- Fonte 24V;
- Fusível electrónico 10A;
- Conversor *Buck*;
- Fusível electrónico 4A;

- Conversor *Boost*;
- Fusível 10mA;
- Ventoinha.

Como a fonte é comutada, significa que esta faz ligação à rede e é necessário um disjuntor para proteger o circuito. É necessário um conversor *buck* ou abaixador pois na entrada do conversor *boost* ou elevador é imposto uma baixa tensão.

Como já foi referido no subcapítulo de arquitectura do sistema, o sistema eléctrico tem como função fornecer alta tensão a partir dos conversores *step down* e *step up* que são alimentados por uma fonte de 24V. Assim, neste capítulo irá ser apresentado e explicado as escolhas de todos os componentes da parte do sistema de potência.

3.2.1 Disjuntor e fonte comutada

Uma fonte comutada é um dispositivo capaz de converter corrente alternada em corrente contínua, fornecendo tensões eléctricas com boa capacidade de corrente sem necessitar de um transformador. Portanto, a fonte comutada é capaz de substituir fontes lineares, que precisam de transformadores. Por isso, a fonte comutada é um componente compacto, indicado para componentes que precisam de corrente contínua para funcionar.

Para controlar a tensão, temos um circuito que vai controlar a largura do pulso, processo que é denominado PWM, ou modulação por largura de pulso. O PWM funciona controlando o tempo de quando a fonte está a fornecer tensão, ligando e desligando a fonte várias vezes por segundo. Assim, a média da tensão ao longo do tempo assumirá o valor pretendido, neste caso 24V, de acordo com a largura do pulso [42].

O uso de fontes comutadas proporciona diversas vantagens, como:

- Pouco peso;
- Tamanho reduzido;
- Mais eficiente;
- Menor dissipação de calor.

Portanto a figura 3.6 mostra a fonte comutada de 24V escolhida:



Figura 3.6: Fonte comutada de 24V [43].

O disjuntor é um dispositivo de protecção, que tem a função de desarmar quando é identificada uma corrente eléctrica de curto-circuito ou sobrecarga. A figura 3.7 mostra o disjuntor utilizado no projecto:



Figura 3.7: Disjuntor da Siemens [44].

O disjuntor da Siemes é um MCB (*Miniature Circuit Breaker*), que é uma combinação electromecânica de um dispositivo de protecção contra sobrecarga e um dispositivo de protecção contra curto-circuito. A protecção contra sobrecarga consiste em um disparo térmico (disparo retardado) e a protecção contra curto-circuito é assegurada por um dispositivo de disparo magnético (disparo instantâneo). Assim, protegem cabos e sistemas contra efeitos de correntes de sobrecarga e curtos-circuito [44]. Neste projecto é importante o disjuntor fase neutro para garantir o corte em caso de fuga por ruptura do dieléctrico.

3.2.2 Conversor abaixador

Um conversor de topologia *step-down* ou *buck* ou abaixador, é destinado a realizar reduções na tensão, na figura 3.8 pode-se ver o seu circuito elementar:

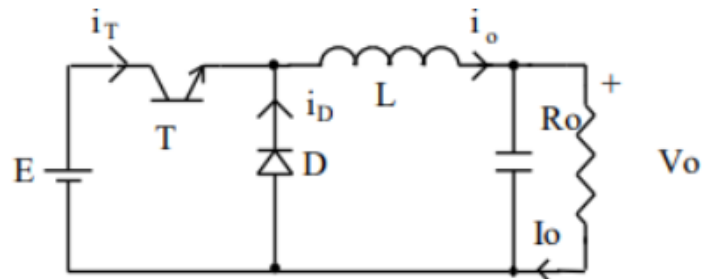


Figura 3.8: Conversor abaixador de tensão [45].

Ao fazer uma análise mais detalhada, pode-se observar que quando o transistor se comporta como um interruptor fechado, a corrente flui, passa pelo filtro LC (bobina e condensador) e chega à carga como tensão contínua, como se pode ver na figura 3.9. O filtro é do tipo passa baixo e a sua função é reduzir as harmônicas da onda.

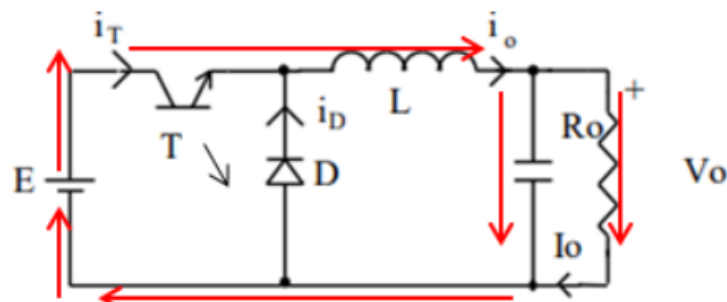


Figura 3.9: Conversor abaixador de tensão [45].

E quando o interruptor está aberto, a bobina é desmagnetizada e também o diodo dissipa a energia que ficou armazenada no condensador da etapa anterior. Assim sendo, o conversor escolhido, como mostra a figura 3.10, tem um intervalo na sua entrada de 4 a 38V, por isso a fonte de alimentação alimenta o abaixador com 24V, estando dentro do intervalo. E a sua saída é de 1.25 a 36V, podendo controlar estes valores de saída a partir de um potenciômetro analógico.



Figura 3.10: Conversor abaixador de tensão [46].

A tensão média de saída depende da relação entre o intervalo em que o interruptor permanece fechado e o período de abertura. Define-se largura de pulso ou razão cíclica como a relação entre o intervalo de condução do transistor e o período de abertura. A figura 3.11 mostra a forma de onda da tensão aplicada ao filtro de saída.

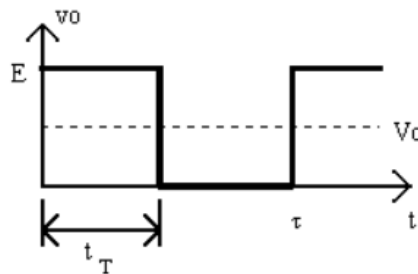


Figura 3.11: Forma de onda da tensão aplicada ao filtro de saída. [46].

Na modulação por largura de pulso (PWM) opera-se com frequência constante, variando-se o tempo em que a interruptor permanece ligado.

O sinal de comando é obtido, geralmente, pela comparação de um sinal de controlo (modulador) com uma onda periódica (portadora) como, por exemplo, uma onda em forma de "dente-de-serra". A figura 3.12 ilustra estas formas de onda.

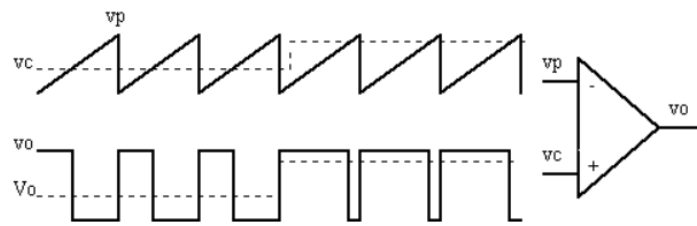


Figura 3.12: Forma de onda da tensão aplicada ao filtro de saída. [46].

Para que a relação entre o sinal de controle e a tensão média de saída seja linear, como desejado, a frequência da portadora deve ser, pelo menos 10 vezes maior do que a moduladora, de modo que seja relativamente fácil filtrar o valor médio do sinal modulado, recuperando o sinal de controle.

3.2.3 Conversor elevador

Um conversor *Step Up* ou *Boost* ou elevador tem como função aumentar a tensão de saída em relação à entrada, sendo que o seu circuito pode ser representado como mostra a figura 3.13:

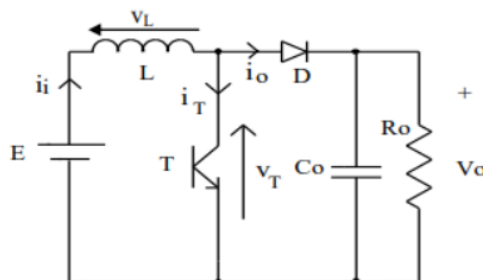


Figura 3.13: Conversor elevador de tensão [45].

Quando o transistor se comporta como interruptor fechado, a corrente percorre apenas a primeira malha do circuito, passando pelo bobina e pelo transistor, sendo que a energia é acumulada na bobina [45], como é representado na figura 3.14.

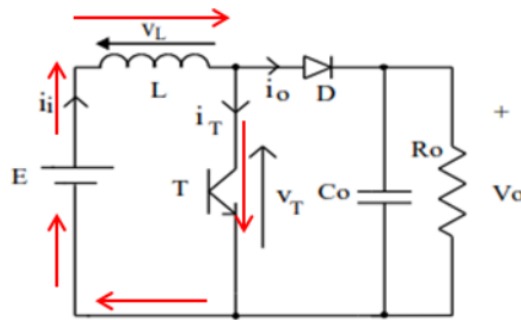


Figura 3.14: Conversor elevador de tensão [45].

Quando o transístor age como um interruptor aberto, o díodo D passa a conduzir, e a bobina e a fonte fornecem energia para a carga, aumentando assim a tensão de saída, com o condensador a actuar como um filtro [45], como está representado na figura 3.15.

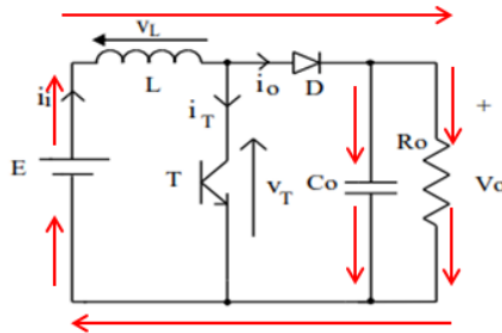


Figura 3.15: Conversor elevador de tensão [45].

Ou seja, o multiplicador de tensão no conversor elevador é um conjunto de condensadores e díodos rectificadores, como mostra a figura 3.16. A tensão passa por os díodos rectificadores e o condensador que está ligado logo após o díodo, é carregado com um fluxo eléctrico ininterrupto do díodo [47].

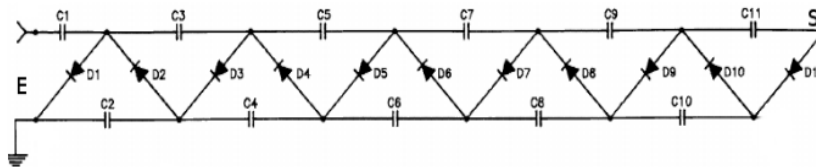


Figura 3.16: Multiplicador de tensão típico [47].

O conversor escolhido, como mostra a figura 3.17, tem um intervalo na sua entrada de 5 a 12V, por isso o conversor *step-down* alimenta o conversor *step-up* de

alta tensão nesse intervalo. E a sua saída é de 5 a 15kV, que é controlado a partir dos valores de tensão de saída do conversor *step-down*.

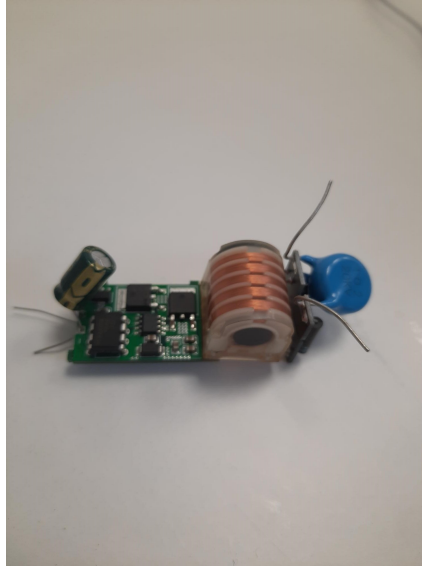


Figura 3.17: Conversor elevador de tensão.

3.2.4 Fusíveis

Um fusível é um filamento de metal que derrete (queima) quando existe uma sobrecarga no circuito.

Como o fusível é um elo de ligação por onde passa a corrente, ele aquece se a variação da corrente for acima do padrão para o qual foi projectado.

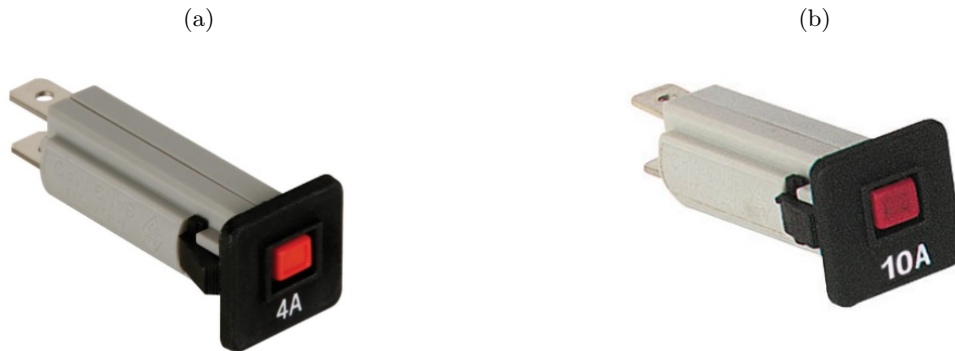
Este aquecimento leva ao derretimento (queima) do filamento e por consequência ao corte de electricidade naquele circuito.

Por esta razão é sempre muito importante que a capacidade dos fusíveis seja sempre bem dimensionada. Porque se ele não queimar pelo excesso de carga, o que poderá queimar é a fiação do circuito, ou os aparelhos ligados nela, com o risco de provocar um incêndio [48].

Assim colocou-se um fusível de 10A depois da fonte de alimentação, outro fusível de 4A entre o conversor abaixador e o conversor elevador, e outro de 10mA na saída do conversor elevador

Os dois fusíveis de 4A e 10A são automáticos, como mostra a figura 3.18a e 3.18b respectivamente, e tem uma duração de vida dos contactos para 500 ciclos. Sabe-se que a fonte de alimentação é de 24V e tem uma potência de 360W, por isso a corrente máxima é de 15A, logo escolheu-se um fusível de 10A. Na saída do conversor *step-down* a corrente máxima é de 5A, por isso escolheu-se um fusível de 4A.

Figura 3.18: Fusíveis automáticos de 4A e 10A [49] [50].



Na saída do conversor *step-up* mediu-se a corrente, variando a sua tensão, e esta nunca ultrapassou os 4 mA. Escolheu-se um fusível de 10 mA, porque no mercado os fusíveis abaixo de 10 mA são limitados e também sabe-se que uma corrente de 10 mA é um choque um pouco doloroso, mas não é fatal. A figura 3.19a e 3.19b mostra o fusível de 10 mA e o porta fusíveis utilizado respectivamente. A tabela 3.1 indica os efeitos no corpo humano à medida que se aumenta a corrente.

Figura 3.19: Fusível de 10 mA e o porta-fusível [51] [52].



Tabela 3.1: Efeitos de um choque eléctrico no corpo humano [48].

Corrente	Reação
1 mA	Leve formigueiro.
5 mA	Choque leve. Perturbador, mas não doloroso.
6-30 mA	Choque doloroso. Controlo muscular é perdido.
50-150 mA	Dor extrema, paragem respiratória, contracções musculares severas.
1-4.3 A	Fibrilação ventricular. A contracção muscular e os danos aos nervos começam a ocorrer.
10 A	Ocorrem paragens cardíacas e queimaduras graves. A morte é provável.

Choque eléctrico é definido como uma resposta repentina ao fluxo de corrente eléctrica através de qualquer parte do corpo de uma pessoa. Electrocussão é a morte causada por choque eléctrico. Lesão eléctrica primária é dano ao tecido produzido directamente por corrente eléctrica ou voltagem. Lesões secundárias, como quedas,

são comuns. Portanto, é importante haver uma certa segurança, para caso aconteça algum acidente, já que consiste num projecto que envolve alta tensão [53].

3.2.5 Ventoinha

Quando o conversor *boost* está ligado durante algum tempo contínuo é característico que a bobina fique demasiado quente, aquecendo em demasia o conversor. Para resolver esse problema adicionou-se uma ventoinha, como mostra a figura 3.20, e funciona como um simples sistema de refrigeração.

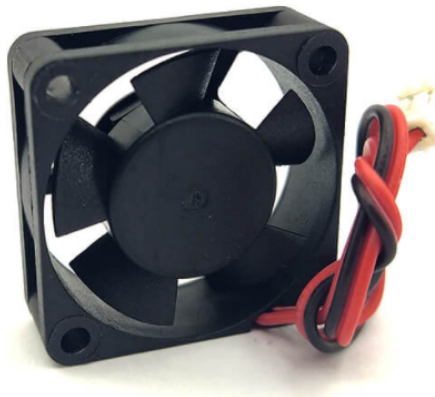


Figura 3.20: Ventoinha [54].

3.3 Sistema de Controlo

3.3.1 Arduino

O sistema de controlo, como o próprio nome diz, tem a funcionalidade de controlar o nível de intensidade do campo eléctrico criado pelo *pad*. Todo este controlo é feito através a partir da placa arduino que, por sua vez, comunica com a interface gráfica mutuamente.

Foi escolhido a placa de Arduino Uno com o microcontrolador ATmega328P, como pode ser visualizado na figura 3.21, pois este possui várias vantagens como, a de programação a partir de uma interface USB e é também compatível com um módulo de 8 relés.



Figura 3.21: Placa de Arduino Uno com microcontrolador AT-Mega328P [55].

O microcontrolador ATmega328P faz parte da família de microcontroladores de 8 bits CMOS baseado na arquitectura AVR lançada pela ATMEL. Entre as principais características, pode-se encontrar [55]:

- Até 20 MIPS (milhões de instruções por segundo) a 20 MHz;
- Memória de programa FLASH de 32 KB, programável dentro do sistema;
- Memória *Serial Ram* (SRAM) interna de 2 KBytes;
- *Electrically erasable programmable read-only memory* (EEPROM) de 1 KByte;
- 6 Canais analógicos para o *Analog to Digital Converter* (ADC).

Na figura 3.22 pode-se ver as portas e os pinos de tensão. No total existem 23 entradas/saídas programáveis, para uso geral (GPIO). Estes pinos também podem ser programados para funções alternativas, como comunicação serial, ADC, I2C, etc. A seguir estão as portas e os pinos principais do microcontrolador [55].

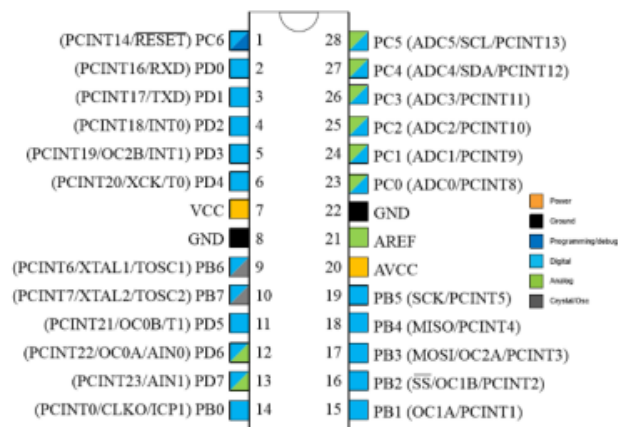


Figura 3.22: Pinos do microcontrolador ATmega328P [55].

3.3.2 Módulo de 8 relés

O módulo de 8 relés é uma substituição do potenciómetro analógico do conversor *buck*, ou seja, a tensão aumenta ou diminui a partir de uma conjugação de abertura ou fecho dos 8 relés.

Sabe-se que os relés são componentes que podem ser electromecânicos ou electrónicos, criados com a função de produzir modificações súbitas em um ou mais circuitos eléctricos de saída. Os relés possuem um circuito de comando, que ao ser alimentado faz a comutação de outro par de contactos ligados a um circuito ou comando secundário. Resumidamente, pode-se dizer que, todos os relés se configuram como um contacto que abre e fecha de acordo com um determinado factor na sua entrada [56].

As características deste módulo de relés são [57]:

- A tensão de entrada é de 5V DC;
- Capacidade de contato do relé 250V 10A, a saída é normalmente aberta ou fechada;
- A luz do LED é utilizado para indicar o estado de saída do relé, que pode ser controlada directamente na interface padrão pelo microcontrolador, neste caso é o arduino.
- Os relés nos módulos são independentes.

A figura 3.23 mostra o módulo de 8 relés utilizado neste projecto.



Figura 3.23: Módulo de 8 relés compatível com arduino [57].

O relé em si possui dois pinos que estão conectados a uma bobina e três pinos “de saída”, que se chamam comum (COM), normalmente aberto (NA) ou *normally open* (NO) e normalmente fechado (NF) ou *normally closed* (NC). Quando a bobina não tem energia o comum fecha circuito com o normalmente fechado. Quando a bobina tem energia, o comum fecha o circuito normalmente aberto. A figura 3.24 mostra um esquemático de um relé electromecânico.

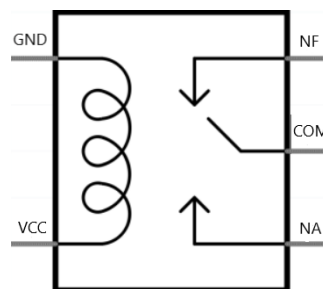


Figura 3.24: Esquemático de um relé electromecânico.

3.3.3 Relé de estado sólido

A funcionalidade deste relé de estado sólido é interromper o circuito entre o conversor *buck* e o conversor *boost*.

Inicialmente usou-se um relé electromecânico, mas o problema deste tipo de relé é que gerava arco eléctrico ou arco voltaico. É basicamente o resultado de um curto-circuito, ou seja, é o acontecimento que surge devido a uma descarga eléctrica, entre dois pólos, superior à resistência do ar e mantida pela formação de gases que agem como meio condutor para a corrente eléctrica. Por isso, todas as vezes que abria-se ou fechava-se os contactos mecânicos do relé carregados de energia, criava-se condições para o surgimento de arcos voltaicos (faíscas). Como alternativa, utilizou-se um relé de estado sólido.

O relé de estado sólido também conhecido por SSR (*Solid State Relay*), é um componente semiconductor que também têm as mesmas funções de um relé electro-mecânico convencional, que é accionar uma carga de maior potência a partir de uma baixa potência aplicada na sua entrada.

O relé de estado sólido é diferente de um relé electromecânico. A principal diferença é que o relé de estado sólido não possui elementos mecânicos ou peças móveis. Sendo assim o seu funcionamento é a partir de componentes semicondutores ao invés dos contactos físicos, como por exemplo, mosfet e scr [56].

Os relés de estado sólido são componentes electrónicos com diversas vantagens, que são:

- O relé de estado sólido não gera arco eléctrico, devido a ausência de contactos físicos;
- A vida útil dos relés de estado sólido é maior, pois apresentam um menor desgaste com o uso, pelo facto do transistor ser um semiconductor, ou seja, não possui componentes mecânicos;
- O tempo de comutação do relé de estado sólido é consideravelmente menor em comparação ao relé electromecânico, dessa forma estes respondem a elevadas frequências de accionamento;
- Relés de estado sólido não geram ruídos, ao contrário dos relés electromecânicos;
- Os relés de estado sólido não geram interferência electromagnética (EMI), quando ocorre comutação;
- A faixa de tensão e corrente de operação do relé de estado sólido é maior;
- Menor tamanho físico;
- Maior resistência a vibrações mecânicas.

O relé de estado sólido, como é apresentado na figura 3.25, tem como tensão de controlo (entrada) de 3 a 32V DC, que é alimentado pelo arduino (5V), e a tensão de carga (saída) de 5 a 200V DC, e que este vai ligar à saída do conversor *buck*.



Figura 3.25: Relé de estado sólido [58].

3.3.4 Botão de pressão

O relé de estado sólido pode ser controlado através da interface ou a partir de um botão de pressão. Programou-se o botão de pressão eléctrico através do arduino. Este tipo de botão funciona da mesma maneira que um interruptor eléctrico, fechando ou abrindo o circuito eléctrico. A principal diferença entre os dois é que quando o botão é carregado a força accionada é sempre exercida no mesmo sentido, enquanto que no interruptor a força accionada varia em função do estado actual e do estado pretendido.

O botão de pressão inclui assim o mecanismo de quando a força de actuação é removida este volta ao estado de repouso, que pode ter os seus contactos abertos - designado por NA (normalmente aberto) - ou pode ter os seus contactos fechados - designado por NF (normalmente fechado). A figura 3.26 mostra o botão de pressão utilizado neste projeto.



Figura 3.26: Botão de pressão [59].

3.3.5 Optoacoplador

Um optoacoplador é um dispositivo na forma de circuito integrado que transmite sinais sem contacto directo, apenas utilizando um fototransistor e um sinal luminoso

no seu interior.

Assim, o fototransístor é accionado quando o LED é ligado, proporcionando a grande vantagem do optoacoplador, comutar dois circuitos de forma isolada [60], como mostra a figura 3.27.

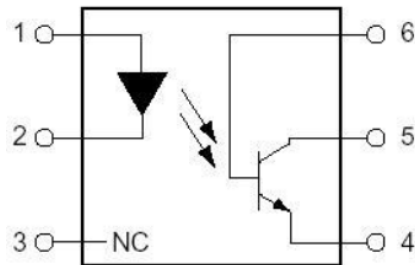


Figura 3.27: Esquemático do optoacoplador num circuito elétrico [61].

Desta maneira, o objectivo do optoacoplador utilizado neste projecto é dar sinal ao arduino do sistema eléctrico, ou seja, dá aviso se o sistema eléctrico está ligado ou não. O aviso é apresentado na interface. O optoacoplador além de ter a vantagem de isolar dois circuitos diferentes, é económico e transmite avisos rapidamente.

A figura 3.28 mostra o optoacoplador utilizado que é o 4N25 e o esquemático deste é o mesmo da figura 3.27.



Figura 3.28: Optoacoplador 4N25 [61].

3.4 PAD

Um *pad* electroadesivo é tipicamente constituído pelo *design* interdigitado, como mostra na figura 2.12. O espaço entre os eléctrodos é geralmente preenchido com um isolador. Quando é aplicado um diferença de potencial eléctrico entre dois pontos, neste caso nos dois eléctrodos e é colocado o *pad* em contacto com um objeto, os campos eléctricos criam cargas opostas no objecto e, assim, causam adesão electrostática entre os eléctrodos e as cargas induzidas do objeto.

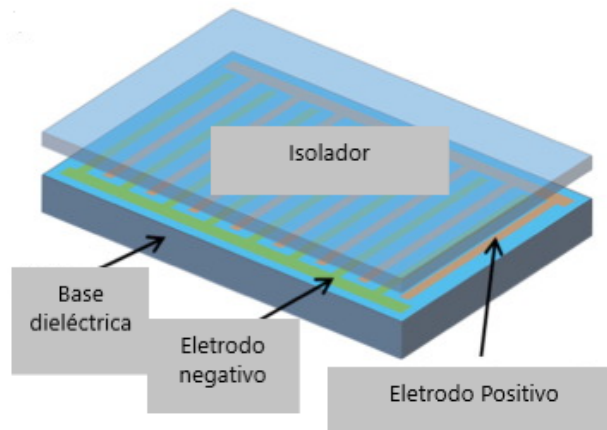


Figura 3.29: Esquema de um *pad* com electrodos interdigitados incorporados.

Conseguiu-se no desenvolvimento do projecto fazer com que o *pad* descarregasse a energia armazenada nele, ou seja, largar o objeto. Apesar de tudo não é uma solução de futuro, pois usou-se um contactor, como mostra a figura 3.30. É um componente robusto, lento e que causa ruído.



Figura 3.30: Contactor [62].

Basicamente, o contactor curto-circuita o *pad*, mas o que faz com que haja a descarga é o arco eléctrico. Toda a energia é transferida para o arco eléctrico, ficando o *pad* totalmente descarregado. A figura 3.31 mostra o esquemático do contactor montado no sistema de potência. Este contactor foi controlado por um botão de pressão, a figura 3.31 não indica, mas quando pressionava-se no botão, o pad carregava, quando deixava-se de pressionar o controlador curto-circuitava o pad, descarregando-o.

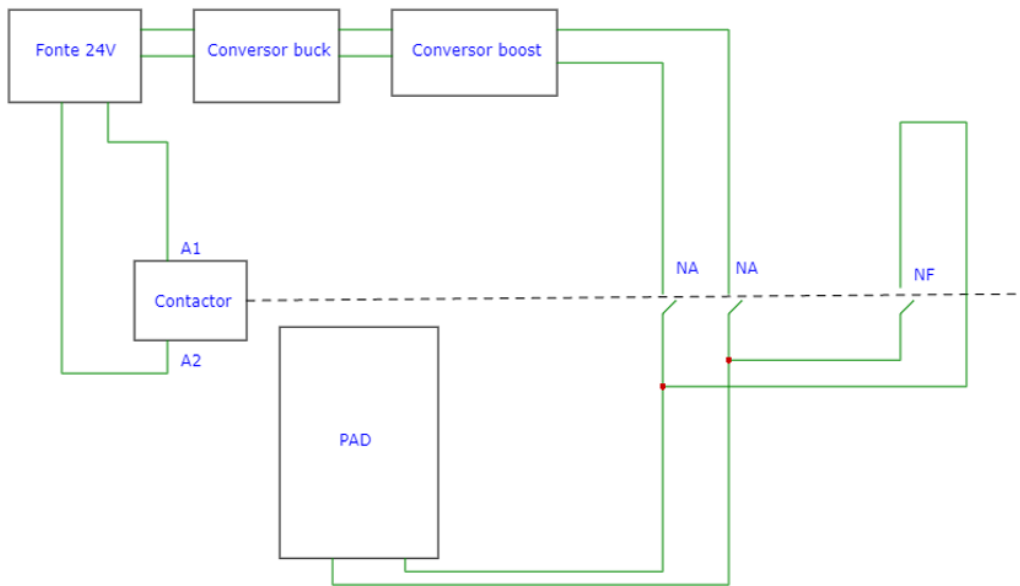


Figura 3.31: Esquemático do contactor com o sistema de potência e o *pad*.

É uma solução que funciona mas não é viável, descartando o conceito de utilizar um componente electromecânico para curto-circuitar o *pad*.

3.5 GUI Visual Studio

Esta interface tem como objectivo visualizar facilmente todas as alterações que ocorram no sistema para que seja possível se verificar um funcionamento estável do sistema eléctrico. Para tal o GUI desenvolvido foi baseado na interface criada pela Soft Robotics. É a partir desta interface criada, como mostra a figura 3.32, que controla-se os níveis de tensão que pretende-se aplicar no *pad*. Também tem a funcionalidade de ligar ou desligar o funcionamento do *pad*, consequentemente contar o número de ciclos.

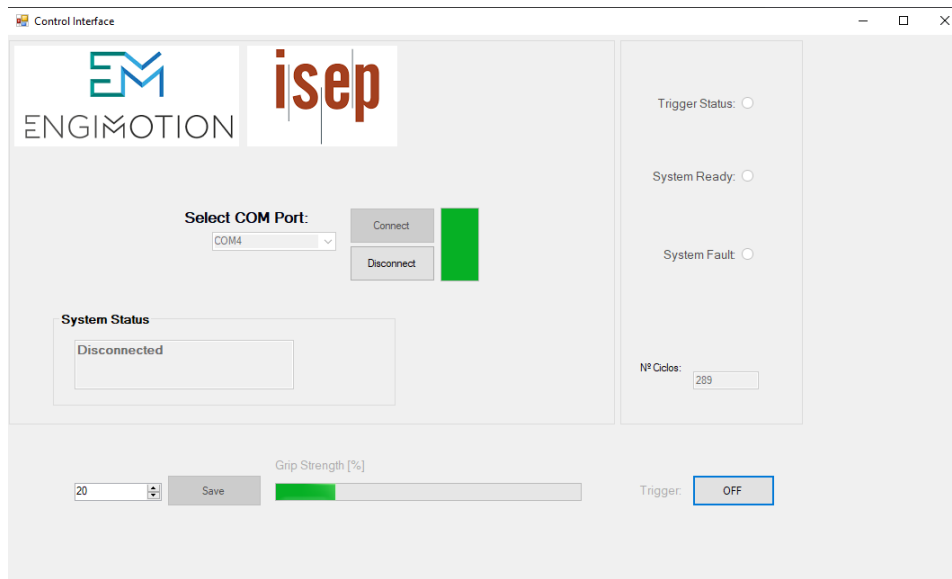


Figura 3.32: Interface

Capítulo 4

Projecto

Como referido no capítulo 3, o protótipo é constituído por 4 estruturas fundamentais: a interface, o sistema de controlo, o sistema de potência e o *pad*. Desta forma, e com a arquitectura do protótipo em mente, é inicialmente indicado os esquemas de montagem e ligação dos componentes para o circuito, como também a explicação do código desenvolvido.

4.1 Hardware

Neste projecto utilizou-se, como já foi referido anteriormente, uma fonte comutada que alimenta o conversor abaixador e consequentemente este alimenta o conversor elevador. Todo este circuito é protegido por um disjuntor e três fusíveis.

Para haver um controlo da tensão aplicado no *pad* utilizou-se resistências e um módulo de relés que é a substituição do potenciómetro analógico do conversor abaixador.

Entre o conversor abaixador e o conversor elevador tem um relé de estado sólido para activar o *pad* só quando necessário, que é controlado através de um botão de pressão ou da interface.

O optoacoplador tem a função de dar aviso na interface caso o sistema eléctrico esteja ligado ou não.

No anexo A mostra o esquema eléctrico geral do circuito, indicando todas as suas ligações.

4.1.1 Controlo da tensão

Inicialmente para controlar-se a tensão aplicada no *pad* através de uma interface, e não a partir de um potenciómetro analógico, usou-se um módulo de 8 relés e resistências.

Sabe-se que o potenciómetro analógico funciona através de uma acção mecânica, usando interruptores. Isso é feito através de uma "escada" de resistências, uma série de pequenas resistências em série. A cada degrau da escada, um interruptor está presente. Quando um interruptor fecha, este determina a posição *wiper* (RW). A figura 4.1 mostra o princípio do funcionamento de um potenciómetro analógico.

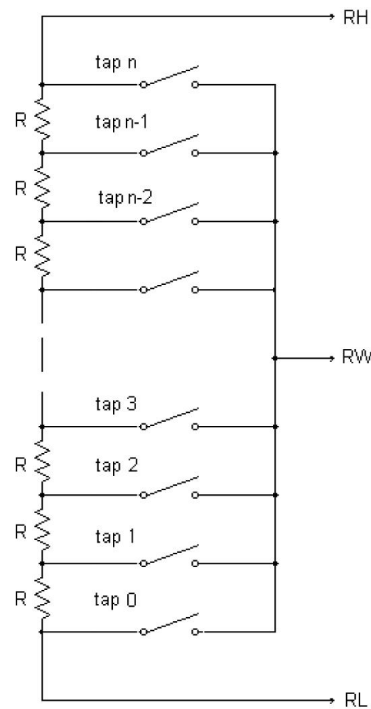


Figura 4.1: Princípio do funcionamento de um potenciómetro analógico.

Sabe-se também que o conversor *boost* tem uma entrada dos 5 aos 12V e uma saída dos 5 aos 15kV, ou seja não é linear. Assim, inicialmente calculou-se a linearidade para 20 posições, aumentando de 5 em 5V a tensão de saída, o que coincidia com uma incrementação de aproximadamente 5%. A figura 4.2 mostra a linearidade da tensão na entrada do conversor *boost*.

ID	Vdc In	Vdc Out	%
1	5	5000	0
2	5,3684	6000	5
3	5,7368	6500	11
4	6,1053	7000	16
5	6,4737	7500	21
6	6,8421	8000	26
7	7,2105	8500	32
8	7,5789	9000	37
9	7,9474	9500	42
10	8,3158	10000	47
11	8,6842	10500	53
12	9,0526	11000	58
13	9,4211	11500	63
14	9,7895	12000	68
15	10,158	12500	74
16	10,526	13000	79
17	10,895	13500	84
18	11,263	14000	89
19	11,632	14500	95
20	12	15000	100

Figura 4.2: Linearidade da tensão na entrada do conversor *boost*.

De seguida mediu-se na saída do potenciômetro analógico (conversor *buck*) os valores das resistências para cada valor de tensão (5 a 12V), como mostra a figura 4.3. Os valores da última coluna são arredondados.

ID	Vdc In	Vdc Out	%	Ohm	kOhm
1	5	5000	0	5500	5,5
2	5,3684	6000	5	6516	6,5
3	5,7368	6500	11	7024	7,0
4	6,1053	7000	16	7532	7,5
5	6,4737	7500	21	8040	8,0
6	6,8421	8000	26	8548	8,5
7	7,2105	8500	32	9056	9,1
8	7,5789	9000	37	9564	9,6
9	7,9474	9500	42	10072	10,1
10	8,3158	10000	47	10580	10,6
11	8,6842	10500	53	11088	11,1
12	9,0526	11000	58	11596	11,6
13	9,4211	11500	63	12104	12,1
14	9,7895	12000	68	12612	12,6
15	10,158	12500	74	13120	13,1
16	10,526	13000	79	13628	13,6
17	10,895	13500	84	14136	14,1
18	11,263	14000	89	14644	14,6
19	11,632	14500	95	15152	15,2
20	12	15000	100	15660	15,7

Figura 4.3: Valor das resistências para cada valor de tensão.

Quando liga-se o circuito, pretende-se que o conversor *buck* forneça na sua saída uma tensão de 5V, então é necessário uma resistência de 5,5k Ω . Na figura 4.3 observa-se que os valores das resistências aumentam de 5 em 5k Ω . Construiu-se

uma tabela em binário, figura 4.4, com uma combinação lógica que resultou no somatório pretendido. '1' corresponde ao fecho e o '0' à abertura.

Binário					kOhm Calc
0	0	0	0	0	5,5
0	1	0	0	0	6,5
1	1	0	0	0	7
0	0	1	0	0	7,5
1	0	1	0	0	8
0	1	1	0	0	8,5
1	1	1	0	0	9
0	0	0	1	0	9,5
1	0	0	1	0	10
0	1	0	1	0	10,5
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	11,5
1	0	1	1	0	12
0	1	1	1	0	12,5
1	1	1	1	0	13
0	0	0	0	1	13,5
1	0	0	0	1	14
0	1	0	0	1	14,5
1	1	0	0	1	15
0	0	1	0	1	15,5
Relé 1	Relé 2	Relé 3	Relé 4	Relé 5	

Figura 4.4: Tabela em binário que mostra a conjugação de relés.

A tabela 4.1 mostra o valor das resistências que cada relé tem.

Tabela 4.1: Resistências correspondentes a cada relé.

Relés	Resistências
1	0.5k Ω
2	1k Ω
3	2k Ω
4	4k Ω
5	8k Ω

A figura 4.5 mostra uma maneira simples do funcionamento dos relés a substituir no potenciómetro analógico do conversor *buck*.

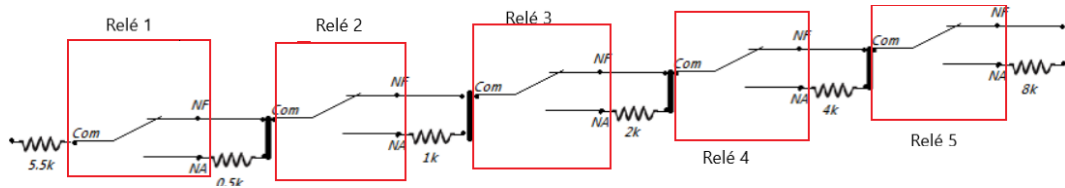


Figura 4.5: Esquema simplificado do funcionamento dos relés.

O comum (COM) de cada relé é ligado ao normalmente fechado (NF ou NC) do relé seguinte, funcionando como escada. A primeira resistência, $5,5k\Omega$, é ligada a uma das extremidades do potenciômetro analógico, VW ou VH, e o comum (COM) do último relé liga ao Vss do potenciômetro analógico. A figura seguinte mostra o esquema eléctrico do sistema de potência ligado ao pad, e o módulo de relés ligado ao conversor *buck* e arduino, que comunica com a interface.

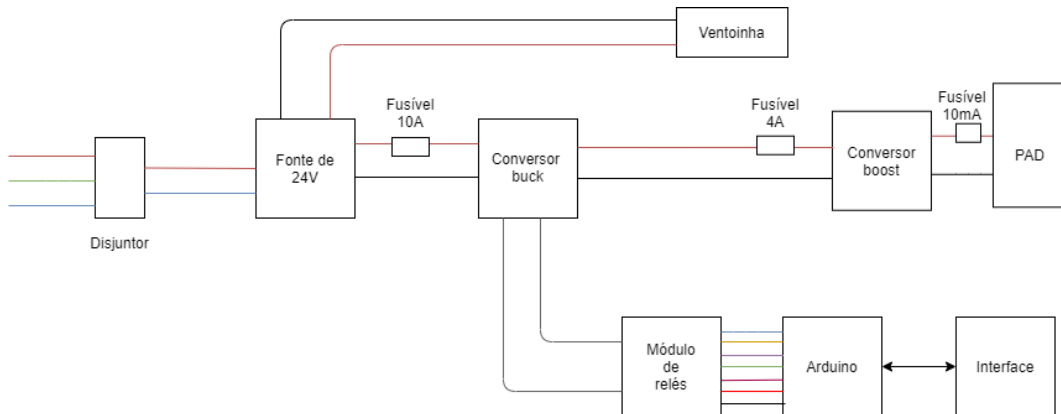


Figura 4.6: Esquema eléctrico com os módulos relés.

Depois de concluir o funcionamento do regulador de tensão através de relés e resistências, o próximo passo seria controlar a tensão através de um potenciômetro digital. Não foi possível pois este oscilava demasiado, ou seja, não fixava em valores dos quais se pretendia estabilizar.

4.1.2 Relé de estado sólido

As conexões são simples para o relé de estado sólido foi preciso apenas duas ligações para o funcionamento do relé: um sinal de comando e uma ligação com a carga (conversor *boost*). O sinal de comando é feito a partir do botão de pressão ou então é controlado a partir de um botão da interface. O botão de pressão é programado a partir no arduino, e este basicamente simula em face do projecto a saída do robô. Quando é a partir da interface é ligação directa do arduino para o relé de estado sólido. A figura 4.7 mostra as ligações feitas do relé de estado sólido com o sistema de potência, o botão de pressão, o arduino e interface.

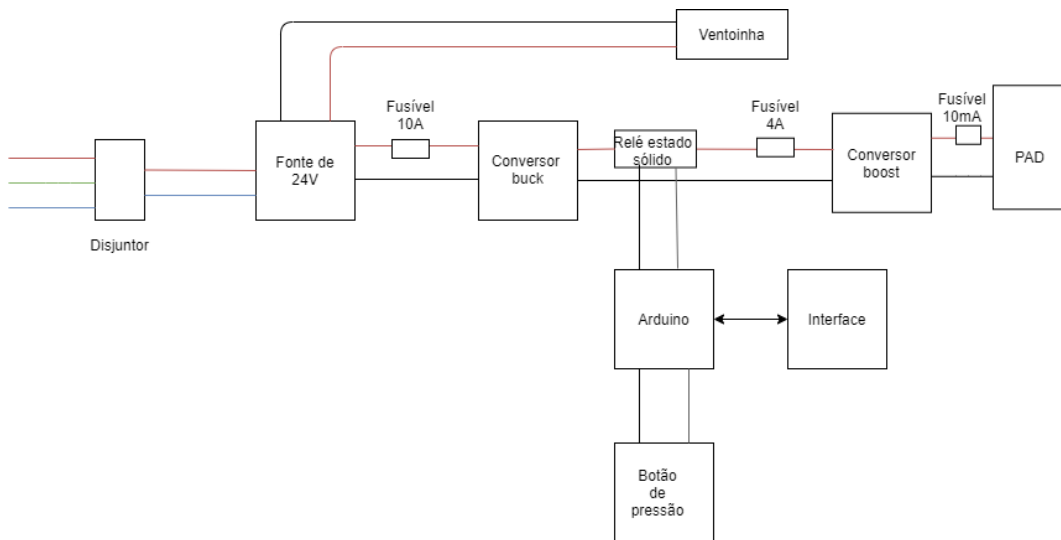


Figura 4.7: Esquema eléctrico con el relé de estado sólido y botón de presión.

4.1.3 Optoacoplador

O optoacoplador comunica com o arduino, pois este dá informação se o sistema de potência está ligado ou desligado. Desta maneira os pinos do LED são ligados à fonte de 24V com uma resistência de $15k\Omega$ para limitar a corrente no LED. O pino do coletor é alimentado com 5V e o pino do emissor tem a entrada analógica do Arduino, A0, pode-se ver estas ligações no Anexo A.

Quando a fonte está alimentar o LED, o fototransistor entra em condução, e assim dá aviso na interface que o sistema eléctrico está ligado. O mesmo se aplica ao contrário, quando não passa corrente no LED, o fototransistor entra em corte, e a interface recebe o aviso que o sistema eléctrico não está ligado.

A seguinte figura 4.7 mostra as ligações feitas do optoacoplador com o sistema de potência, o arduino e interface.

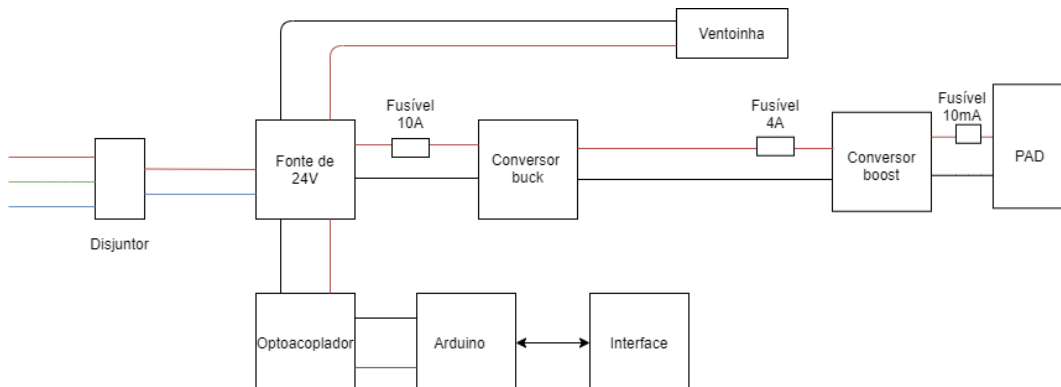


Figura 4.8: Esquema eléctrico con el optoacoplador.

4.2 Software

O software é o programa que mostra uma simulação, ou seja, faz a interface entre a electrónica e o utilizador. Todo o controlo da electrónica foi a partir do arduino. O software utilizado para a interface foi o Visual Studio. Quanto à programação da plataforma, esta é compatível com C# que permite a criação de uma variedade de aplicativos executados no .NET Framework.

4.2.1 Arduino

Todos os componentes que atuam no sistema de potência, o módulo de relés, o botão de pressão, o relé de estado sólido e de uma forma indirecta, o optoacoplador, são controlados a partir do arduino. Todo o código do arduino está no Anexo B.

Para programar os relés de estado sólido foi primeiro declarado uma função com o nome *setup*. O que esta função faz é executar os comandos de uma outra função, neste caso, configura todos os pinos dos relés como saída, `pinMode(relé, OUTPUT)`, e atribui a cada um deles um nível lógico alto, `digitalWrite(led,HIGH)`.

Após a função *setup* ser chamada, criou-se a função *loop* que é chamada repetidamente até o arduino ser desligado.

Na função *loop* criou-se uma função *if(serial.available())*. A função *serial.available()* retorna o número de bytes (caracteres) disponíveis para a leitura da porta serial. Na função *if* criou-se a função *switch (Serial.read())* pois vai verificar qual o carácter recebido. Por exemplo se for *case 'B'* vai apenas ativar o relé 1, pois atribui o nível lógico baixo ao relé, `digitalWrite(relé, LOW)`. A figura 4.9 mostra o fluxograma de funcionamento do módulo de relés.

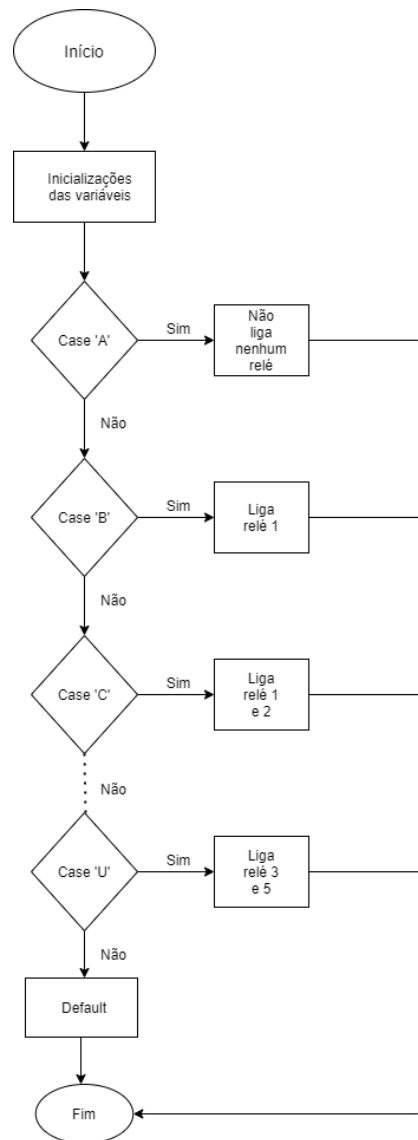


Figura 4.9: Fluxograma do módulo de relés.

Para o relé de estado sólido definiu-se, na função *setup*, o pino 7 como saída, `pinMode(7, OUTPUT)`, e o botão de pressão como pino 6 e também como saída, `pinMode(6,OUTPUT)`. Atribuiu-se ao botão de pressão o nível lógico baixo (funciona ao contrário dos relés de arduino). Definiu-se também na função *setup* uma variável "`memoria=EEPROM.read(0)`", pois o objetivo é guardar o número de ciclos mesmo depois do sistema ser desligado e assim a memória indicada é EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*). Deste modo, `memoria=EEPROM.read(0)`, vai ler sempre o último valor que é guardado na memória.

Na função *loop*, quando chama-se *case '1'*, ativa-se o relé, quando *case '2'*, desliga-se o relé e incrementa-se um ciclo na memória, `EEPROM.write(0, memoria)`. A figura 4.10 mostra o fluxograma para ativar ou desativar o relé de estado sólido a

partir da interface.

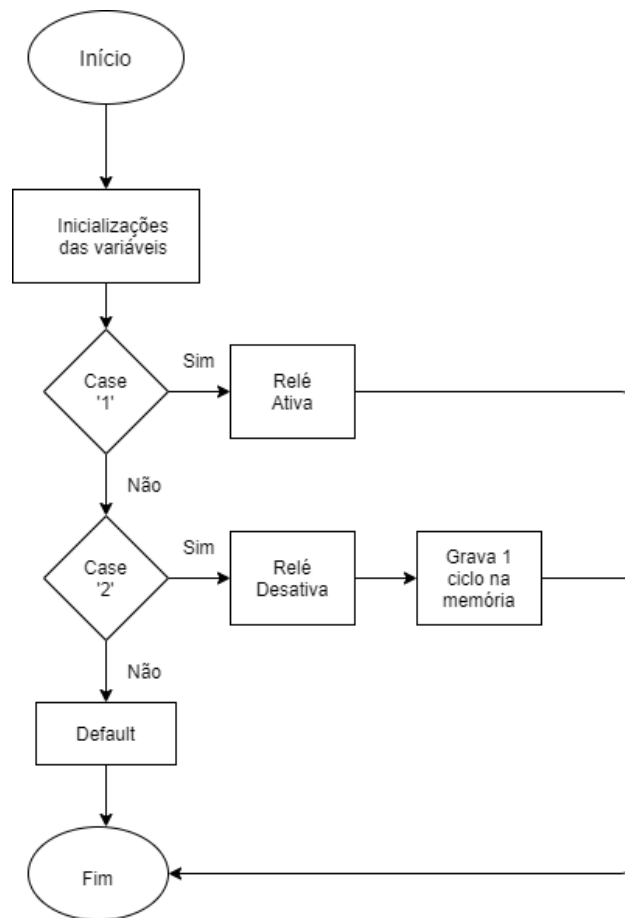


Figura 4.10: Fluxograma do relé de estado sólido.

Para programar o relé botão de pressão foi criado um ciclo *while*. Por isso enquanto o botão estiver a ser pressionado, a função *digitalRead* lê o valor de um pino digital 6 e caso seja verdade o relé fica activo, senão fica desactivo. A figura 4.11 mostra o fluxograma do funcionamento do botão de pressão com o relé de estado sólido.

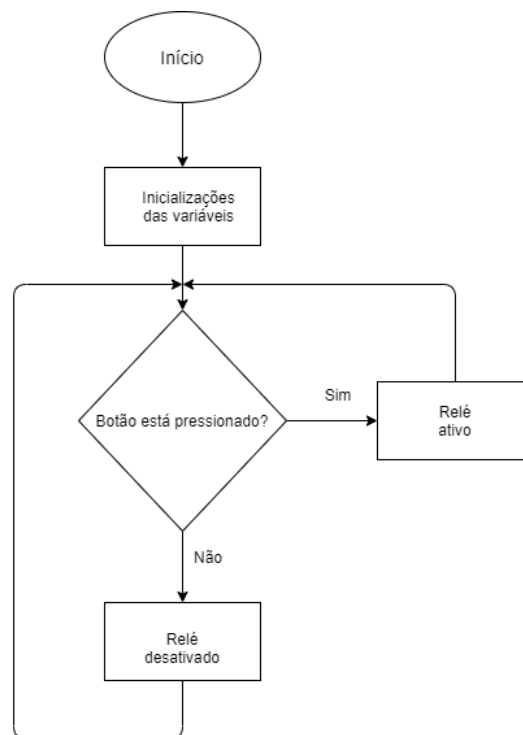


Figura 4.11: Fluxograma do botão de pressão.

O optoacoplador recebe sinal do sistema de potência. Desta maneira, foi definido na função *setup* como pino A0 de entrada, `pinMode(A0,INPUT)`.

Na função *loop* foi definido uma variável `dataSensor1=analogRead(A0)`, pois é necessário ler o valor do pino analógico. Se a variável `dataSensor1` for maior que 1 é porque o sistema de potência está ligado e assim envia um *println* para o *serial* a informar que está conectado. Caso contrário envia um *println* para o *serial* a informar que está desconectado. A figura 4.12 mostra funcionamento do optoacoplador com o arduino a partir de um fluxograma.

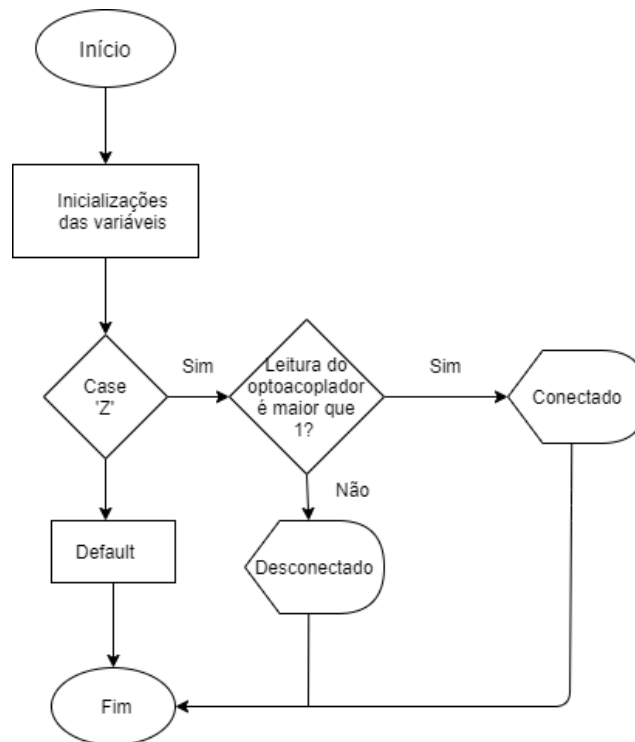


Figura 4.12: Fluxograma de funcionamento do optocoplador com o arduino.

4.2.2 Interface

Foi desenvolvido um software de monitorização através do GUI em C#, capaz de controlar a tensão do sistema de potência, aumentando ou diminuindo, ou então ligar ou desligar. Este programa também mostra o número de ciclos que o sistema (*gripper*) executa. O código feito no Visual Studio está no Anexo C. Desta forma, na figura 4.13 pode-se visualizar a visão geral dos recursos e controlos do software.

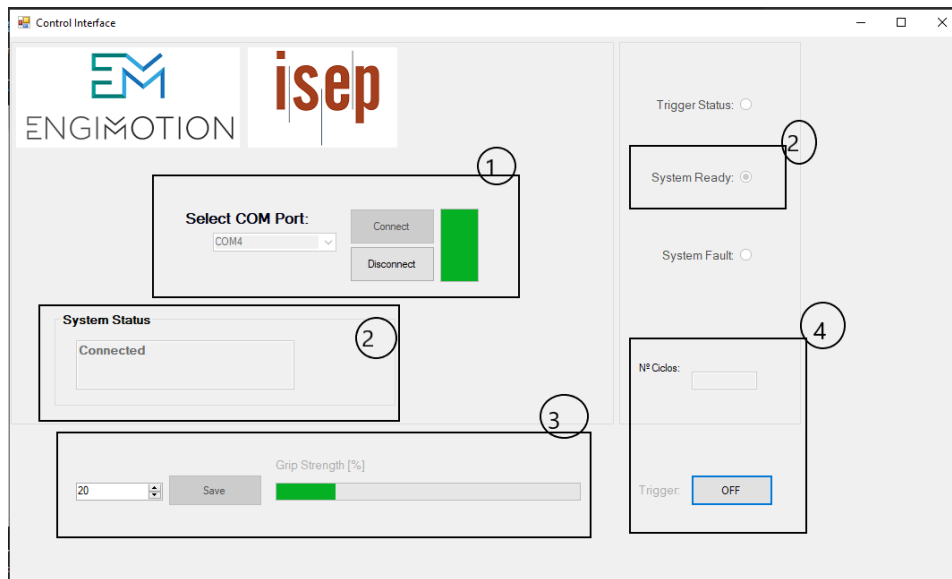


Figura 4.13: Modo de funcionamento da interface.

O primeiro passo a realizar é seleccionar a porta do arduino na *comboBox*. Clicar no botão *Connect*, e logo de seguida a *progressBar* irá ficar totalmente preenchida caso a porta seja conectada com sucesso.

Consequentemente, segundo passo, *System Status* irá receber informação se o sistema de potência está conectado ou não. Se estiver conectado então o *radioButton* (*System Ready*) ficará preenchido. Caso não esteja, só a *textBox* *System Status* irá informar que o sistema de potência está desconectado.

O terceiro passo é para controlar a tensão, selecciona-se a percentagem que se pretende no *numericUpDown*, aumentando ou diminuindo de 5% em 5%. Clica-se no *button* *Save* para este atualizar a segunda *progressBar*.

Por último, o *Button Trigger* é para ativar ou desativar o *pad*, interrompendo o circuito entre o conversor *buck* e o conversor *boost* a partir do relé de estado sólido. Este *Button Trigger* funciona da mesma maneira que o botão de pressão, se pressionar está activar o *pad*, senão está a desactivar. Para isso mudou-se o evento do *Button* para *MouseDown* e *MouseUp*. Sempre que é largado o *Button Trigger* é contado um ciclo. Esta contagem de ciclos é importante para o futuro, pois são registos retentivos para o uso do equipamento.

4.2.3 Comunicação arduino e interface

Uma interface entre o arduino e um computador é importante durante o desenvolvimento do projecto, pois é necessário o controlo de componentes/dispositivos através de uma interface gráfica. A comunicação entre a placa Arduino e o computador é feita através de uma porta serial emulada através do driver da USB.

Esta comunicação entre o arduino e o computador é uma comunicação serial assíncrona no qual cada sinal de inicialização (*start*) é enviado previamente para cada byte, caractere ou código de palavra e um sinal de finalização (*stop*) é enviado após cada código de palavra. Por isso, a interface é o *master* e o arduino é o *slave*. Deste modo, a interface envia uma trama com as ordens que o arduino tem que executar, como mostra a figura 4.14.

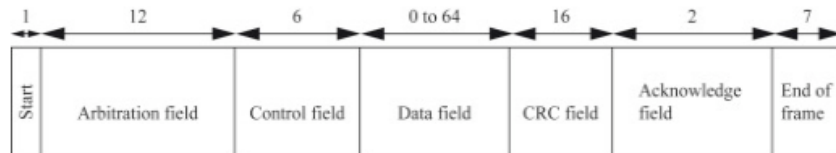


Figura 4.14: Trama que a interface envia para o arduino.

No campo *Data field* é onde estão todos os caracteres que a interface envia para o arduino. Por exemplo, se enviar o caractere 'Q', o arduino vai ativar os relés 1 e o 5 do módulo de relés.

Quando é o *slave* a enviar informação para o *master*, o programa da interface tem sempre uma função para receber dados, *DataReceived*. Por exemplo, quando a interface envia o caractere 'Z', o arduino recebe a ordem, executa e faz um *Serial.println*, e assim a função *DataReceived* lê a cadeia de caracteres ou *string* da *serial Port* até à '\n'. Depois reinicia a porta COM e faz um pedido de atualização de dados, retira o identificador da informação de dados e escreve a informação lida na *textBox* indicada para esse identificador.

Capítulo 5

Testes e Resultados

Para a realização de testes dos *pads*, foram utilizados vários tipos de materiais e consequentemente foram executados/criados de formas diferentes. Estes testes realizados foram controlados a partir do auxílio da GUI desenvolvida no *Visual Studio*, como já foi referido no capítulo anterior. Inicialmente os primeiros testes realizados foram baseados nos estudos feitos no estado da arte. Desta maneira, a partir dos resultados obtidos, foi-se testando diferentes materiais com um método de fabrico diferente até obter o *pad* mais eficiente.

5.0.1 1º Teste realizado

Para o primeiro teste foi feito um *pad* mais comum, com design interdigitado e com a fita poliamida como dieléctrico cobertura. Para o dieléctrico de preenchimento utilizou-se o *spray* vinil acrílico e só aplicou-se uma camada na hora de fazer o teste. De acordo com o estudo realizado no estado da arte, a largura e o espaçamento ideal entre os eléctrodos é de 2mm. A tabela 5.1 mostra os materiais e as medidas utilizadas no primeiro teste.

Tabela 5.1: Características dos *pads* do primeiro teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	Fita poliamida				0,025mm	
Dieléctrico preenchimento	<i>Spray</i> vinil acrílico				1 Camada (μm)	
Eléctrodos	Cobre	2mm	2mm	3028 mm^2	0,05mm	Interdigitado
Base dieléctrica	Mica				150 μm	

A figura 5.1 mostra o *pad* testado no primeiro teste.



Figura 5.1: *Pad* do primeiro teste.

Conclusões:

- O *pad* criou um fraco campo eléctrico quando aplicou-se o spray de vinil acrílico na hora;
- Existiram bastantes perdas, a força do *pad* diminuía ao longo do tempo da activação do *pad*;
- Ao fabricar o *pad* houve um pequeno recorte na mica, desta forma fez com que houvesse uma ruptura dieléctrica, interrompendo o campo eléctrico e deixando assim de funcionar. A fita poliamida conseguiu isolar esse corte até uma tensão de 6kV .

5.0.2 2º Teste realizado

No segundo teste fabricou-se um *pad* idêntico ao do primeiro teste, apenas se diferenciou na aplicação do *spray*. Este *pad* levou três camadas de *spray* com uma secagem de três horas espaçada cada uma. A tabela 5.2 mostra os materiais e as medidas utilizadas no segundo teste.

Tabela 5.2: Características dos *pads* do segundo teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	Fita poliamida				0.025mm	
Dieléctrico preenchimento	<i>Spray</i> vinil acrílico				3 Camadas (μm)	
Eléctrodos	Cobre	2mm	2mm	3028 mm^2	0.05mm	Interdigitado e Círculos Concêntricos
Base dieléctrica	Mica				150 μm	

A figura 5.2 mostra os *pads* testados no segundo teste.

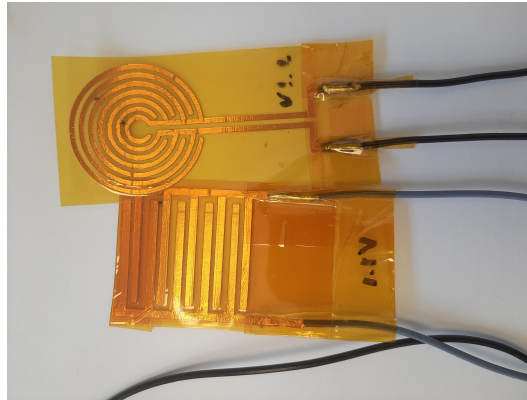


Figura 5.2: Pads do segundo teste.

Conclusões: Os *pads* não funcionaram. Se o *pad* não criou o campo eléctrico para agarrar no objeto é porque o *spray* de vinil acrílico ou a fita poliamida isolou demasiado, não deixando criar o campo eléctrico. Sendo que o único procedimento de fabrico que variou relativamente ao primeiro teste foi a aplicação de três camadas de *spray* de vinil acrílico, por isso foi o *spray* que impediu a produção do campo eléctrico.

5.0.3 3º Teste realizado

No terceiro teste usou-se na mesma os eléctrodos de cobre em forma interdigitada, mas cada um deles em superfícies diferentes da mica, ou seja, um dos eléctrodos foi aplicado na parte de cima da mica e o outro eléctrodo na parte de baixo da mica. Por fim, foi revestido em fita poliamida sem aplicar o *spray* de vinil acrílico. A tabela 5.3 mostra os materiais e as medidas utilizadas no terceiro teste.

Tabela 5.3: Características do *pad* do terceiro teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	Fita poliamida				0,025mm	
Dieléctrico preenchimento						
Eléctrodos	Cobre	2mm	2mm	3028 mm^2	0,05mm	Interdigitado
Base dieléctrica	Mica				150 μ m	

A figura 5.3 mostra o *pad* testados no terceiro teste.



Figura 5.3: *Pad* do terceiro teste.

Conclusões:

- Os eléctrodos aplicados em superfícies diferentes, criam um campo eléctrico à volta do *pad*.
- Verificou-se que este tipo de *pad* ficou magnetizado durante muito tempo, mas sem força o suficiente para conseguir pegar em qualquer objecto leve, como por exemplo uma folha de papel, uma compressa, ou uma pequena peça de plástico.
- Houve ruptura no *pad*, quando o valor de tensão ultrapassou os 6kV.

5.0.4 4º Teste realizado

Como foram realizados 3 testes com métodos de produção de fabrico diferentes e nenhum funcionou minimamente bem, e supondo que o problema seja do material do dieléctrico, pois a fita poliamida deve isolar demasiado e impede assim a criação do campo eléctrico.

Assim, no quarto teste utilizou-se um *pad* com os eléctrodos em cobre e outro *pad* com os eléctrodos em alumínio, sempre com as mesmas dimensões de largura e espaçamento (2mm) e com *design* interdigitado. Os eléctrodos foram aplicados em diferentes superfícies da base dieléctrica.

Usou-se na mesma como base dielétrica a mica, mas sem o revestimento da fita poliamida. Para o material do dielétrico de cobertura e preenchimento usou-se uma laca V-66. Este *spray* laca tem uma rigidez dielétrica muito grande, cerca de 40000V/mm, o que conseguirá isolar o *pad* das altas tensões. A tabela 5.4 mostra os materiais e as medidas utilizadas no quarto teste.

Tabela 5.4: Características dos *pads* do quarto teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dielétrico cobertura	<i>Spray</i> V-66				μm	
Dielétrico preenchimento	<i>Spray</i> V-66				μm	
Eléctrodos (1 ^o <i>pad</i>)	Cobre	2mm	2mm	3028 mm^2	0,05mm	Interdigitado
Eléctrodos (2 ^o <i>pad</i>)	Alumínio	2mm	2mm	3028 mm^2	0,08mm	Interdigitado
Base dielétrica	Mica				150 μm	

A figura 5.4 mostra os *pads* testados no quarto teste.

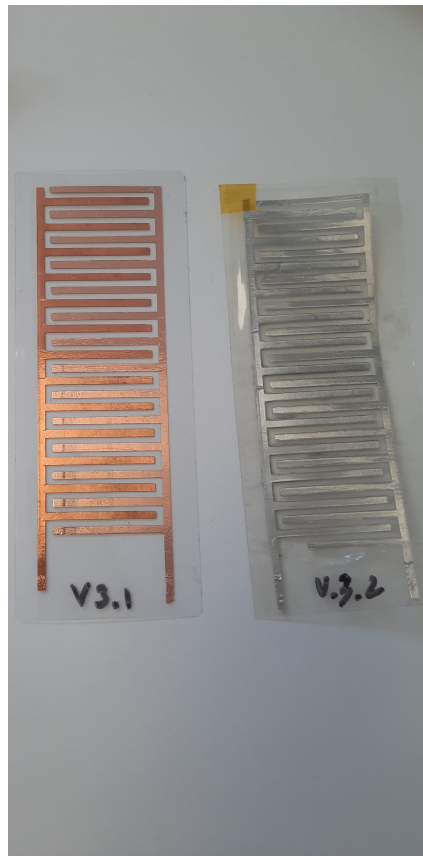


Figura 5.4: *Pads* do quarto teste.

Conclusões: Conforme os testes realizados, o cobre demora mais algum tempo a fazer a descarga do que o alumínio, isto porque carrega muito mais rápido e cria um campo elétrico mais forte. Por isso, as espessuras dos eléctrodos influenciam no funcionamento do *pad*, apesar do estudo feito no estado da arte não ter sido referido que a espessura dos eléctrodos fosse uma variável que influenciasse no funcionamento

pad, comprovou-se neste teste que quanto menor for a espessura, mais rápido cria o campo eléctrico e mais rápido estabiliza, embora demore mais tempo para a descarga.

5.0.5 5º Teste realizado

Neste quinto teste manteve-se todas as variáveis mas com a base dieléctrica diferente. Em vez de ser uma mica, substituiu-se por uma superfície plana de acrílico. Os eléctrodos foram aplicados em diferentes superfícies da base dieléctrica, como no quarto teste. A tabela 5.5 mostra os materiais e as medidas utilizadas no quinto teste.

Tabela 5.5: Características dos *pads* do quinto teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	<i>Spray V-66</i>				μm	
Dieléctrico preenchimento	<i>Spray V-66</i>				μm	
Eléctrodos	Cobre	2mm	2mm	3028 mm^2	0,05mm	Interdigitado
Base dieléctrica	Acrílico				4mm	

A figura 5.5 mostra os *pads* testados no quinto teste.



Figura 5.5: *Pads* do quinto teste.

Conclusões: Os eléctrodos aplicados em superfícies diferentes não funcionam para uma base de superfície plana como o acrílico. A mica por ser demasiado fina torna-se flexível, tornando-se vantajoso para esta ter os eléctrodos em superfícies diferentes.

5.0.6 6º Teste realizado

No sexto teste aumentou-se o espaçamento e a largura dos eléctrodos para 5mm, aumentando a área total do eléctrodo. Foram testados *pads* com os eléctrodos em cobre e alumínio e ambos os eléctrodos foram aplicados na mesma superfície da base dieléctrica de acrílico. A tabela 5.6 mostra os materiais e as medidas utilizadas no sexto teste.

Tabela 5.6: Características do *pad* no sexto teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	<i>Spray</i> V-66				μm	
Dieléctrico preenchimento	<i>Spray</i> V-66				μm	
Eléctrodos	Alumínio	5mm	5mm	7660 mm^2	0,05mm	Interdigitado
Base dieléctrica	Acrílico				4mm	

A figura 5.6 mostra o *pad* testado no sexto teste.

Figura 5.6: *Pad* do sexto teste.

Conclusões: Os *pads* com uma superfície plana rígida conseguem aderir muito bem a qualquer objecto. A largura e consequentemente a área total dos eléctrodos influenciam na criação do campo eléctrico. O *pad* criou uma força muito maior, pois conseguia agarrar em objectos com uma certa estabilidade. Deste modo, a largura e o espaçamento de 2mm não são as medidas ideais, como se tinha estudado no estado da arte.

5.0.7 7º Teste realizado

No sétimo teste utilizou-se o mesmo *pad* do sexto teste, que funcionava minimamente, mas houve um movimento mais brusco e a laca estalou, originando uma ruptura dieléctrica, ou seja, a laca V-66 deixou de ser isolante.

Nunca mais funcionou esse *pad* mesmo acrescentando outras camadas de *spray* V-66.

5.0.8 8º Teste realizado

Conforme os testes anteriores, verificou-se que o *spray* V-66 não é o isolante mais indicado, pois quebra com muita facilidade. Por isso substituiu-se o *spray* V-66 por dimetil polissiloxano (PDMS). A tabela 5.7 mostra os materiais e as medidas utilizadas no oitavo teste.

Tabela 5.7: Características do *pad* do oitavo teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	PDMS	5mm	5mm	7660 mm ²	μm	Interdigitado
Dieléctrico preenchimento	PDMS				μm	
Eléctrodos	Alumínio				0,08mm	
Base dieléctrica	Acrílico				4mm	

A figura 5.7 mostra o *pad* testado no oitavo teste.

Figura 5.7: *Pad* do oitavo teste.

Conclusões: Ao fabricar este *pad* pretendia-se uma camada de fina de PDMS, porém não foi bem executado porque os cantos dos eléctrodos não foram cobertos por PDMS. Desta maneira ocorreu faísca nos eléctrodos, pois não estavam devidamente isolados, existindo assim ruptura dieléctrica desde o início do teste.

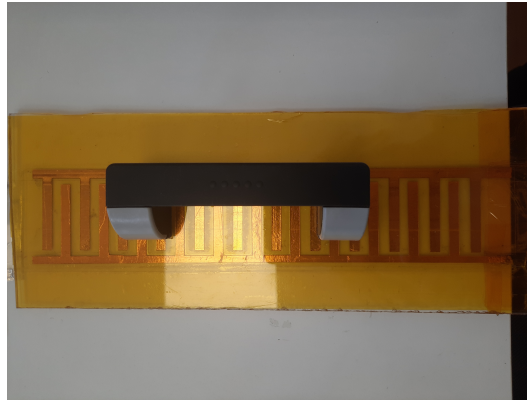
5.0.9 9º Teste realizado

No nono teste foi testado um *pad* com base dieléctrica de acrílico, com os eléctrodos na mesma superfície e cobertos por PDMS. Na parte de cima da base de acrílico, superfície que não tem contacto com o substrato, foi revestido por fita poliamida, visto que este material isola demasiado, portanto serve para proteger de uma certa forma a parte eléctrica do sistema. A tabela 5.8 mostra os materiais e as medidas utilizadas no nono teste.

Tabela 5.8: Características do *pad* do nono teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	PDMS	5mm	5mm	7660 mm ²	μm	Interdigitado
Dieléctrico preenchimento	PDMS				μm	
Eléctrodos (1º <i>pad</i>)	Cobre				0,05mm	
Base dieléctrica	Acrílico				4mm	

A figura 5.8 mostra o *pad* testado no nono teste.

Figura 5.8: *Pad* do nono teste.

Conclusões: Comprovou-se neste teste que o PDMS é um bom isolador, pois despropositadamente houve um pequeno corte no eléctrodo. Caso o PDMS não fosse um bom isolador, iria ocorrer faísca devido à ruptura no eléctrodo. Apesar dessa falha no *pad*, este funcionou.

5.0.10 10º Teste realizado

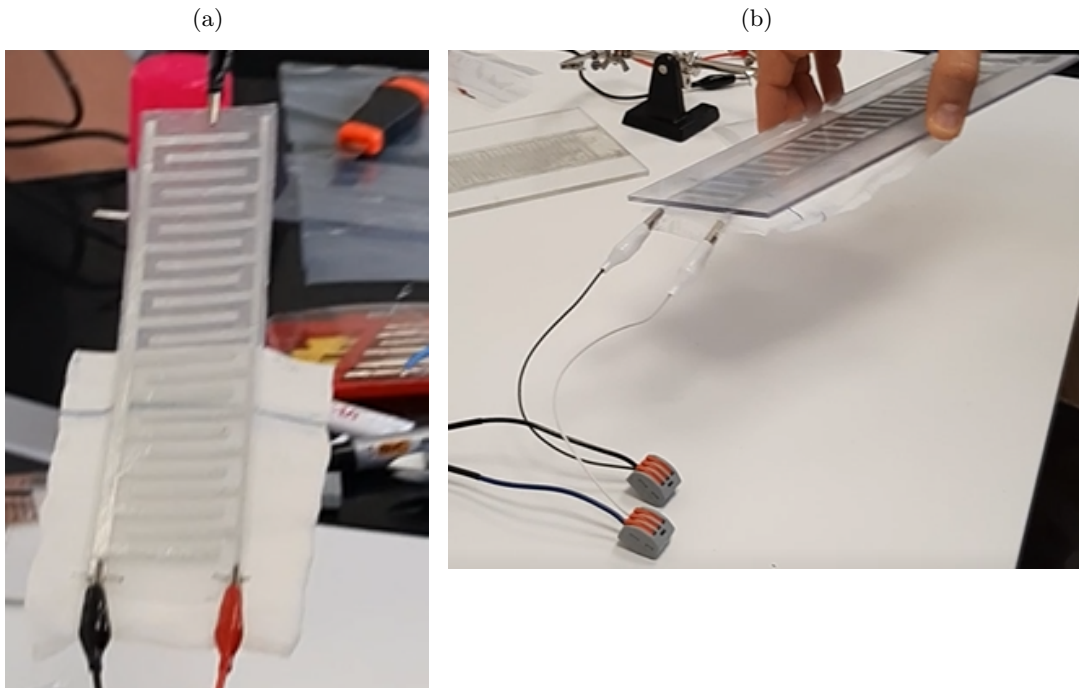
Para último teste, foram testados dois *pads* que só diferenciaram nas bases dieléctricas, um de base flexível (mica) e outro base rígida (acrílico). A tabela 5.9 mostra os materiais e as medidas utilizadas no nono teste.

Tabela 5.9: Características dos *pads* do décimo teste.

Estrutura	Material	Espaçamento entre os eléctrodos	Largura dos eléctrodos	Área dos eléctrodos	Espessura	Design
Dieléctrico cobertura	PDMS				μm	
Dieléctrico preenchimento	PDMS				μm	
Eléctrodos	Alumínio	5mm	5mm	7660 mm^2	0,05mm	Interdigitado
Base dieléctrica (1º <i>pad</i>)	Mica				150 μm	
Base dieléctrica (2º <i>pad</i>)	Acrílico				4mm	

A figura 5.9 mostra os *pads* do décimo teste. A figura 5.9a é com o *pad* em base de mica e a figura 5.9b é com o *pad* em base de acrílico.

Figura 5.9: Pads do décimo teste.

**Conclusões:**

O material dielétrico acrílico funciona melhor que O material dielétrico mica. Comprovando assim que as teorias das constantes dielétricas estão corretas.

Capítulo 6

Conclusões

O principal objetivo do trabalho era a otimização de um *pad* eletroadesivo, sendo assim possível projetar um modelo do *gripper*, este controlado por uma aplicação. Foram testados ao longo do projeto, diferentes tipos de *pads*, estes variavam entre si na largura e espaçamento do eléctrodos. Foram testados dois tipos diferentes de largura, 2mm e 5mm, podendo concluir que para os *pads* com uma largura de 5mm a força eletrostática gerada era maior, o mesmo se pode concluir para o espaçamento. Para alimentação do *pad*, foi desenvolvido um sistema de potência de alta tensão, este é controlado pelo arduino que por sua vez faz a comunicação com a interface. A interface, que principalmente controla *pad*, é flexível na sua arquitectura, para que no futuro possa atingir outros objetivos.

Nem todos os objetivos foram concluídos, pois a descarga do *pad* foi realizada através de um componente electromecânico, contador. Esta solução não é fiável pois o contador é bastante pesado, sendo o objetivo a criação de um *gripper* leve. Os últimos *pads* apesar de estarem bem isolados, não criam uma força eléctrica tão grande como se esperava, pois só conseguem agarrar em objetos extremamente leves, como compressas e objetos de plástico extremamente leves.

6.1 Trabalho Futuro

Num desenvolvimento futuro deste projeto, é possível destacar algumas melhorias, como:

- Implementar detalhes na interface, como um acesso histórico (número de série, log de erros), criar perfis de modo a guardar automaticamente os níveis de tensão que se pretende;
- Encontrar outra solução para a descarga, por exemplo, transformar a energia acumulada do *pad* em térmica ou de forma luminosa;
- Fazer mais testes de modo a que o *pad* criar uma força maior;
- Realização de testes com o sistema de potência em corrente alternada, de modo a variar a frequência.

Referências

- [1] A. M. Zaki, “High performance robotic gripper based on choice of feedback variables.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/5512336>, 2010. (Last accessed in 12/04/2021). [Citado na página 1]
- [2] F. C. Samavati, “Design, fabrication and control of a three-finger robotic gripper.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/6115002>, 2011. (Last accessed in 12/04/2021). [Citado na página 1]
- [3] D. Slavov, “Object size estimation with industrial robot gripper using neural network and machine learning.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/9311319>, 2021. (Last accessed in 12/04/2021). [Citado na página 1]
- [4] H. A, “Development of vision-based sensor of smart gripper for industrial applicationsg.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/6194738>, 2012. (Last accessed in 12/04/2021). [Citado na página 1]
- [5] T. Bamber, “Visualization methods for understanding the dynamic electroadhesion phenomenon.” Available at <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aa6be4/meta>, 2017. (Last accessed in 13/04/2021). [Citado na página 2]
- [6] W. W, ed., *Electrostatic force employed to hold workpieces Phys. Forces Electrostat.* IEEE Press., 1960. [Citado na página 2]
- [7] B. G, ed., *Development of electroadhesive devices for zero-g intraextravehicular activities AIAA.* IEEE Press., 1971. [Citado na página 2]
- [8] G. N. Leung B, Miller L and G. S, “Validation of electroadhesion as a docking method for spacecraft and satellite servicing,” *IEEE*, pp. 1–8, 2015. [Citado na página 2]
- [9] W. G, “Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication,” *Rev. Sci. Instrum.*, p. 44, 1973. [Citado na página 2]
- [10] T. P. M. Monkman G J and F. G. J, “Principles of electroadhesion in clothing technology,” *Sci. Technol*, p. 14–20, 1989. [Citado na página 2]
- [11] M. G. J, “Robot grippers for use with fibrous materials,” *J. Robot.*, pp. 144–151, 1995. [Citado na página 2]

- [12] C. J. A. Zhang Z and S. M, “Characterizing an electrostatic gripping device for the automated handling of non-rigid materials,” *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, pp. 21–36, 2001. [Citado na página 2]
- [13] S. S. M. J. Prahlad H, Pelrine R and K. R, “Electroadhesive robots-wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology,” *IEEE*, pp. 3028–3033, 2008. [Citado na página 2]
- [14] S. J. Ruffatto D and S. M, “Increasing the adhesion force of electrostatic adhesives using optimized electrode geometry and a novel manufacturing process,” *J. Electrostat*, pp. 147–155, 2014. [Citado na página 2]
- [15] J. J. U and H. T, “Electrostatic suspension of dielectrics,” *IEEE*, pp. 938–946, 1999. [Citado na página 2]
- [16] A. K. Yatsuzuka K, Hatakeyama F and A. S, “Fundamental characteristics of electrostatic wafer chuck with insulating sealant,” *IEEE*, pp. 510–516, 2000. [Citado na página 2]
- [17] M. B. Khalid, “Electrostatic adhesion: Making wall climbing robots a reality.” Available at <https://medium.datadriveninvestor.com/https-medium-com-datadriveninvestor-electrostatic-adhesion-wall-climbing-robots-6b> 2018. (Last accessed in 13/04/2021). [Citado na página 5]
- [18] W. K. Łukasz Nagi; Michał Koziół, “Laboratory tests of the influence of the shape of electroadhesive pads on the value of the attraction force.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/8778139>, 2019. (Last accessed in 13/04/2021). [Citado na página 5]
- [19] A. P. D. Ruffatto and M. Spenko, “Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic / gecko-like adhesive,” *Journal of the Royal Society*, 2014. [Citado na página 5]
- [20] H. B. A. Vankov, P. Huie and D. Palanker, “Electroadhesive forceps for tissue manipulation,” *Conference Ophthalmic Technologies XIV*, pp. 270–275, 2004. [Citado na página 6]
- [21] PreparaEnem, “Capacitância de um capacitor de placas paralelas.” Available at <https://www.preparaenem.com/fisica/capacitancia-um-capacitor-placas-paralelas.htm>. (Last accessed in 14/04/2021). [Citado nas páginas ix e 6]
- [22] “Capacitância e Capacitores.” Available at <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwim1OzmmZDwAhVZTxUIHZOpDL4QFjACegQIAxAD&url=http>. (Last accessed in 17/04/2020). [Citado na página 7]

- [23] “Capacitor.” Available at <https://pt.wikipedia.org/wiki/Capacitor>. (Last accessed in 17/04/2020). [Citado nas páginas ix e 8]
- [24] “MATERIAIS DIELÉTRICOS.” Available at <http://professor.pucgoias.edu.br/>. (Last accessed in 17/04/2020). [Citado nas páginas ix, 9, 10 e 16]
- [25] RiverGlennapts, “Mecanismo de polarização.” Available at <https://riverglennapts.com/pt/dielectric-materials/276-mechanism-of-polarization.html>. (Last accessed in 20/05/2021). [Citado nas páginas ix, 11 e 12]
- [26] S. B, “io-inspired mechanisms for inclined locomotion in a legged insect scale robot,” *IEEE Int. Conf. on Robotics*, pp. 791–796, 2014. [Citado na página 12]
- [27] K. K, “Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes,” *Elsevier*, 2004. [Citado na página 13]
- [28] Jae-Hyun Kim, “Shape design optimization of interdigitated electrodes for maximal electro-adhesion forces.” Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-020-02576-6>, May 2020. (Last accessed in 17/04/2020). [Citado nas páginas ix e 13]
- [29] Jianglong Guo, Tom Bamber, Matthew R Chamberlain, “Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives.” Available at https://www.researchgate.net/publication/308171670_Optimization_and_experimental_verification_of_coplanar_interdigital_electroadhesives, 2016. (Last accessed in 17/04/2020). [Citado nas páginas ix, 13 e 14]
- [30] M. A. Qin S, “Wafer dependence of johnsenrahbek type electrostatic chuck for semiconductor,” *J. Appl. Phys*, p. 104. [Citado nas páginas 14 e 15]
- [31] A. K. Yatsuzuka K, Hatakeyama F and A. S, “Fundamental characteristics of electrostatic wafer chuck with insulating sealant,” *IEEE*, pp. 510–516, 2000. [Citado na página 15]
- [32] J. Guo, “Geometric optimisation of electroadhesive actuators based on 3d electrostatic simulation and its experimental verification.” Available at <https://core.ac.uk/download/pdf/288369482.pdf>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado nas páginas ix, 15 e 16]
- [33] M. Bigharaz, “Increasing force generation in electroadhesive devices through modelling of novel electrode geometries.” Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388620301236>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado nas páginas ix, 17 e 18]

- [34] J. Guo, “Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives.” Available at <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/49/41/415304/pdf>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado nas páginas ix, 18, 19 e 22]
- [35] J. G. J. Leng and J. Rossiter, “Electroadhesion technologies for robotics: A comprehensive review.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8946902>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado nas páginas ix, 20, 21, 22, 27, 28 e 29]
- [36] Q. L. Xie Li, Zhang Zhixiang, “Research on a wall climbing robot based on electrostatic adhesion.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/7796290>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado na página 25]
- [37] D. Ruffatto, “Long-duration surface anchoring with a hybrid electrostatic and gecko-inspired adhesive.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/8411100>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado nas páginas ix, 25 e 26]
- [38] M. S. Donald Ruffatto, Jainam Shah, “Optimization and experimental validation of electrostatic adhesive geometry.” Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/6496943>. (Last accessed in 17/05/2021). [Citado na página 26]
- [39] R. Pelrine, “Electroadhesive wall climbing robots and more.” Available at https://www.nasa.gov/pdf/626527main_3B-5_Pelrine.pdf. (Last accessed in 15/05/2021). [Citado na página 26]
- [40] X. E. H. Voltage, “Xp emco high voltage.” Available at <http://www.emcohighvoltage.com/proportional/qseries.php>. (Last accessed in 15/05/2021). [Citado nas páginas x e 32]
- [41] Farnell, “Dc-hvdc converter.” Available at <http://www.farnell.com/datasheets/2893721.pdf>. (Last accessed in 15/05/2021). [Citado nas páginas x e 33]
- [42] athoselectronics, “Fonte chaveada: Como funciona.” Available at <https://athoselectronics.com/fonte-chaveada/>. (Last accessed in 26/05/2021). [Citado na página 35]
- [43] C. eletrônica, “Fonte alimentação comutada 24vdc 360w turbinado.” Available at <https://www.castroelectronica.pt/product/fonte-alimentacao-comutada-24vdc-360w-closed-frame--proftc/>. (Last accessed in 26/05/2021). [Citado nas páginas x e 36]

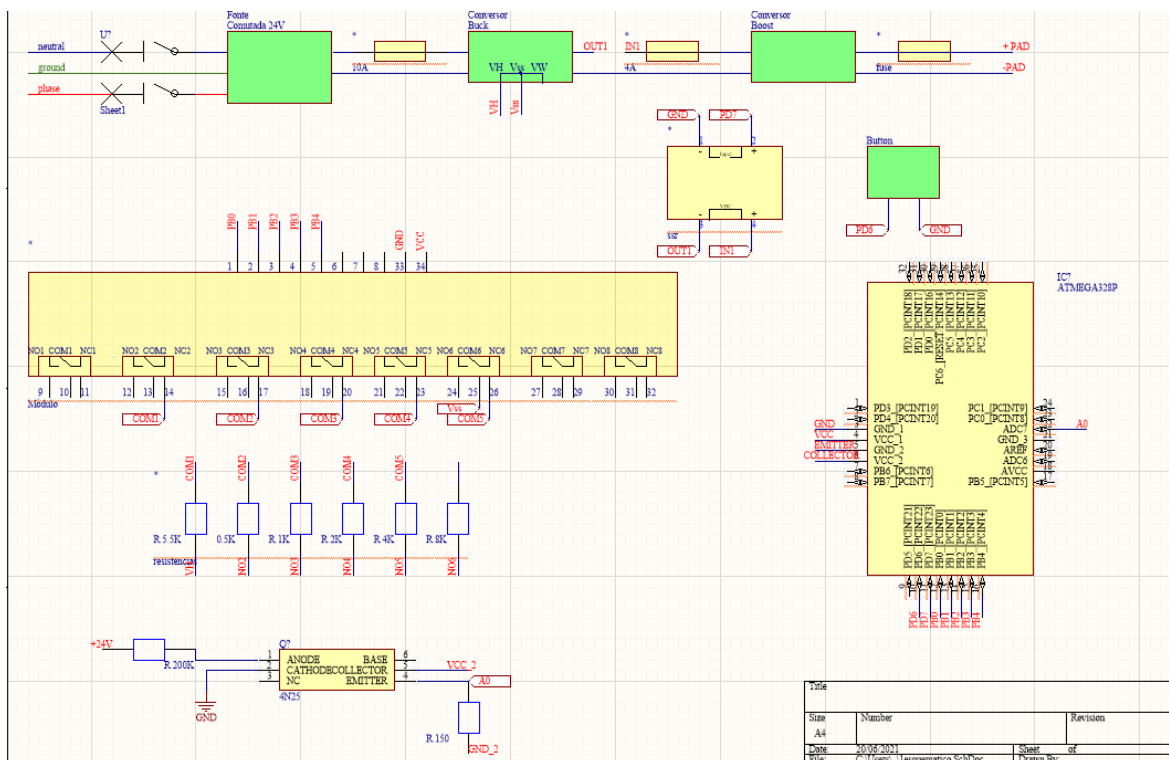
- [44] Siemens, “Siemens.” Available at <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/5SL4516-8/>. (Last accessed in 26/05/2021). [Citado nas páginas x e 36]
- [45] curto circuito, “Tipos de conversores dc dc.” Available at https://www.curtocircuito.com.br/blog/conversor-dcdc/introducao-aos-conversores-dc-dc#0_que_e_um_conversor_Step-Down. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x, 37, 39 e 40]
- [46] easytronics, “easytronics.” Available at <https://www.easytronics.com.br/x14015-modulo-step-down-5a>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x, 38 e 39]
- [47] C. de eletrônica, “Projeto de multiplicadores de tensão.” Available at <https://cadernodelaboratorio.com.br/projeto-de-multiplicadores-de-tensao/>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 40]
- [48] S. ABC, “How much current can the human body withstand?” Available at <https://www.scienceabc.com/humans/how-many-volts-amps-kill-you-human.html>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas xiii, 41 e 42]
- [49] C. eletrônica, “Fusível automático 4a 250vac.” Available at <https://www.castroelectronica.pt/product/fusivel-automatico-4a-250vac>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 42]
- [50] C. eletrônica, “Fusível automático 10a 250vac - velleman.” Available at <https://www.castroelectronica.pt/product/fusivel-automatico-10a-250vac>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 42]
- [51] Farnell, “Farnell.” Available at 0326.010HXP-Littelfuse-FUSE, CARTRIDGE, 10mA(farnell.com). (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 42]
- [52] C. eletrônica, “Porta fusíveis 6x32 painel.” Available at [PortaFusiveis6x32Painel|CastroElectrónica,Lda\(castroelectronica.pt\)](https://www.castroelectronica.pt/PortaFusiveis6x32Painel). (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 42]
- [53] R. M. Fish, “Conduction of electrical current to and through the human body: A review.” Available at <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2763825/>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado na página 43]
- [54] ebay, “cooling fan.” Available at <https://www.ebay.com/itm/24V-Case-Cooling-Fan-60x60x25mm-3-wires-3000RPM-NIDEC/202501046787?epid=9025811436&hash=item2f2600c203:g:>

- vHkAA0Sw8-1b6spX. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 43]
- [55] Atmega328p, “Datasheet.” Available at http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x, 44 e 45]
- [56] M. da eléctrica, “O que é relé de estado sólido?.” Available at https://mauser.pt/catalog/product_info.php?cPath=324_517_2118&products_id=096-8203. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas 45 e 47]
- [57] Mauser.pt, “Módulo de 8 relés 5v compatível com arduino.” Available at https://mauser.pt/catalog/product_info.php?cPath=324_517_2118&products_id=096-8203. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x, 45 e 46]
- [58] botnroll, “RelÉ estado sólido dc.” Available at <https://www.botnroll.com/pt/digital/3867-rel-estado-s-lido-dc-sa-da-5-200vdc-25a.html>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 48]
- [59] LojaTotalSeg, “Botão de saída de embutir em inox.” Available at https://www.lojatotalseg.com.br/produto/574/botoeira-botao-de-saida-de-embutir-em-inox-ac2864-automatiza?id_produto=574. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 48]
- [60] A. Electronics, “Acoplador Óptico – o que é e como funciona.” Available at <https://athoselectronics.com/acoplador-optico/>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado na página 49]
- [61] B. da electronica, “Optoacoplador 4n25.” Available at <https://www.baudaelectronica.com.br/optoacoplador-4n25.html>. (Last accessed in 27/05/2021). [Citado nas páginas x e 49]
- [62] Alibaba, “Contador telemecanique ac cjx2-32 lc1-d3210 30a.” Available at <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/cjx2-32-lc1-d3210-30a-telemecanique-ac-contacto-60364196497.html>. (Last accessed in 02/06/2021). [Citado nas páginas x e 50]

Anexo A

Anexo A

A.1 Esquema eléctrico geral do circuito



Anexo B

Anexo B

B.1 Código Arduino

```
#include <EEPROM.h>

uint16_t dataSensor1;
String data;
String cycles;
char dl;
int memoria=0;
int value;

void setup() {
  pinMode(6,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);

  memoria=EEPROM.read(0);

  pinMode (A0,INPUT);

  pinMode(8,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(10,OUTPUT);
  pinMode(11,OUTPUT);
  pinMode(12,OUTPUT);

  pinMode(7,OUTPUT);

  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(11, HIGH);
```

```
digitalWrite(12, HIGH);

digitalWrite(7, LOW);

}

void loop() {

    if(Serial.available())        //se algum dado disponível
    {

        switch(Serial.read())    //verifica qual caracter recebido
        {

            case 'A':            //caso 'A'
                digitalWrite(8, HIGH);
                digitalWrite(9, HIGH);
                digitalWrite(10, HIGH);
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
                break;

            case 'B':
                digitalWrite(9, LOW);
                digitalWrite(8, HIGH);
                digitalWrite(10, HIGH);
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
                break;

            case 'C':
                digitalWrite(10, HIGH);
                digitalWrite(8, LOW);
                digitalWrite(9, LOW);
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
                break;

            case 'D':
                digitalWrite(10, LOW);
                digitalWrite(8, HIGH);
                digitalWrite(9, HIGH);
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
                break;

            case 'E':
                digitalWrite(10, LOW);
                digitalWrite(9, HIGH);
                digitalWrite(8, LOW);
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
                break;

            case 'F':
                digitalWrite(10, LOW);
                digitalWrite(9, LOW);
                digitalWrite(8, HIGH);
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
```

```
break;

case 'G':
    digitalWrite(11,HIGH);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'H':
    digitalWrite(11,LOW);
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'I':
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(10,HIGH);
    digitalWrite(11,LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'J':
    digitalWrite(8,HIGH);
    digitalWrite(10,HIGH);
    digitalWrite(11,LOW);
```

```
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'K':
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'L':
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'M':
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

case 'N':
```

```
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

    case 'O':
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(12, HIGH);
break;

    case 'P':
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(12, LOW);
break;

    case 'Q':
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(12, LOW);
break;
```

```
case 'R':  
    digitalWrite(8, HIGH);  
    digitalWrite(10, HIGH);  
    digitalWrite(11, HIGH);  
    digitalWrite(9, LOW);  
    digitalWrite(12, LOW);  
break;
```

```
case 'S':  
    digitalWrite(8, LOW);  
    digitalWrite(10, HIGH);  
    digitalWrite(11, HIGH);  
    digitalWrite(9, LOW);  
    digitalWrite(12, LOW);  
break;
```

```
case 'U':  
    digitalWrite(8, HIGH);  
    digitalWrite(10, LOW);  
    digitalWrite(11, HIGH);  
    digitalWrite(9, HIGH);  
    digitalWrite(12, LOW);  
break;
```

```
case 'l':  
  
    digitalWrite(7, HIGH);
```

```
break;

    case '2':
memoria++;
EEPROM.write(0,memoria);
digitalWrite(7,LOW);
cycles="2";
cycles.concat(memoria);
Serial.println(cycles);
break;
|
case 'Z':
    dataSensor1 = analogRead(A0);
    if (dataSensor1 > 1){

        Serial.println("lConnected");

    }

    else if (dataSensor1 < 1){
        Serial.println("lDisconnected");
    }

}

}

if(digitalRead(6)==true){
    digitalWrite(7, HIGH);
```


Anexo C

Anexo C

C.1 Código Visual Studio

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.ComponentModel;
4 using System.Data;
5 using System.Drawing;
6 using System.IO.Ports;
7 using System.Linq;
8 using System.Text;
9 using System.Windows.Forms;
10
11 namespace projetoOmega
12 {
13     4 referências
14     public partial class Form1 : Form
15     {
16         string RxString = "";
17         char Identificador;
18         string[] Strength = { "A", "B", "C", "D", "E", "F", "G", "H", "I", "J", "K", "L", "M", "N", "O", "P", "Q", "R", "S", "T", "U" };
19
20     1 referência
21     public Form1()
22     {
23         InitializeComponent();
24     }
25
26     1 referência
27     public void Form1_Shown(object sender, EventArgs e)
28     {
29         try
30         {
31             //Inicializacao de estados;
32             B_Trigger.Text = "OFF";
33             B_Connect.Enabled = false;
34             B_Disconnect.Enabled = false;
35             comboBox_comPort.Enabled = true;
36             verificarProgressBar1.Value = 0;
37             numericUpDown1.Enabled = false;
38             B_Save.Enabled = false;
39             B_Trigger.Text = "OFF";
40             B_Trigger.Enabled = false;
41             RD_SystemReady.Checked = false;
42         }
43     }
44 }
```

```

39         //Inicializacao de Timer;
40         timer1.Start();
41         timer1.Enabled = true;
42     }
43     catch (Exception error)
44     {
45         MessageBox.Show(error.Message);
46     }
47     }
48
49     1 referência
50     public void Form1_FormClosing(object sender, EventArgs e)
51     {
52         //Realiza uma saida segura;
53         B_Disconnect_Click(sender, e);
54     }
55
56     3 referências
57     public void ComboBox_comPort_DropDown(object sender, EventArgs e)
58     {
59         //Seleção das portas COM disponíveis;
60         string[] portlists = SerialPort.GetPortNames();
61         comboBox_comPort.Items.Clear();
62         comboBox_comPort.Items.AddRange(portlists);
63     }
64
65     1 referência
66     public void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
67     {
68         //Sinalização de ajuda à selecção;
69         Random rand = new Random();
70         int A = rand.Next(0, 255);
71         int B = rand.Next(0, 255);
72         label1.ForeColor = Color.FromArgb(A);
73     }
74
75     1 referência
76     private void comboBox_comPort_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
77     {
78         //Activar próximo passo;
79         B_Connect.Enabled = true;

```

```

77     }
78
79     1 referência
80     public void B_Connect_Click(object sender, EventArgs e)
81     {
82         try
83         {
84             //Obter Numero Porta Com e Abrir;
85             serialPort1.PortName = comboBox_comPort.Text;
86             serialPort1.Open();
87             //Activar novas opções em caso de sucesso;
88             B_Connect.Enabled = false;
89             B_Disconnect.Enabled = true;
90             comboBox_comPort.Enabled = false;
91             verificarProgressBar1.Value = 100;
92             numericUpDown1.Enabled = true;
93             B_Trigger.Enabled = true;
94             //Pedido de Estado Sistema Controlado;
95             serialPort1.Write("Z");
96         }
97         catch (Exception error)
98         {
99             MessageBox.Show(error.Message);
100         }
101     }
102
103     2 referências
104     public void B_Disconnect_Click(object sender, EventArgs e)
105     {
106         try
107         {
108             //Libertar Porta COM;
109             serialPort1.Close();
110             //Activar novas opções em caso de sucesso;
111             B_Connect.Enabled = true;
112             B_Disconnect.Enabled = false;
113             comboBox_comPort.Enabled = true;
114             verificarProgressBar1.Value = 0;
115             numericUpDown1.Enabled = false;
116             B_Save.Enabled = false;
117             textBox_Status.Clear();

```

```
116         TB_NumCiclos.Clear();
117         RD_SystemReady.Checked = false;
118     }
119     catch (Exception error)
120     {
121         MessageBox.Show(error.Message);
122     }
123 }
124
125 1 referência
126 public void numericUpDown1_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
127 {
128     numericUpDown1.Value.ToString();
129     //Só agora permite gravar;
130     B_Save.Enabled = true;
131     //Coloca trigger desactivo;
132     B_Trigger.Enabled = false;
133 }
134 1 referência
135 public void B_Save_Click(object sender, EventArgs e)
136 {
137     //Declarações e inicializações locais
138     int index = 0;
139     //Envio de selecção de força para sistema controlo;
140     progressBar1.Value = (int)numericUpDown1.Value;
141     index = (int)(numericUpDown1.Value / 5) + 1;
142     serialPort1.Write(Strength[index]);
143     //Desactivar botão save;
144     B_Save.Enabled = false;
145     //Activar Botão trigger;
146     B_Trigger.Enabled = true;
147 }
148 1 referência
149 public void B_Trigger_MouseDown(object sender, EventArgs e)
150 {
151     //Altera Label;
152     B_Trigger.Text = "ON";
153     //Ordem de Activação;
154     serialPort1.Write("1");
```

```
154 }
155
156 1 referência
157 private void B_Trigger_MouseUp(object sender, EventArgs e)
158 {
159     //Altera Label;
160     B_Trigger.Text = "OFF";
161     //Ordem de Desactivação;
162     serialPort1.Write("2");
163 }
164
165 1 referência
166 public void serialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
167 {
168     //Inicialização
169     RxString = "";
170     //Leitura + Guardar;
171     RxString = serialPort1.ReadTo("\n");
172     //Reiniciar porta COM;
173     serialPort1.Close();
174     serialPort1.Open();
175     //Faz pedido de actualização de estados;
176     this.Invoke(new EventHandler(RefreshForm));
177 }
178
179 1 referência
180 public void RefreshForm(object sender, EventArgs e)
181 {
182     //Variáveis locais;
183     int length;
184     string aux = "";
185     //Obtem comprimento String;
186     length = RxString.Length;
187     //Partir a string em 2;
188     //Retirar o identificador da informação enviada;
189     Identificador = RxString[0];
190     //Guardar a informação enviada;
191     aux = RxString.Substring(1, length-1);
```

```
192 //Escrita de dados obtidos no local adequado;
193 if (Identificador == '1')
194 {
195     textBox_Status.Clear();
196     textBox_Status.AppendText(aux);
197     //Indicar esta informacao na tabela de resumo;
198     if (aux[0] == 'C') //Connected;
199     { RD_SystemReady.Checked = true; }
200     else //Disconnected;
201     { RD_SystemReady.Checked = false; }
202 }
203 if(Identificador == '2')
204 {
205     TB_NumCiclos.Clear();
206     TB_NumCiclos.AppendText(aux);
207 }
208
209
210 }
```