

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

LaRE - Laboratório Remoto Expansível

Eduardo Manuel Martins Ramalhadeiro

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



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Setembro, 2025

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: Eduardo Manuel Martins Ramalhadeiro, N° 1210171,
1210171@isep.ipp.pt

Orientação Científica: André Vaz Fidalgo, anf@isep.ipp.pt



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

Setembro, 2025

Para ti, mãe

*“(. . .) às vezes ainda sou o menino
que adormeceu nos teus olhos”*

Eugénio de Andrade

Agradecimentos

“A ordem dos factores é arbitrária”, portanto, os agradecimentos seguem sem uma ordem específica.

Um agradecimento muito especial terá de ser dirigido ao meu orientador - “Oh Captain, my Captain” - o Professor André Vaz Fidalgo. Obrigado pela (muita) paciência, liberdade, tolerância, sapiência, orientação e apoio durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

José Saramago escreveu o seguinte: *“Filho é um ser que nos emprestaram para um curso intensivo de como amar alguém além de nós mesmos, de como mudar nossos piores defeitos para darmos os melhores exemplos e de aprendermos a ter coragem. Isto mesmo! Ser pai ou mãe é o maior ato de coragem que alguém pode ter, porque é se expor a todo tipo de dor, principalmente da incerteza de estar agindo corretamente e do medo de perder algo tão amado. Perder? Como? Não é nosso, recordam-se? Foi apenas um empréstimo.”*

A decisão de avançar com esta dissertação surgiu com duas ideias em mente: adquirir mais conhecimento e (tentar) ser um exemplo e inspiração para a então única filha, Ana Ramalhadeiro, mostrando que, com esforço, dedicação e devoção, a glória acaba por chegar. E não esquecer: nunca é tarde demais para aprender. Pelo caminho nasceu a Maria Ramalhadeiro, que, por agora, só se interessa pela “Patrulha Pata” e os “Mistérios dos Bichos”, mas cá estarei para, a seu tempo, lhe mostrar o exemplo e servir de inspiração.

À mãe mais linda do mundo — Elsa Mariana Lopes (e) Mota — obrigado pela paciência, apoio e compreensão durante todo este processo. Sem ti, nada disto seria possível, até porque estavas responsável pelo pagamento das propinas.

Ao meu pai e irmão, José e Eng.^º Rui Ramalhadeiro - *a.k.a. GNUUU* - pelo incentivo; aos meus amigos, que não me ajudaram em nada, a não ser chatear para jantares e lanches.

Um agradecimento especial à Professora Cristina Manuela Sá pela ajuda na elaboração do documento, ao Professor Ernesto Martins e ao Eng.^º José Garcia pelos conselhos e esclarecimentos técnicos.

Resumo

A formação em engenharia, particularmente na área da electrónica, exige uma forte componente prática, frequentemente concretizada em contexto laboratorial. No entanto, os laboratórios físicos tradicionais apresentam desafios significativos, como custos elevados, exigência de espaço físico e limitação do acesso devido a restrições logísticas. Estes desafios foram agravados pelo surgimento da pandemia da COVID-19, em 2020. Perante estas limitações, os laboratórios remotos surgem como uma alternativa eficaz e promissora. Estes permitem que os estudantes realizem experiências reais em equipamentos físicos, através de controlo remoto, promovendo um acesso mais inclusivo, flexível e escalável ao ensino prático.

A presente dissertação descreve o processo de concepção de um laboratório remoto - Laboratório Remoto Expansível (LaRE) - para o ensino da electrónica, como alternativa viável ao VISIR, com o compromisso adicional de ser um projecto *open-source*, acessível a qualquer instituição de ensino, independentemente da sua localização geográfica. A matriz de placas, elemento central do sistema, foi desenvolvida com base numa arquitectura controlada por *software*, sem dependência de plataformas proprietárias, garantindo assim que o sistema possa ser utilizado sem necessidade de licenças comerciais. Contudo, devido à actual falta de suporte da biblioteca *py-VirtualBench* para sistemas *Linux* e arquitecturas ARM, a implementação do LaRE permanece, nesta fase, dependente de sistemas *Windows* - um factor que limita a sua adopção em plataformas educativas mais versáteis e de baixo custo. No entanto, a arquitectura modular do LaRE permite futuras expansões e adaptações a diferentes contextos pedagógicos.

Assim, este trabalho visa: contextualizar o papel dos laboratórios remotos no ensino; analisar alternativas existentes; identificar os requisitos técnicos (de *hardware* e *software*) para a construção de um laboratório remoto *open-source* em conformidade com a licença GPL; implementar e testar o LaRE; e apresentar as suas vantagens, limitações e possíveis melhoramentos. A proposta assenta numa abordagem acessível e escalável, procurando contribuir para o reforço da aprendizagem prática e para a democratização do ensino experimental em engenharia.

Palavras-Chave: laboratório remoto, ensino de electrónica, VirtualBench, controlo remoto, *open-source*, acessibilidade, GPL, LaRE, VISIR

Abstract

Engineering education, particularly in electronics, requires a strong practical component, typically delivered through hands-on laboratory work. However, traditional physical laboratories pose several challenges, including high operational costs, limited space, and restricted access due to logistical constraints. These issues were further intensified by the COVID-19 pandemic in 2020. In response, remote laboratories have emerged as a promising and effective alternative, enabled by recent technological advances. These platforms allow students to perform real experiments on physical equipment via remote control, promoting more inclusive, flexible, and scalable access to practical learning.

This dissertation presents the development of a remote laboratory — the Laboratório Remoto Expansível (LaRE) — designed for electronics education. It aims to serve as an open-source, viable alternative to VISIR, with universal accessibility regardless of the institution’s geographical location. The LaRE system enables remote control of practical experiments and promotes equitable access to laboratory resources. The core component, a configurable board matrix, was developed using a software-controlled architecture that avoids proprietary dependencies, allowing use without commercial licenses. However, due to the current lack of support by the pyVirtualBench library for Linux systems and ARM architectures, the implementation of LARE remains, at this stage, dependent on Windows systems — a factor that limits its adoption on more versatile and low-cost educational platforms. Nevertheless, the modular architecture of LaRE supports future extensions and adaptability to varied pedagogical contexts.

This work seeks to: contextualize the role of remote laboratories in education; review existing solutions; define the technical (hardware and software) requirements for building an open-source remote lab under the GPL license; implement and test the LaRE; and present its advantages, limitations, and possible improvements. The proposal aims to provide a scalable and accessible infrastructure that reinforces hands-on learning and democratizes experimental education in engineering.

Keywords: remote laboratory, electronics education, VirtualBench, remote control, open-source, accessibility, GPL, LaRE, VISIR.

Índice

| | |
|--|-------------|
| Lista de Figuras | ix |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Listagens | xv |
| Glossário | xvii |
| Lista de Acrónimos | xxi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Objectivos | 2 |
| 1.3 Estrutura do documento | 3 |
| 2 Estado da Arte | 5 |
| 2.1 Transformação digital na educação | 5 |
| 2.2 eLearning e abordagem STEM | 12 |
| 2.2.1 Uma questão de conceitos | 12 |
| 2.2.2 Principais desafios | 15 |
| 2.3 Laboratórios na educação | 17 |
| 2.3.1 Tipos de laboratórios | 19 |
| Uma questão de conceitos | 21 |
| Laboratório real | 24 |
| Laboratório virtual - Acesso local e/ou remoto | 25 |
| Simuladores - Acesso local e/ou remoto | 28 |
| Laboratório remoto | 30 |
| VISIR - Virtual Instrument Systems in Reality | 34 |
| PILAR | 38 |
| 3 LaRE - Laboratório Remoto Expansível | 41 |
| 3.1 Contextualização | 41 |
| 3.2 Solução proposta | 44 |
| 3.3 Arquitectura | 45 |
| 3.4 Circuitos experimentais | 46 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.4.1 | Lei de <i>Ohm</i> | 47 |
| 3.4.2 | Rectificadores | 49 |
| 3.4.3 | Filtros | 51 |
| 3.5 | Hardware | 52 |
| 3.5.1 | VirtualBench | 52 |
| 3.5.2 | Matriz LaRE | 52 |
| Lei de <i>Ohm</i> | 53 | |
| Rectificadores/Filtros | 54 | |
| Fontes de alimentação | 55 | |
| 3.5.3 | Raspberry Pi | 55 |
| 3.5.4 | Relés | 57 |
| 3.5.5 | <i>Driver</i> de Relés | 58 |
| 3.5.6 | Registo de deslocamento | 59 |
| 3.6 | Software | 60 |
| 3.6.1 | <i>Back-End</i> | 62 |
| <i>Python</i> | 62 | |
| <i>Flask</i> | 62 | |
| <i>Jinja2</i> | 63 | |
| 3.6.2 | Front-End | 64 |
| <i>Webpage</i> | 64 | |
| 4 | Implementação | 69 |
| 4.1 | Hardware | 70 |
| 4.1.1 | Relés | 70 |
| 4.1.2 | Driver de relés | 70 |
| 4.1.3 | Registo de deslocamento | 71 |
| 4.1.4 | Fontes de alimentação | 72 |
| Fonte de tensão 6 V - variável e Fonte de tensão 12 V - fixa | 73 | |
| Fonte de tensão 5 V - fixa | 73 | |
| Fontes de tensão 230 V/8 V CA | 75 | |
| 4.1.5 | Aparelhos de medida - voltímetro e amperímetro | 76 |
| 4.1.6 | Experiências | 77 |
| Lei de Ohm | 78 | |
| Rectificadores e filtros | 79 | |
| 4.2 | Software | 80 |
| 4.2.1 | Servidor Flask | 81 |
| Estrutura base | 81 | |
| Rotas | 83 | |
| Blueprints | 84 | |
| Pedidos | 85 | |

| | |
|--|------------|
| Base de dados | 85 |
| Autenticação | 85 |
| 4.2.2 Arquitectura de Comunicação | 86 |
| Comunicação entre ficheiros | 87 |
| Comunicação com RaspberryPi | 90 |
| VirtualBench - Configurações e medições | 91 |
| Gráficos | 94 |
| 4.2.3 Interface WEB | 95 |
| Lei de <i>Ohm</i> | 97 |
| Rectificador de meia onda e onda completa | 99 |
| Filtros | 100 |
| 5 Resultados | 103 |
| 5.1 Lei de <i>Ohm</i> | 104 |
| 5.1.1 Resultados experimentais | 104 |
| 5.2 Rectificadores | 106 |
| 5.2.1 Resultados experimentais [meia onda] | 106 |
| 5.2.2 Resultados experimentais [onda completa] | 108 |
| 5.3 Filtros | 110 |
| 5.3.1 Resultados experimentais [filtro passa-alto] | 111 |
| 6 Conclusões | 115 |
| 6.1 Limitações e trabalho futuro | 116 |
| Referências | 118 |
| Anexo A Datasheet | 135 |

Listas de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Número de utilizadores da Internet em todo o mundo, 2024 [18] | 6 |
| 2.2 | Dimensão Capital Humano, 2024 [18] | 7 |
| 2.3 | Tipos de laboratórios consoante a localização, Heradio <i>et al.</i> (2016) [66] | 20 |
| 2.4 | Tipos de laboratórios consoante a localização, segundo Zutin, <i>et al.</i> [69] | 21 |
| 2.5 | Laboratório virtual <i>vs</i> simulador | 22 |
| 2.6 | Simulador <i>Falstad</i> (Exemplo) [24] | 23 |
| 2.7 | Laboratório virtual <i>Fritzing</i> exemplo | 26 |
| 2.8 | Laboratório virtual <i>Wokwi</i> exemplo | 26 |
| 2.9 | Simulador <i>Multisim</i> | 28 |
| 2.10 | Exemplo <i>VISIR</i> | 31 |
| 2.11 | <i>VISIR</i> no ISEP | 34 |
| 2.12 | Arquitectura do <i>VISIR</i> | 36 |
| 2.13 | <i>Chassis</i> PXI-1033 [116] | 36 |
| 2.14 | Osciloscópio PXI-5114 [117] | 37 |
| 2.15 | Gerador de sinal PXI-5402 [118] | 37 |
| 2.16 | Multímetro Digital PXI-4072 [119] | 37 |
| 2.17 | Fonte de tensão PXI-4110 [120] | 38 |
| 2.18 | Matriz <i>VISIR</i> [123] | 38 |
| 3.1 | <i>Arduino</i> Mega [131] | 42 |
| 3.2 | <i>ESP32</i> [138] | 43 |
| 3.3 | <i>RaspberryPI5</i> [139] | 43 |
| 3.4 | Exemplo do VB usado como multímetro digital | 45 |
| 3.5 | Arquitectura geral - LaRE | 45 |
| 3.6 | Fluxograma de uma chamada ao <i>socket</i> [142] | 46 |
| 3.7 | Arquitectura geral - LaRE | 47 |
| 3.8 | Gráfico da Lei de <i>Ohm</i> [143] | 48 |
| 3.9 | Experiência Lei de <i>Ohm</i> | 48 |
| 3.10 | Diagrama de blocos da rectificação [144] | 49 |
| 3.11 | Rectificação meia onda [144] | 50 |
| 3.12 | Rectificação onda completa [144] | 50 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.13 | Esquemas dos filtros [144] | 51 |
| 3.14 | Diagramas de <i>Bode</i> [ideal] [144] | 51 |
| 3.15 | Painel traseiro <i>VirtualBench VB-8012</i> [145] | 52 |
| 3.16 | Painel frontal <i>VirtualBench VB-8012</i> [145] | 53 |
| 3.17 | Matriz do LaRE | 53 |
| 3.18 | [Placa] Lei de <i>Ohm</i> | 54 |
| 3.19 | [Placa] rectificadores e filtros | 54 |
| 3.20 | [Placa] fontes de alimentação | 55 |
| 3.21 | <i>Raspberry PI5</i> com dissipador activo utilizado no LaRE | 56 |
| 3.22 | GPIOs <i>RaspberryPI</i> [148] | 56 |
| 3.23 | Representação alternativa dos GPIOs [148] | 57 |
| 3.24 | <i>Esquema simplificado de um relé</i> [150] | 57 |
| 3.25 | <i>Relés SPST e DPST</i> [150] | 58 |
| 3.26 | Diagrama de blocos <i>ULN2003A</i> [151] | 59 |
| 3.27 | Diagrama [em corte] de blocos <i>SN74HC595</i> [152] | 61 |
| 3.28 | Estrutura de uma página HTML [161] | 64 |
| 4.1 | Exemplo de utilização de relés SPST e DPST | 70 |
| 4.2 | Diagrama de blocos simplificado do <i>ULN2003A</i> | 70 |
| 4.3 | Exemplo de uso do <i>SN74HC595</i> e <i>ULN2003A</i> | 71 |
| 4.4 | Envio de <i>bits</i> para o registo de deslocamento | 72 |
| 4.5 | Fontes de tensão do VB | 72 |
| 4.6 | Implementação Fontes de 6 V e 12 V | 73 |
| 4.7 | Fonte de 5 V [<i>LM317</i>] | 74 |
| 4.8 | Problema de massa - onda completa | 75 |
| 4.9 | Problema de massa - onda completa [Resolvido] | 76 |
| 4.10 | Painel frontal Multímetro Digital | 76 |
| 4.11 | Esquema completo - Lei de <i>Ohm</i> | 77 |
| 4.12 | [Implementação] Lei de <i>Ohm</i> | 78 |
| 4.13 | Esquema completo (simplificado) - rectificadores e filtros | 79 |
| 4.14 | [Implementação] rectificadores e filtros | 80 |
| 4.15 | Funcionamento geral <i>Flask</i> | 81 |
| 4.16 | Estrutura de directórios - <i>Flask</i> | 82 |
| 4.17 | Diagrama de comunicação simplificado | 86 |
| 4.18 | Processo de leitura das medições de tensão e corrente | 89 |
| 4.19 | Erro de selecção | 96 |
| 4.20 | Página de <i>login</i> | 96 |
| 4.21 | Página inicial | 97 |
| 4.22 | [Exemplo] Experiência Lei de <i>Ohm</i> | 97 |
| 4.23 | Lei de <i>Ohm</i> - Selecção dos parâmetros | 98 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.24 | Seleção de parâmetros | 99 |
| 4.25 | Seleção de parâmetros | 100 |
| 5.1 | Medição prática | 104 |
| 5.2 | Gráfico da Lei de <i>Ohm</i> - $1\text{ k}\Omega$ - LaRE | 105 |
| 5.3 | Multisim - Lei de <i>Ohm</i> | 106 |
| 5.4 | Tensão de <i>ripple</i> no LaRE - meia onda | 107 |
| 5.5 | Valores experimentais e simulados - tensão de <i>ripple</i> | 107 |
| 5.6 | Medições práticas [complementares] <i>ripple</i> | 109 |
| 5.7 | Tensão de <i>ripple</i> no LaRE - onda completa | 109 |
| 5.8 | Tensão de <i>ripple</i> - <i>multisim</i> - onda completa | 110 |
| 5.9 | Frequência de corte - filtro passa-alto - Diagrama de <i>Bode</i> | 111 |
| 5.10 | Frequência de corte - <i>multisim</i> - Diagrama de <i>Bode</i> | 112 |
| 5.11 | v_{out} vs v_{in} LaRE | 112 |
| 5.12 | Valores práticos e simulados - v_{out} vs v_{in} | 112 |
| 5.13 | Frequência de corte - LaRE | 113 |
| 5.14 | Valores experimentais reais e simulados - frequência de corte - v_{out} vs v_{in} | 113 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Raspberry PI4 <i>vs</i> Raspberry PI5 - principais diferenças [149] | 56 |
| 3.2 | Modos de funcionamento do SN74HC595 [152] | 61 |
| 4.1 | Exemplo funcionamento de medição da Lei de Ohm | 77 |
| 4.2 | Exemplo funcionamento do rectificador de meia onda | 80 |
| 5.1 | Valores práticos - Lei de <i>Ohm</i> | 105 |
| 5.2 | Testes complementares - Pontes rectificadoras | 109 |

Listagens

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Exemplo <i>Jinja</i> incluído na página <i>base.html</i> | 63 |
| 3.2 | Exemplo CSS incluído na página HTML [164] | 65 |
| 3.3 | Exemplo da página HTML com o CSS definida externamente [164] . | 66 |
| 3.4 | Exemplo do CSS definido externamente [164] | 66 |
| 3.5 | Exemplo de <i>JavaScript</i> | 67 |
| 4.1 | <i>Decorator route()</i> - <i>views.py</i> | 83 |
| 4.2 | Construção de <i>urls</i> - <i>auth.py</i> | 83 |
| 4.3 | <i>Blueprint views</i> - <i>views.py</i> | 84 |
| 4.4 | <i>Blueprint auth</i> - <i>auth.py</i> | 84 |
| 4.5 | Registo das <i>blueprints</i> - <i>__init__.py</i> | 84 |
| 4.6 | Exemplo argumentos passados ao servidor - <i>ohm.html</i> | 85 |
| 4.7 | Envio de parâmetros HTML → <i>views.py</i> | 88 |
| 4.8 | Recepção de parâmetros | 88 |
| 4.9 | Envio de parâmetros <i>views.py</i> → HTML | 88 |
| 4.10 | Recepção de parâmetros | 88 |
| 4.11 | Comunicação <i>python</i> - <i>python</i> | 89 |
| 4.12 | <i>Block Mode [Sockets]</i> <i>configRelays.py</i> | 90 |
| 4.13 | <i>And bit bit shift_register.py</i> | 91 |
| 4.14 | Instanciação da classe <i>PyVirtualBench</i> | 92 |
| 4.15 | Exemplo <i>ps_example.py</i> | 93 |
| 4.16 | Cálculo do declive da recta | 94 |
| 4.17 | Gráfico Corrente vs Tensão | 94 |
| 4.18 | Filtros - Diagrama de <i>Bode</i> | 95 |
| 4.19 | Gravação do gráfico | 95 |

Glossário

Arduino

O *Arduino* é uma placa de desenvolvimento de código aberto baseada em *hardware* e *software* fáceis de utilizar. As placas *Arduino* são capazes de ler entradas - luz num sensor, um dedo num botão ou uma mensagem do *Twitter* - e transformá-las numa saída - activar um motor, ligar um *LED*, publicar algo *online* - utilizam a linguagem de programação *Arduino* (baseada em *Wiring*) e o *software Arduino* (IDE), baseado em *Processing* [1].

DIAC

O *Diode for Alternating Current* (DIAC) é um semicondutor que conduz a corrente elétrica num só sentido, tal como o díodo, mas de forma controlada, isto é, só após um disparo na sua porta. O SCR é constituído por quatro camadas PNPN ou NPNP, tendo numa extremidade um ânodo e um cátodo e, ainda, a porta. Ao aplicar uma tensão positiva entre o ânodo e cátodo, ele conduz, desde que se aplique um impulso positivo na porta, com um determinado valor mínimo. Tanto o ânodo como a porta devem ser polarizados directamente, senão o SCR não conduz [2].

EEPROM

EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) é um tipo de memória não volátil que pode ser escrita e apagada electricamente. É utilizada para armazenar pequenas quantidades de dados que devem ser preservados mesmo após desligar o sistema, como configurações, identificadores de *hardware* ou parâmetros de funcionamento.

ESP32

O *ESP32* é um microcontrolador de baixo custo e baixa potência com suporte para rede sem fios e *Bluetooth*, desenvolvido pela *Espressif Systems*. É amplamente utilizado em projetos de IoT devido às suas capacidades de conectividade e processamento.

HAT

O termo HAT (*Hardware Attached on Top*) refere-se a placas de expansão desenvolvidas segundo um padrão específico para o *Raspberry Pi*. Estas placas

ligam-se diretamente ao *header GPIO* e incluem uma *EEPROM* que permite ao sistema detectar automaticamente o acessório e configurar os respectivos pinos e *interfaces* de forma transparente.

Industry 4.0

A Indústria 4.0, uma iniciativa da Alemanha, converteu-se num termo adotado globalmente na última década. Dez anos após a introdução da Indústria 4.0, a Comissão Europeia anunciou a Indústria 5.0. Considera-se que a Indústria 4.0 é orientada para a tecnologia, enquanto a Indústria 5.0 é orientada para o valor [3].

KiCad

O *KiCad* é um conjunto de ferramentas de *software* de código aberto dedicada à Automatização do *design* electrónico (EDA - *Electronic Design Automation*). Esta ferramenta integra funcionalidades para a captura de esquemas elétricos e o desenho de placas de circuito impresso (*Printed Circuit Board (PCB)*), permitindo a exportação dos projetos nos formatos *Gerber* e *IPC-2581*. O *KiCad* é compatível com os sistemas operativos *Windows*, *Linux* e *MacOS*, sendo distribuída sob a licença GNU General Public License, versão 3 (GPL v3)

PC/104

As placas PC/104 são um padrão de computação embebida que se destaca pelo seu formato compacto e modula. Desenvolvidas pelo PC/104 Consortium, estas placas são amplamente utilizadas em aplicações industriais e de controle, oferecendo uma combinação de robustez e flexibilidade.

Python

O *Python* é uma linguagem de programação de alto nível, orientada a objecto, ou seja, com sintaxe mais simplificada e próxima da linguagem humana. É utilizada em *web* ou servidores. Tem uma biblioteca padrão bastante completa e uma enorme comunidade que desenvolve ferramentas e bibliotecas (*frameworks*) adicionais. O código é aberto e gratuito [4]. O *Python* usa a indentação para delimitar blocos de código. Como curiosidade esta linguagem foi baptizada com este nome pelo seu criador, Guido van Rossum, como referência aos *Monty Python*.

Raspberry Pi

Raspberry Pi é uma gama de pequenos computadores acessíveis e versáteis que podem ser utilizados para vários projectos e fins, desenvolvidos pela *Raspberry Pi Foundation*, uma organização educacional no Reino Unido. Esses

dispositivos foram projetados para promover o ensino de ciências da computação básicas em escolas e países em desenvolvimento, além de serem populares entre entusiastas de eletrônica e *makers* devido à sua versatilidade e custo acessível. Desde o seu lançamento, os modelos de RaspberryPI evoluíram significativamente, oferecendo maiores capacidades de processamento, memória e conectividade, adequados a uma ampla gama de aplicações, desde simples projetos de bricolagem a sistemas embbebidos complexos e até mesmo servidores de baixo custo[5][6].

SBC

SBC ou *Single-Board Computer* é um computador completo integrado numa única placa de circuito impresso, que inclui processador, memória, *interfaces* de entrada/saída e, muitas vezes, conectividade de rede. Os SBC, como o *Raspberry Pi*, são amplamente utilizados em aplicações de ensino, automação, prototipagem e sistemas embarcados, devido ao seu baixo custo, tamanho reduzido e versatilidade.

SCR

O *Silicon Control Rectifier* (SCR) é um semicondutor que conduz a corrente eléctrica nos dois sentidos, como se fossem dois diodos em paralelo e em sentidos contrários; isto é, ora funciona um diodo, durante a alternância positiva, ora funciona o outro na alternância negativa. A alimentação da porta do TRIAC é, frequentemente, feita utilizando um DIAC [2].

TRIAC

O *Triode for Alternating Current* (TRIAC) é um tiristor constituído por quatro camadas PNPN ou NPNP, com dois ânodos e uma porta. Contrariamente ao SCR, o TRIAC conduz nos dois sentidos da CA, desde que se aplique à porta um impulso suficiente, positivo ou negativo. O TRIAC é, geralmente, utilizado em CA, no comando e controlo de potência [2].

W3C

O *World Wide Web Consortium* (W3C) é uma organização internacional que desenvolve padrões e diretrizes para a *web* visando garantir que a esta permaneça aberta, acessível e interoperável para todos. Os principais objetivos são promover a compatibilidade entre diferentes sistemas e garantir que a *web* seja acessível a todos os utilizadores, independentemente das suas capacidades ou dispositivos. O W3C trabalha em várias áreas, incluindo HTML e CSS [7].

Wrapper

Um *wrapper* em Python, neste contexto, refere-se a uma camada de código desenvolvida para encapsular e simplificar a utilização da *interface* de programação do VirtualBench. Essencialmente, os *wrappers* funcionam como intermediários que permitem aos programadores interagir com a funcionalidade subjacente do VirtualBench através de comandos Python mais simples e diretos. Isso facilita a automação de tarefas e a integração do VirtualBench com outros componentes ou *scripts* desenvolvidos em *Python*, proporcionando uma maneira mais eficiente e acessível de controlar e operar os dispositivos e funcionalidades oferecidos.

Lista de Acrónimos

| | |
|-----------------------|---|
| ADC | <i>Analog-to-Digital Converter</i> |
| API | <i>Application Programming Interface</i> |
| ARM | <i>Advanced RISC Machine</i> |
| BTH | <i>Blekinge Institute of Technology</i> |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CNA-PRR | Comissão Nacional de Acompanhamento do Plano de Recuperação e Resiliência |
| COVID-19 | Doença por Coronavírus 2019 |
| CSS | <i>Cascading Style Sheets</i> |
| DESI | Digital Economy and Society Index |
| DIAC | <i>Diode for Alternating Current</i> |
| DMM | <i>Digital Multimeter</i> |
| DPST | <i>Double Pole Single Throw</i> |
| EUA | Estados Unidos da América |
| FPGA | <i>Field Programmable Gate Array</i> |
| GPIO | <i>General Purpose Input/Output</i> |
| GPL | <i>Gnu Public License</i> |
| HTML | <i>HyperText Markup Language</i> |
| HTTP | <i>Hypertext Transfer Protocol</i> |
| I²C | <i>Inter-Integrated Circuit</i> |
| IDC | <i>Insulation Displacement Connector</i> |

| | |
|----------------|---|
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> |
| IoT | <i>Internet Of Things</i> |
| ISEP | Instituto Superior de Engenharia do Porto |
| JSON | <i>JavaScript Object Notation</i> |
| LabVIEW | <i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i> |
| LaRE | Laboratório Remoto Expansível |
| LED | Laboratórios de Educação Digital |
| LR | Laboratório Remoto |
| MB | Megabyte |
| MCR | Matriz de Comutação de Relés |
| NI | <i>National Instruments</i> |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico |
| OE | <i>Output Enable</i> |
| PC | <i>Personal Computer</i> |
| PCB | <i>Printed Circuit Board</i> |
| PIC | <i>Programmable Interrupt Controller</i> |
| PILAR | <i>Platform Integration of Laboratories based on the Architecture of vi-siR</i> |
| PIP | <i>Pip Installs Packages</i> |
| PISA | <i>Program for International Student Assessment</i> |
| PRR | Plano de Recuperação e Resiliência |
| PXI | <i>PCI eXtensions for Instrumentation</i> |
| RCLK | <i>Register Clock</i> |
| RLMS | <i>Remote Laboratory Management System</i> |
| SCR | <i>Silicon Control Rectifier</i> |
| SER | <i>Serial Input</i> |
| SIG | <i>Special Interest Groups</i> |

| | |
|----------------|---|
| SIP0 | <i>Serial Input Parallel Output</i> |
| SPICE | <i>Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis</i> |
| SPST | <i>Single Pole Single Throw</i> |
| SRCLK | <i>Shift Register Clock</i> |
| SRCLR | <i>Shift Register Clear</i> |
| STE(A)M | <i>Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics</i> |
| STEM | <i>Science, Technology, Engineering and Mathematics</i> |
| TIC | Tecnologias da Informação e da Comunicação |
| TRIAC | <i>Triode for Alternating Current</i> |
| UE | União Europeia |
| UNESCO | <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i> |
| URL | <i>Uniform Resource Locator</i> |
| USB | <i>Universal Serial Bus</i> |
| VB | <i>VirtualBench</i> |
| VISIR | <i>Virtual Instrument Systems in Reality</i> |
| W3C | <i>World Wide Web Consortium</i> |
| WSGI | <i>Web Server Gateway Interface</i> |

Capítulo 1

Introdução

“So it begins”

— King Theoden, *The Lord of the Rings: The Two Towers*

Esta dissertação insere-se no programa de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas e tem como principal objectivo o desenvolvimento de um laboratório remoto aplicado ao ensino da electrónica. Este capítulo aborda a motivação para a abordagem desta temática, logo nele é feita a contextualização, assim como são apresentados os objectivos a serem atingidos e uma breve estruturação da dissertação.

1.1 Enquadramento

A educação em engenharia, especialmente em áreas como a electrónica, depende fortemente de actividades práticas. Os laboratórios são cruciais para que os estudantes possam aplicar os conceitos teóricos em cenários práticos, desenvolver habilidades técnicas e enfrentar desafios reais [8, 9]. No entanto, a manutenção e o acesso a laboratórios físicos tradicionais apresentam várias dificuldades, incluindo altos custos, limitações de espaço e a necessidade de supervisão constante por parte de instrutores ou professores qualificados [10]. Além disso, o acesso a esses laboratórios pode ser restrito devido a factores como horários de funcionamento e a necessidade de presença física.

Nos últimos anos, os avanços na tecnologia, do *eLearning* e na implementação da abordagem *Science, Technology, Engineering and Mathematics* (STEM) abriram novas possibilidades para o ensino prático da electrónica através de laboratórios remotos. Esses laboratórios permitem que os estudantes realizem experiências reais em equipamentos físicos controlados remotamente, independentemente da sua localização geográfica. A implementação de laboratórios remotos tem o potencial de democratizar o acesso ao ensino de qualidade, oferecendo oportunidades educacionais mais equitativas e inclusivas [11].

1.2 Objectivos

A génesis desta dissertação ocorreu há três anos e estava associada à ideia de desenvolver um Laboratório Remoto Expansível (LaRE) para o ensino da electrónica. Uma das soluções existentes no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) é o *Virtual Instrument Systems in Reality* (VISIR). O VISIR é um projecto - laboratório remoto (virtual) - que pode ser aplicado no vasto campo da engenharia electrotécnica e electrónica e na área da teoria e prática de circuitos. Tem como objectivo definir, desenvolver e avaliar um conjunto de módulos educativos compostos por experiências práticas, virtuais e remotas [12]. No entanto, o desenvolvimento deste laboratório remoto apresenta uma limitação importante, que corresponde ao facto de, por limitações técnicas, não ser possível realizar qualquer tipo de modificação e/ou actualização ao *firmware* da matriz que controla os relés.

Partindo, então, destes pressupostos definiram-se os seguintes objectivos:

- Contextualizar o uso dos laboratórios remotos no ensino;
- Estudar e analisar algumas das alternativas existentes, nomeadamente o VISIR;
- Identificar os requisitos de *hardware* e *software* necessários para implementar o LaRE como um projeto *open-source*, em conformidade com a licença *Gnu Public License* (GPL):
 - Pesquisar, analisar e avaliar a implementação de um servidor;
 - Pesquisar, analisar e avaliar as soluções de *software* existentes para a integração do *VirtualBench* (VB) com o LaRE;
 - Definir quais, e quantas, experiências laboratoriais integrar;
- Implementar e testar o LaRE;
- Identificar as vantagens e desvantagens do LaRE, assim como possíveis melhoramentos;
- Apresentar resultados e conclusões da implementação do LaRE.

1.3 Estrutura do documento

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo, foi feita uma breve introdução à implementação do LaRE e aos objetivos que a orientam. O Capítulo 2 aborda o estado da arte no que respeita à Educação Digital e à integração dos laboratórios no ensino. O Capítulo 3 trata, de forma detalhada, os aspectos relacionados com o LaRE, ao nível do *hardware* e do *software*. A implementação do LaRE é apresentada no Capítulo 4. No Capítulo 5 discutem-se os resultados, que servem de base para, no Capítulo 6, se apresentarem as conclusões e limitações da implementação do LaRE.

Capítulo 2

Estado da Arte

“You are entering a world of pain.”

— Walter Sobchak, *The Big Lebowski*

Tendo em conta a experiência do autor como professor numa escola secundária, neste capítulo procura-se fazer o enquadramento das principais dificuldades que a Educação (digital) atravessa em Portugal e discutir em que medida a integração da tecnologia digital na educação é essencial para criar ambientes de aprendizagem mais eficazes e adaptados à evolução do panorama digital. Explora-se o potencial de tecnologias, como os laboratórios remotos, para o desenvolvimento de experiências de aprendizagem personalizadas e reflete-se sobre a forma como podem ajudar a suprir estas mesmas dificuldades. Face a isto, discute-se a ascensão do *eLearning*, particularmente no contexto da abordagem STEM, assim como a evolução da educação das salas de aula tradicionais para ambientes virtuais, enfatizando as oportunidades e possibilidades de aprendizagem alargadas oferecidas pelo *eLearning*.

2.1 Transformação digital na educação

A educação está a sofrer grandes mudanças a nível tecnológico, social e humano. Estas foram impulsionadas pela Doença por Coronavírus 2019 (COVID-19), que expôs as fragilidades em termos de gestão e capacitação dos recursos tecnológicos e

do eLearning¹. O sistema educativo português apresenta ainda várias fragilidades, que ficaram particularmente evidentes nesse contexto. Ainda assim, graças a um grande esforço colectivo, foi possível responder de forma imediata a este enorme obstáculo. Num curto espaço de tempo, o ensino presencial e o contacto humano foram substituídos pelo ensino à distância. Estábamos pronto para isto?

Antes da pandemia, no Ensino Básico e no Ensino Secundário, as tecnologias digitais eram mais frequentemente utilizadas como meio de comunicação do que como ferramenta pedagógica [14]. Nas últimas duas décadas, Portugal já introduziu programas para abordar a digitalização na educação. O programa de digitalização contemplado no Plano de Ação para a Transição Digital (Resolução do Conselho de Ministros n.º 30/2020, de 21 de abril) prevê, entre outras medidas, uma forte aposta na formação digital dos professores, no desenvolvimento digital das escolas e na disponibilização de recursos educativos digitais [15, 16].

No mundo de hoje, cada vez mais digital, apesar de em 2024 o número de utilizadores da Internet se situar nos 5,5 mil milhões, ainda existem 2,6 mil milhões de pessoas sem acesso à Internet, como se pode observar no gráfico retirado do relatório “ITU Facts & Figures 2024” e apresentado na Figura 2.1 [17, 18].

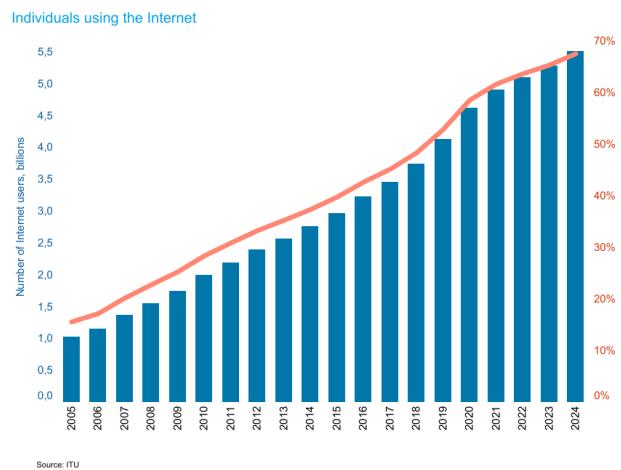


Figura 2.1: Número de utilizadores da Internet em todo o mundo, 2024 [18]

Este problema reduz o acesso a um mundo de informações disponíveis *online* e limita o potencial de aprendizagem e crescimento, para não falar das competências digitais de que as pessoas necessitam para aprender e melhorar as suas vidas. A crise da COVID-19 demonstrou como a ligação à Internet é crucial para actividades quotidianas, como o trabalho e a aprendizagem. Hoje, mais do que nunca, é necessário reforçar as infraestruturas nacionais, de forma a garantir que a conectividade esteja

¹Jay Cross, é conhecido por ter “cunhado” pela primeira vez o termo *eLearning* [13]. Por isso, nesta dissertação, o termo será sempre referido desta forma, em vez de *e-Learning*.

amplamente disponível. É igualmente essencial reforçar os planos de conectividade das escolas e investir numa aprendizagem de qualidade, com o objectivo de melhorar o acesso à educação, os resultados da aprendizagem e o potencial de ganhos dos jovens, bem como o desenvolvimento socioeconómico das suas comunidades e países [19].

Ainda que não constitua objectivo central desta dissertação proceder a uma análise exaustiva do “*Digital Decade 2024 Country Report*” [20], a consulta de alguns indicadores-chave permite constatar que, em 2023, Portugal registou uma taxa de 55,97% da população com, pelo menos, competências digitais básicas - ligeiramente acima da média da União Europeia (55,56%). Este progresso tem sido acompanhado por um crescimento sustentado no número de especialistas em Tecnologias da Informação e da Comunicação (TIC). Contudo, o desempenho global de Portugal na dimensão Capital Humano, segundo o índice Digital Economy and Society Index (DESI), continua a posicionar-se abaixo da média europeia, como é evidenciado no gráfico geral apresentado na Figura 2.2a. A distribuição etária representada na Figura 2.2b mostra que Portugal se encontra entre os países com menor desempenho nas faixas etárias mais elevadas, revelando que persistem desafios significativos noutros indicadores que continuam a comprometer esta dimensão estratégica para a transição digital.

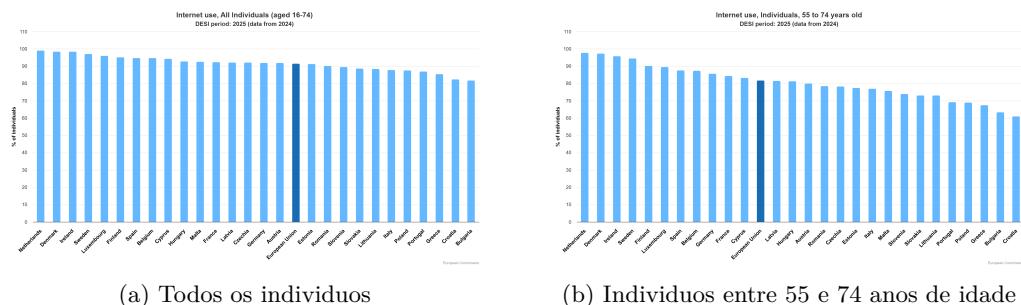


Figura 2.2: Dimensão Capital Humano, 2024 [18]

O mesmo relatório enfatiza que, apesar do avanço nas competências básicas, são necessários esforços redobrados para que Portugal atinja a meta europeia de 80% da população com competências digitais básicas até 2030 e supere os seus défices na dimensão global do Capital Humano [20].

Pode, assim, concluir-se que esta falta de competências básicas foi agravada pela pandemia. De acordo com o relatório “*Youth & COVID-19: Impacts on jobs, education, rights and mental well-being*” [21], 65% dos jovens afirmaram ter aprendido menos desde o início da pandemia, devido à transição das aulas presenciais para o regime *online* durante o confinamento. Apesar dos esforços para manter os estudos, metade considerou que tinha ficado para trás e 9% temeu reprovar devido às dificuldades sentidas. A situação foi ainda mais grave entre os jovens de países com baixos

rendimentos, devido ao acesso limitado à Internet, à falta crítica de equipamentos e, em alguns casos, à ausência de um espaço adequado para aprendizagem em casa [21].

Com base nestes resultados, o estudo conclui que “os desafios colocados pela transição para o ensino fora da sala de aula e em casa foram enormes.”. Mesmo quando as instituições conseguiram fazer a transição para a aprendizagem *online*, os professores, formadores e estudantes podem não ter tido a capacidade de “garantir a continuidade da aprendizagem”. Entre os factores que dificultam a eficácia do ensino *online* contam-se, como já foi referido: baixos níveis de acesso à Internet; lacunas nas competências digitais; incapacidade de ensinar e aprender à distância; falta de equipamento informático em casa; falta de espaço; falta de materiais preparados para o *eLearning*; e falta de trabalho de grupo e de contacto social - ambos componentes fundamentais no processo de aprendizagem.

Enquanto docente do ensino secundário e director de turma, com responsabilidades tanto junto do corpo docente como dos alunos, foi possível observar diversas dificuldades enfrentadas pelos estudantes, nomeadamente a ausência de um computador pessoal, a falta de acesso à Internet ou a existência de uma ligação extremamente lenta. Registaram-se, inclusivamente, casos de alunos que participaram nas aulas através do telemóvel. Do lado dos docentes, verificou-se um desafio considerável, sobretudo devido à falta de experiência prévia no ensino à distância e às dificuldades em identificar e utilizar adequadamente as diversas ferramentas *online*. A correspondente curva de aprendizagem revelou-se lenta e exigente para muitos deles. Esta realidade não se verificou apenas em Portugal, mas verificou-se a nível global. Em meados de março de 2020, escolas e instituições de ensino em todo o mundo foram encerradas e os alunos de todos os níveis passaram a assistir às aulas e a interagir com os professores através de videoconferências e outras ferramentas digitais. A *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) apoiou a implementação de programas de ensino à distância em larga escala, recomendando aplicações e plataformas educativas gratuitas que pudessem ser utilizadas por escolas e professores para assegurar a continuidade pedagógica. A organização partilhou ainda boas práticas para o uso de tecnologias móveis de baixo custo com fins educativos, com o objectivo de atenuar os impactos negativos da interrupção do ensino presencial [22].

Do ponto de vista da prática pedagógica em contexto de sala de aula, especialmente nas disciplinas laboratoriais - como é o caso da Electrónica -, as aulas à distância mostraram-se particularmente inadequadas. Um exemplo evidente foi a substituição do contacto directo com materiais físicos, como a placa branca (também conhecida por *breadboard* ou placa de ensaio) e os componentes electrónicos reais, pelo uso de simuladores *online*, como o *Multisim* [23] e o *Falstad* [24]. Embora estes simuladores já fossem utilizados como complemento às actividades presenciais, o seu uso exclusivo limitou fortemente a experiência prática dos alunos, que deixaram de

poder manipular fisicamente os circuitos - um aspecto central para a consolidação de competências técnicas nesta área. Em Agosto de 2020, numa citação incluída num artigo publicado no *Diário de Notícias*, um aluno afirmava:

“As aulas de laboratório foram as que menos sentido fizeram para mim, pois fazer relatórios e cálculos sobre experiências que não fizemos, sem adquirir/desenvolver as competências e técnicas que é suposto esta componente da disciplina nos dar, é um pouco ridículo” [25].

Assim, a resposta à questão colocada anteriormente é: não, ninguém estava preparado para estas mudanças nem para o ensino *online* e o *eLearning*.

Nos últimos anos, Portugal tem investido significativamente, não só na educação digital, mas também em diversas iniciativas, reconhecendo a importância das competências digitais para o futuro dos seus cidadãos e para a competitividade do país. No contexto nacional, o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) previu a entrega de computadores portáteis a todos os alunos e docentes do Ensino Básico e Ensino Secundário. Estava inicialmente prevista a distribuição de 600 mil computadores com acesso à Internet. Contudo, a implementação desta medida ficou aquém das expectativas. Em 2023, a Comissão Nacional de Acompanhamento do Plano de Recuperação e Resiliência (CNA-PRR) classificava como “preocupante” a evolução da iniciativa Escola Digital [26]. Até essa data, apenas cerca de 70% dos equipamentos tinham sido efectivamente entregues. A principal razão prendeu-se com a exigência de um compromisso por parte dos encarregados de educação, que teriam de reembolsar o valor dos equipamentos caso não os devolvessem nas mesmas condições, dificultando a aceitação do programa. Acrescem ainda dificuldades logísticas identificadas por diversas escolas [26]. A estas limitações somam-se decisões políticas recentes, que não parecem alinhar-se com os objectivos da transição digital. No início do ano lectivo de 2024/2025, foi reportado que milhares de alunos e docentes ficaram sem acesso aos *hotspots* de Internet integrados nos *kits* digitais escolares, medida justificada pela tutela como sendo transitória, mas que afectou directamente a continuidade digital no processo de ensino-aprendizagem. Esta alteração comprometeu não só a equidade no acesso, como também a eficácia dos recursos já distribuídos, dificultando o cumprimento dos objectivos traçados no Plano de Acção para a Transição Digital [27].

O Plano Nacional de Competências Digitais (INCoDe.2030) [28], foi lançado em 2017 e constitui uma iniciativa estratégica do governo português com o objectivo de reforçar a literacia digital da população em geral. Estruturado em cinco eixos fundamentais - inclusão, educação, qualificação, especialização e investigação -, o plano orienta um conjunto alargado de políticas públicas e iniciativas destinadas à promoção das competências digitais ao longo da vida. No âmbito deste plano foi criado o Observatório das Competências Digitais, uma plataforma de monitorização

e análise que sistematiza e disponibiliza informação sobre as diversas ações e programas desenvolvidos no contexto do INCoDe.2030. Entre as iniciativas registadas pelo Observatório destacam-se projectos como “Eu Sou Digital”, *Apps for Good* e a iniciativa Ensico [29], representando exemplos concretos da operacionalização das metas estabelecidas pelo plano.

Em junho de 2025, a CNA-PRR apresentou o quinto relatório relativo à execução do PRR. Este documento destaca os investimentos estratégicos associados à transição digital, bem como os resultados esperados, entre os quais se salientam a “...diminuição das desigualdades no acesso à tecnologia...” e “...melhorias na eficiência e qualidade dos processos de ensino...”. Entre os investimentos identificados no relatório, orientados para a modernização das infraestruturas escolares, incluem-se: a aquisição de videoprojectores, a implementação dos Laboratórios de Educação Digital (LED), a ampliação das redes de área local sem fios, o reforço da conectividade à Internet através da rede alargada da Educação, bem como o Projeto Redimensionar a ligação das escolas a essa rede, com vista à melhoria da largura de banda e da fiabilidade do acesso [30].

Complementarmente, no estudo de caso desenvolvido por Wastiau et al. (2024) [31], são analisadas outras iniciativas que sustentam a transição digital no sector educativo, com destaque para o Programa Nacional de Promoção do Sucesso Escolar (PNPSE), a Estratégia Nacional de Educação para a Cidadania (ENEC), consagrada no Decreto-Lei n.º 55/2018, e o Regime Jurídico da Educação Inclusiva, estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 54/2018. Segundo os autores, estas políticas “...orientam e são, por sua vez, fortalecidas pela estratégia de transição digital adoptada em 2020.” [31].

Os desafios para alunos e professores foram enormes, a adaptação ao processo de ensino/aprendizagem *online* teve de ser feita muito rapidamente e os recursos digitais tornaram-se a “tábua de salvação” da educação. No entanto, as oportunidades que as tecnologias digitais oferecem vão muito além do apoio de emergência utilizado durante a pandemia. Actualmente, está disponível um grande número de possibilidades, novas respostas para “o quê”, “como” e “quando” as pessoas aprendem [32].

A forma de pensar dos estudantes de hoje é também muito diferente da de há trinta anos. De uma forma mais particular, o pensamento mudou muito desde que a Internet e os recursos digitais começaram a tornar-se massivos. É essencial que os alunos possam aceder à tecnologia e utilizá-la para se desenvolverem ainda mais e a lição mais importante de todas é: permitir-lhes compreender o que fazer com a informação e os recursos que estão à sua disposição de tantas formas diferentes. Esta nova adaptação educativa (ou deveria chamar-se “evolução”?) “também adapta a aprendizagem aos estilos de aprendizagem pessoais com uma granularidade e precisão muito maiores do que qualquer ambiente de sala de aula tradicional pode fazer. Do mesmo modo, laboratórios virtuais dão aos alunos a oportunidade de conceber,

realizar e aprender com as experiências, em vez de se limitarem a aprender sobre elas.” [32].

Por outro lado, os professores devem desenvolver a sua literacia digital, para melhor dominarem estas novas ferramentas na sala de aula, de forma a ajudarem os alunos a construírem o seu próprio conhecimento. Assim, é evidente que a Educação, como um todo, precisa de se inserir neste contexto, que está cada vez mais presente no quotidiano de todos. O mundo é cada vez mais dominado pela tecnologia (... e, nos tempos actuais, o domínio da Inteligência Artificial já se faz sentir). Milhares de milhões de dispositivos físicos em todo o mundo estão agora ligados à Internet, todos recolhendo e partilhando dados. Actualmente, os circuitos integrados - ou microprocessadores e microcontroladores, consoante a aplicação - são produzidos a baixo custo e a ubiquidade das redes sem fios permite ligar praticamente qualquer objecto, desde algo tão pequeno como um comprimido até algo tão grande como um avião. A esta rede global de dispositivos interligados, com capacidade de recolher e trocar dados em tempo real, dá-se o nome de Internet das Coisas (*Internet Of Things* (IoT)) [33].

Por conseguinte, a informação e os recursos estão “na ponta dos dedos de todos” e à distância de um clique.

“Chegou o momento de os países aproveitarem as lições da pandemia para reconfigurarem as pessoas, os espaços, o tempo e a tecnologia, de modo a criarem ambientes educativos mais eficazes e eficientes” [34].

Se reflectirmos sobre esta ideia em contexto educativo e acrescentarmos o facto de o ensino da electrónica em Portugal, ao nível do Ensino Secundário, passar pelo ensino profissional e se o objectivo é a evolução e inovação no processo de ensino/aprendizagem, é necessário proporcionar a todos os intervenientes as condições e ferramentas necessárias para que o trabalho possa ser desenvolvido e, consequentemente, os alunos realmente aprendam. Praticamente todas as aprendizagens e futuros empregos exigirão um certo nível de competências e aptidões digitais. A constante evolução tecnológica exige o desenvolvimento de competências ao longo da vida [35]. O esforço na evolução da educação digital em Portugal - e consequente aumento do índice DESI de Capital Humano - pode ser aferido pelas crescentes iniciativas governamentais e pela adopção de tecnologias digitais nas escolas e universidades. Este esforço é materializado através de várias iniciativas e programas governamentais, que visam aumentar a literacia digital, integrar a tecnologia no sistema educacional, capacitar professores e preparar os estudantes para a era digital. “As medidas de apoio aos objectivos digitais representam um montante que corresponde a 22% da dotação total do plano, ultrapassando o limiar de 20% definido pela regulamentação europeia” [36].

2.2 eLearning e abordagem STEM

Após a análise dos investimentos em infraestruturas digitais e das políticas educativas associadas à transição digital, importa agora aprofundar duas abordagens fundamentais neste contexto: o *eLearning* e a abordagem STEM. Estas abordagens, embora distintas nas suas origens, revelam-se hoje profundamente interligadas, sobretudo quando integradas em ambientes de aprendizagem mediados por tecnologia. A evolução recente da educação digital foi particularmente acelerada com a pandemia da COVID-19, que impulsionou a adopção de recursos digitais a uma escala sem precedentes. O *eLearning*, até então complementar ao ensino presencial, tornou-se não apenas comum, mas necessário. Assistiu-se, assim, a uma migração generalizada do modelo tradicional de sala de aula para ambientes virtuais de aprendizagem, baseados em plataformas digitais. Esta transformação não só democratizou o acesso à educação, como também ampliou as possibilidades pedagógicas, abrangendo formatos como cursos *online*, laboratórios virtuais e remotos e simuladores digitais. Neste contexto, torna-se pertinente reflectir sobre como o *eLearning* se articula com abordagens como a STEM, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de competências digitais, científicas e tecnológicas. A integração de laboratórios remotos, simuladores e ambientes experimentais digitais surge, assim, como um eixo estruturante para uma educação inovadora, inclusiva e tecnicamente actualizada.

2.2.1 Uma questão de conceitos

O conceito de *eLearning* tem sido amplamente discutido, sendo objecto de múltiplas definições ao longo das últimas décadas. Esta diversidade não é apenas semântica, mas reflete também os diferentes contextos de aplicação e as abordagens teóricas subjacentes. Em 2004, Jay Cross no seu artigo “*An Informal History of eLearning*” [13], discute a natureza fluida e a evolução deste modelo. Cross apresenta o *eLearning* como uma visão para a transformação da formação empresarial, destacando o seu carácter informal e descentralizado. No entanto, num estudo intitulado “O e-Learning no Ensino Superior: um caso de estudo” [37], Magano et al. (2008), generalizam a definição dada por Maria João Gomes no seu artigo sobre reflexões em torno do *eLearning* [38], considerando que este “(...) corresponderá a qualquer metodologia de ensino/aprendizagem que integre actividades, suportadas por TIC, essenciais para atingir os objectivos de aprendizagem definidos.”. No mesmo artigo, Maria João Gomes defende que “(...) o termo e-learning deve ser adoptado como menos centrado nos aspectos tecnológicos e mais próximo das potencialidades pedagógicas decorrentes da utilização das “tecnologias de rede” na concepção de situações baseadas na interacção e colaboração, no sentido da construção de aprendizagens significativas”.

Assim, é evidente que não existe um consenso unívoco sobre o significado de *eLearning*. Esta multiplicidade de definições resulta das diversas perspetivas, interesses

e concepções dos diferentes intervenientes - académicos, técnicos, políticos e pedagógicos - que, de diferentes formas, têm contribuído para o desenvolvimento deste domínio. Para ilustrar ainda mais essa diversidade de entendimentos, destaca-se a definição apresentada no “Convite à apresentação de propostas DG EAC/46/02” [39], que descreve o *eLearning* como “(...) a utilização das novas tecnologias multimédia e da Internet para melhorar a qualidade da aprendizagem, facilitando o acesso a recursos e serviços, bem como o intercâmbio/interação e a colaboração à distância.”. Esta visão aproxima-se de uma concepção de aprendizagem assente na comunicação e na colaboração *online*, como referida também por Maria João Gomes [38].

Uma das principais vantagens do *eLearning* é a flexibilidade que oferece. Os estudantes podem aprender ao seu próprio ritmo e em horários ajustados às suas rotinas, o que é particularmente útil para aqueles que têm outras responsabilidades, como o trabalho ou apoio à família. Para além disso, *eLearning* pode também ocorrer a partir de qualquer lugar, desde que haja uma ligação à Internet, o que permite aos alunos estudar a partir de casa ou de qualquer outro lugar que seja conveniente para eles. Outra vantagem é que permite o acesso a uma grande variedade de recursos e materiais de aprendizagem, incluindo vídeos, textos, actividades interactivas, fóruns de discussão, laboratórios virtuais e remotos, entre outros. Estes recursos podem ser actualizados e adaptados rapidamente de acordo com as necessidades dos alunos e professores, garantindo que os conteúdos estão sempre actualizados e são relevantes. Além disso, pode também ser uma forma eficaz de personalizar a aprendizagem, permitindo que os alunos se concentrem nas áreas em que precisam de mais ajuda e avancem rapidamente nas áreas em que já têm conhecimentos suficientes. As avaliações *online*, por sua vez, permitem diagnosticar competências e conhecimentos, permitindo ao professor ajustar e adaptar os conteúdos e as actividades de aprendizagem às necessidades individuais de cada estudante.

Para as instituições de ensino em Portugal, o *eLearning* pode ajudar a reduzir os custos, eliminando a necessidade de espaço físico e equipamento adicionais, assim como também pode ajudar a alcançar um público mais vasto de alunos, especialmente aqueles que não têm acesso ao ensino presencial devido a restrições geográficas, financeiras ou outras. Permite, também, que as instituições de ensino em Portugal ofereçam educação de qualidade a um custo mais baixo, dando a possibilidade a que mais pessoas tenham acesso à educação. Por último, pode contribuir para melhorar a qualidade do ensino em Portugal, permitindo que os alunos aprendam de forma mais eficaz e eficiente. Os professores podem monitorizar os progressos dos alunos em tempo real, fornecendo *feedback* imediato e adaptando os conteúdos às suas necessidades. Além disso, o *eLearning* pode ajudar a promover a colaboração entre alunos e professores, permitindo-lhes trabalhar em conjunto em projectos e actividades de grupo, independentemente da sua localização física. Embora existam desafios envolvidos na adopção do *eLearning*, os benefícios superam os problemas e

é provável que o *eLearning* continue a ser uma parte importante do ensino no futuro.

Tal como foi referido nos parágrafos anteriores, não é objectivo desta dissertação apresentar ou analisar exaustivamente as múltiplas definições e concepções de *eLearning*. O mesmo princípio aplica-se à abordagem STEM. No entanto, torna-se relevante compreender este conceito e a sua evolução ao longo do tempo, sobretudo no contexto da educação digital.

O acrónimo STEM designa a área da Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática e o conceito vai muito além de uma mera definição. Se tomarmos como ponto de partida o *site* da UNESCO [40], é fácil compreender que as definições dão um sentido lato ao conceito. Citando Gonzalez e Kuenzi (2012) [41] e o *Australian Council of Learned Academies* (ACOLA) 2014 [42], verifica-se que consideram essencialmente a “ocupação”, embora em contextos diferentes. Enquanto a primeira publicação apresenta um diagnóstico de STEM nos Estados Unidos da América (EUA), a segunda publicação aborda uma forma de reduzir as lacunas nestas competências. Jonathan Rothwel, no seu artigo “*The Hidden STEM Economy*” [43], procura clarificar a ambiguidade deste conceito definindo primeiro conhecimento STEM e assim “constata que uma grande parte dos empregos ligados a esta área são técnicos (“blue-collar”) e não “académicos””. Uma terceira definição - talvez a que melhor se adequa aos objectivos deste trabalho - é apresentada por Mark Sanders no artigo “STEM, STEM Education, STEMmania” [44]. O autor centra-se especificamente no termo “STEM education”, fazendo a apologia de uma abordagem integrativa, ou seja, do ensino articulado entre duas ou mais das áreas disciplinares que compõem o acrónimo, ou entre uma dessas áreas e outra de natureza distinta. Esta visão defende, assim, a integração curricular como princípio estruturante, em contraste com perspectivas mais fragmentadas da educação científica e tecnológica. Em termos gerais, a expressão “STEM education” refere-se a actividades educativas desenvolvidas em todos os níveis de ensino - desde a Educação Pré-escolar até ao pós-doutoramento - e em contextos tanto formais (como as salas de aula) como informais (por exemplo, programas pós-escolares ou iniciativas extracurriculares). Nos últimos anos, surgiu uma nova definição baseada na ideia de acrescentar as artes ao currículo, recorrendo a princípios de raciocínio e concepção e incentivando soluções criativas, no que se designa por *Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics* (STE(A)M). No entanto, tal como referido anteriormente, não é objectivo do presente documento desenvolver ainda mais estes conceitos específicos.

Na prática pedagógica desenvolvida, não só em contexto de sala de aula, mas também em ambientes não formais, os alunos participam em diversos projectos, tanto a nível nacional como internacional, nos quais aplicam os princípios da abordagem STEM. As actividades desenvolvidas são bastante diversificadas - desde o envio de engenhos para a estratosfera até à construção de robôs.

2.2.2 Principais desafios

Um dos principais desafios enfrentados em Portugal na implementação da abordagem STEM é a falta de recursos e de infraestruturas adequadas. Tal como foi referido anteriormente, e conforme reforçado pelo mais recente relatório do *Program for International Student Assessment* (PISA), da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), muitas escolas continuam sem acesso a laboratórios devidamente equipados e à tecnologia actualizada necessária para um ensino eficaz das ciências e da tecnologia [45]. Neste âmbito, a insuficiência do investimento na educação em Portugal constitui uma limitação significativa, condicionando a capacidade do país para inovar e desenvolver novas tecnologias [46, 47, 48, 49, 50].

Adicionalmente, os pontos fracos do sistema educativo português - identificados no relatório da OCDE intitulado “*Effective policies, Successful Schools*” [51] - incluem a escassez de pessoal não docente, a elevada taxa de retenções, a carência de equipamento informático, a ausência de plataformas de ensino *online* eficazes, o acesso limitado e pouco fiável à Internet, bem como a persistente falta de equidade.

Para além destas limitações estruturais, regista-se igualmente a escassez de profissionais qualificados nas áreas STEM. Num artigo publicado no *site* oficial da UE [52], é referido que “Em toda a UE, uma das principais causas do défice de profissionais de TIC e STEM prende-se com a insuficiência da oferta de licenciados do ensino secundário superior e do ensino superior em relação à procura crescente”. Esta escassez está directamente relacionada com a baixa percentagem de profissionais no sector das TIC. De acordo com o Relatório da Década Digital 2024 [53], a percentagem de especialistas em TIC empregados no país é ligeiramente inferior à média da União Europeia (4,6% contra 4,8%), com uma diminuição preocupante na representação feminina (20,2% em 2024, face a 20,4% em 2021). Este dado evidencia não só um défice quantitativo, mas também um desafio persistente em termos de diversidade e atraktividade das carreiras tecnológicas - aspectos intrinsecamente ligados ao reforço do ecossistema STEM nacional. O relatório recomenda, por isso, a adopção de medidas para aumentar o número de especialistas em TIC, bem como o incentivo à participação dos jovens - especialmente das raparigas - no prosseguimento de estudos e carreiras nas áreas tecnológicas.

A pandemia da COVID-19 também apresentou desafios adicionais para a implementação do STEM. Com muitas escolas fechadas e com aulas à distância, muitos alunos não tiveram acesso a laboratórios e equipamento especializado necessário para aprender ciência e tecnologia *hands-on*. Além disso, como já foi referido na Secção 2.1, a pandemia aumentou a desigualdade na educação, com os alunos de famílias com baixos rendimentos a terem menos acesso à tecnologia e aos recursos necessários para acompanhar o ensino à distância [54, 55].

Ultrapassar estes desafios não é tarefa simples e exige um esforço concertado por parte de todos os intervenientes no processo educativo. No entanto, é legítimo

questionar qual poderá ser, neste contexto, o papel concreto dos professores. Em primeiro lugar, procurar os recursos cuja utilização em contexto de sala de aula possa, pelo menos, permitir que o processo de ensino-aprendizagem evolua e que estes desafios sejam ultrapassados ou, pelo menos, atenuados: Os recursos “(...) didácticos parecem estar no centro de tudo, os professores precisam deles para ajudar no seu ensino e os alunos precisam deles para os ajudar na sua aprendizagem.” [56]. Por outro lado, num inquérito [57] realizado em nome da Pearson² pela The Harris Poll³, envolvendo 7038 pessoas com idades compreendidas entre os 16 e os 70 anos em todo o mundo, verificou-se que 78% dos inquiridos acreditavam que a aprendizagem *online* daria à pessoas mais fácil acesso a uma educação de qualidade.

Pelo que foi dito anteriormente e conhecendo bastante bem a realidade do Ensino Secundário por trabalhar com alunos que, na sua maioria, vão directamente para o mundo do trabalho, pode-se concluir que a educação enfrenta vários desafios, nomeadamente a necessidade de os professores, em particular, se manterem actualizados em relação às tecnologias emergentes, bem como serem capazes de preparar os alunos para as exigências do mercado de trabalho em constante evolução. No entanto, este não será o maior desafio. Existem vários e graves problemas a montante que tornam o processo de ensino/aprendizagem muito difícil. Este não é apenas um problema das escolas secundárias, abrangendo também o ensino universitário. De facto, podemos referir como um problema grave as dificuldades financeiras [58, 59, 60] das escolas e universidades, que limitam o acesso dos alunos a equipamentos e materiais necessários essenciais nomeadamente para as aulas laboratoriais: computadores actualizados, software, etc. Uma das consequências desta limitação é a falta de ligação entre a teoria e a prática. Muitas vezes, os alunos são expostos a uma grande quantidade de informação teórica, mas não têm a oportunidade de aplicar esses conhecimentos em projectos práticos. Este facto pode levar a uma falta de compreensão sobre como as teorias se aplicam na vida real e pode dificultar a transferência de conhecimentos para a prática profissional.

Para ultrapassar os desafios da implementação do STEM em Portugal, é importante que o país continue a investir em recursos e infraestruturas adequados ao ensino e aprendizagem das ciências e tecnologias. Além disso, é necessário sensibilizar para a importância do STEM para o futuro de Portugal e proporcionar oportunidades de carreira atraentes para os licenciados nestas áreas. Finalmente, é também importante que Portugal trabalhe para manter o seu talento científico e tecnológico no país, em vez de o perder no estrangeiro: “Portugal perde 4 mil cérebros por ano” [61].

Esta forma de ensino não só faz a integração das áreas do conhecimento, como também permite ao aluno usá-las para conexões na resolução de problemas diários.

²<https://plc.pearson.com/>

³<https://theharrispoll.com/>

A aprendizagem é amplamente beneficiada pela interdisciplinaridade. Além disso, nesta metodologia de ensino, os alunos aprendem a colaborar uns com os outros.

2.3 Laboratórios na educação

*“Teoria sem prática é utopia,
prática sem teoria é rotina.”*

Anónimo⁴

Um dos pontos-chave do ensino profissional consiste em preparar os alunos para o mundo do trabalho. A ascensão da Industry 4.0 levou a que mais instituições de ensino adoptassem os laboratórios remotos como uma alternativa contemporânea para o desenvolvimento das competências técnicas e sociais exigidas a estudantes e formadores na área da engenharia [62].

A investigação sobre a eficácia do ensino e da aprendizagem em ambiente laboratorial⁵ remonta à década de 1960 e existem numerosos estudos, ensaios e teses de doutoramento sobre esta temática. Algumas observações particularmente relevantes foram destacadas nos trabalhos de Hofstein [8]:

- As actividades laboratoriais escolares têm potencial especial como meios e estratégias para ensinar e aprender que podem promover importantes resultados de aprendizagem das ciências para os alunos;

(Este facto é comprovado nas aulas práticas dos meus alunos. Estes sentem-se muito mais motivados para aprender utilizando qualquer tipo de recurso, quer seja um laboratório real ou um simulador *online*.)

- Os professores precisam de conhecimentos, competências e recursos que lhes permitam ensinar eficazmente em ambientes de aprendizagem práticos;

(Isto está de acordo com o que foi mencionado na secção anterior: Os professores devem desenvolver a sua própria literacia digital. Esta adaptação está a revelar-se um grande desafio).

- As percepções e os comportamentos dos alunos no laboratório de ciências são muito influenciados pelas expectativas e práticas de avaliação dos professores e pela orientação do guia de laboratório, das fichas de trabalho e dos meios electrónicos associados;

(Obviamente isto requer muito trabalho, empenho e dedicação, e os professores também precisam de motivação e das condições necessárias para poderem

⁴Como curiosidade, esta frase estava afixada num cartaz na sala de aula de eletrónica do 8.º ano, no ano lectivo de 1985/86.

⁵A investigação conduzida por Hofstein [8] incide sobre laboratórios de ciências, nomeadamente de Química. No entanto, as conclusões podem ser adaptadas ao caso particular dos laboratórios de Electrónica.

desenvolver este tipo de ensino. Em Portugal, sabe-se que vivemos tempos de incerteza relativamente a todas estas condições e situações.)

- Os professores precisam de formas de descobrir o que os seus alunos estão a pensar e a aprender no laboratório de ciências e na sala de aula.

(Precisam de fazer uma avaliação formativa, cujo objectivo não é atribuir classificações/dar notas aos alunos, mas determinar o que aprenderam e como chegaram lá, o que não aprenderam e por que é que isso aconteceu. Assim, poderão encontrar estratégias/recursos para ajudar os seus alunos a ultrapassar os obstáculos que vão surgindo ao longo do processo.)

No âmbito da sua investigação, Hofstein reúne diversas reflexões relevantes sobre o papel do laboratório no ensino das ciências. Entre os contributos destacados, merece particular atenção a afirmação de Bybee (2000), citado por [8] segundo a qual “Se usado correctamente, o laboratório tem o potencial de ser um meio importante para introduzir os alunos nos conhecimentos e competências conceptuais e processuais centrais da ciência.”. Este é um ponto particularmente relevante, uma vez que a investigação tem demonstrado que as experiências práticas em laboratório desempenham um papel central - ou mesmo *O* papel central - na educação científica, como referido por Hofstein e Lunetta (2004), citados em [9]. Esta importância deve-se, em grande medida, ao impacto significativo que essas actividades têm nos resultados da aprendizagem e no desempenho dos estudantes, bem como à sua eficácia na preparação para a futura actividade profissional, como referem Basey et al. (2008), também citados em [9].

Em Portugal, o estudo da Electrónica no ensino secundário é, em grande parte, desenvolvido através do ensino profissional. Este tipo de ensino não só permite que os alunos ingressem no ensino superior com conhecimentos e competências laboratoriais adequadas, como também lhes proporciona as ferramentas necessárias para enfrentarem, com maior preparação, as exigências do mercado de trabalho [63]. É evidente, contudo, que esta premissa só se concretiza mediante um ensino eficaz e, subsequentemente, uma aprendizagem efectiva baseada na utilização activa dos laboratórios.

Ao longo de uma carreira com mais de 20 anos como professor de electrónica, leccionando a turmas do 10.^º ao 12.^º ano, têm sido utilizadas diversas ferramentas digitais como complemento das práticas laboratoriais, nomeadamente os já referidos *Multisim* [23] (tanto em versão *online* como *stand-alone*) e o *Falstad* [24].

No entanto, devido a dificuldades de várias ordens - nomeadamente de natureza económica - que as escolas têm enfrentado ao longo dos anos, gerando constrangimentos materiais significativos, tornou-se necessário desenvolver a pesquisa e a utilização de novas ferramentas digitais, ou, se assim lhes quisermos chamar, laboratórios virtuais e/ou simuladores. Estas limitações, aliadas ao surgimento da

pandemia da COVID-19 e à consequente transformação das aulas presenciais em aulas virtuais, intensificaram ainda mais a necessidade de procurar novas soluções digitais, para além das já referidas nos parágrafos anteriores.

É, pois, inquestionável a importância das práticas laboratoriais nas ciências - ou no caso particular desta dissertação - nas aulas práticas de Electrónica, tanto no Ensino Secundário como no Ensino Superior. A tentativa de mitigar as dificuldades já referidas neste capítulo levam à procura de soluções alternativas. Vários estudos sugerem que os laboratórios virtuais e remotos surgem como duas soluções que podem ajudar a ultrapassar a falta de laboratórios reais ou a falta de recursos nos laboratórios reais [64, 65, 66, 67].

2.3.1 Tipos de laboratórios

No contexto educativo e científico, existem diversos tipos de laboratórios, cada um atendendo a diferentes necessidades e objectivos. Os laboratórios são espaços cruciais para a educação, pesquisa e inovação, proporcionando ambientes onde teorias podem ser testadas e conceitos podem ser explorados de maneira prática [68]. Os principais tipos incluem laboratórios físicos tradicionais, laboratórios virtuais e laboratórios remotos.

Os laboratórios físicos, virtuais e remotos oferecem diferentes vantagens e propõem diversos desafios, sendo frequentemente utilizados de maneira complementar. Os laboratórios físicos tradicionais proporcionam uma experiência prática essencial, permitindo a manipulação directa dos materiais e equipamentos. Os laboratórios virtuais oferecem uma alternativa segura e económica, ideal para a simulação e modelagem de conceitos complexos. Já os laboratórios remotos combinam os benefícios dos dois, permitindo o controle de equipamentos reais à distância e facilitando a colaboração global. Sendo assim, cada tipo de laboratório desempenha um papel crucial na educação e na investigação e a escolha entre eles depende das necessidades específicas da disciplina, dos recursos disponíveis e dos objectivos pedagógicos. A integração desses diferentes tipos de laboratórios pode proporcionar uma experiência de aprendizagem rica e diversificada, preparando melhor os alunos para os desafios do mundo real e do ambiente académico [9, 64, 68].

Importa, nesta fase, apresentar uma classificação geral dos laboratórios - ainda que esta não seja consensual. De facto, não existe uma normalização padrão amplamente aceite quanto à forma como estes conceitos são definidos. Como exemplo desta falta de uniformidade, uma possível forma de classificar os laboratórios encontra-se representada na Figura 2.3. Segundo Heradio *et al.* (2016) [66], os laboratórios podem ser divididos consoante a sua localização: locais ou remotos.

Representando de uma outra forma:

- Acesso local

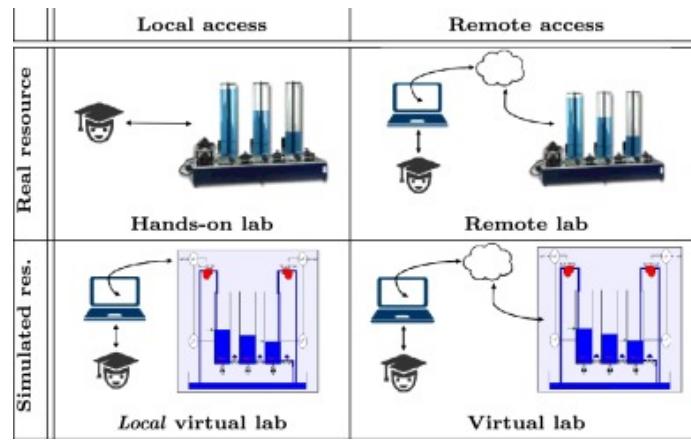


Figura 2.3: Tipos de laboratórios consoante a localização, Heradio *et al.* (2016) [66]

- Laboratório real: laboratório físico tradicional, onde os alunos podem realizar experiências práticas com equipamentos reais (amplamente utilizado em contexto de sala de aula de Electrónica);
- Laboratório virtual local: um ambiente digital que simula um laboratório físico, permitindo aos alunos realizar experiências de forma virtual (durante a pandemia, os alunos utilizaram o *multisim* instalado no computador para simular os circuitos);
- Acesso remoto
 - Laboratório remoto: um laboratório físico real que pode ser controlado à distância, permitindo aos alunos realizar experiências práticas sem estarem fisicamente presentes (nunca utilizado em contexto de sala de aula de Electrónica);
 - Laboratório virtual: um ambiente digital que simula um laboratório físico, permitindo aos alunos realizar experiências de forma virtual, independentemente da sua localização (utilizado, também, durante a pandemia, mas na versão *online* do *multisim*).

Também Zutin *et al.* (2010) [69], citados por Zapata-Rivera e Larrondo (2017) [70], classificam os laboratórios de forma idêntica, tal como representado na Figura 2.4.

Estas duas representações, no entanto, têm algumas diferenças ao nível da nomenclatura, sendo que os autores da segunda representação, introduzem os conceitos de *Hybrid Laboratories* e *Hybrid Online Laboratories*, tradução livre para laboratórios híbridos e laboratórios híbridos *online*, respectivamente. Estes tipos de laboratórios são criados através da combinação de laboratórios físicos e/ou laboratórios *online*/remotos [70]. Mais uma vez, não é propósito desta dissertação um estudo

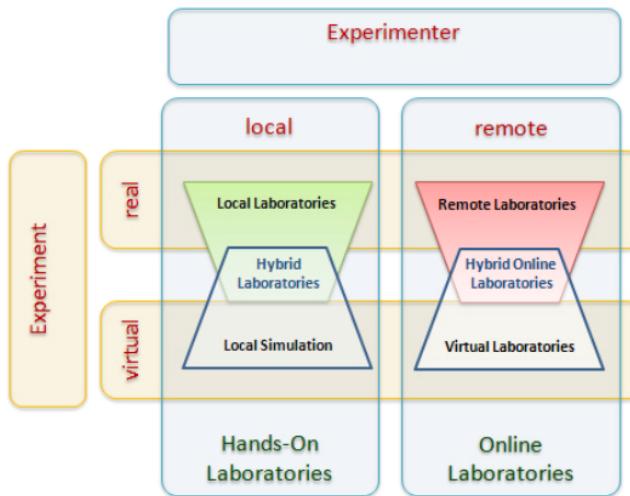


Figura 2.4: Tipos de laboratórios consoante a localização, segundo Zutin, et al. [69]

aprofundado destes conceitos. No entanto, apresentam-se dois casos de configurações híbridas, utilizadas com mais frequência em contexto de sala de aula:

- Acesso a um laboratório real (no local) com acesso a um simulador local virtual (configuração realizada com bastante frequência em contexto de sala de aula, onde os alunos testam os circuitos no *multisim* instalado no computador, antes de o testarem na placa branca);
- Acesso a um laboratório real (no local) com acesso a um laboratório virtual remoto (configuração usada e idêntica à anterior, com a diferença que o acesso ao laboratório virtual é feito através do *multisim online*).

As configurações híbridas *online* nunca foram utilizadas, uma vez que envolvem o acesso a laboratórios remotos, que como já foi referido, nunca foram utilizados em contexto de sala de aula de Electrónica.

Uma questão de conceitos

Como foi referido na nota⁵, o estudo de Hofstein incide sobre os laboratórios de ciências. Sendo certo que as suas conclusões podem ser adaptadas ao contexto dos laboratórios no ensino da Electrónica, importa, daqui em diante, clarificar e distinguir os conceitos de “laboratório virtual” e “simulador” (válidos tanto para versões *online* como locais), uma vez que estas duas definições tendem a sobrepor-se na maioria dos casos. Parte da literatura, trabalhos de investigação e fontes *online* utilizam já o termo “laboratório virtual” [9, 56, 71], dado que a montagem nesses sistemas é concebida de forma a reproduzir, visual e funcionalmente, um ambiente laboratorial real. No entanto, o objectivo subjacente continua a ser simular o comportamento

de sistemas físicos ou electrónicos. Se se tomar como referência a representação da Figura 2.3, apresentada por Heradio et al. (2016) [66], os laboratórios virtuais - quer sejam locais, quer *online* - são considerados simuladores, uma vez que permitem simular o comportamento de sistemas físicos ou electrónicos, baseados em modelos matemáticos. No entanto, o inverso nem sempre é válido.

Apresentam-se de seguida três exemplos de tipos de laboratórios virtuais e simuladores (frequentemente utilizados em contexto de sala de aula), que ilustram a distinção entre o que se considera laboratório virtual e simulador, de acordo com a definição anteriormente enunciada. O Tinkercad [72], representado na Figura 2.5a, é um simulador com características de laboratório virtual, uma vez que a representação dos componentes e a disposição do circuito se aproximam da realidade física de um laboratório tradicional. Por sua vez, o *Multisim* [23], tanto na sua versão *online* como na aplicação instalada no computador, representado na Figura 2.5b, é um simulador, dado que a montagem dos circuitos é puramente esquemática, sem qualquer preocupação em replicar a aparência ou o contexto físico de uma montagem real.

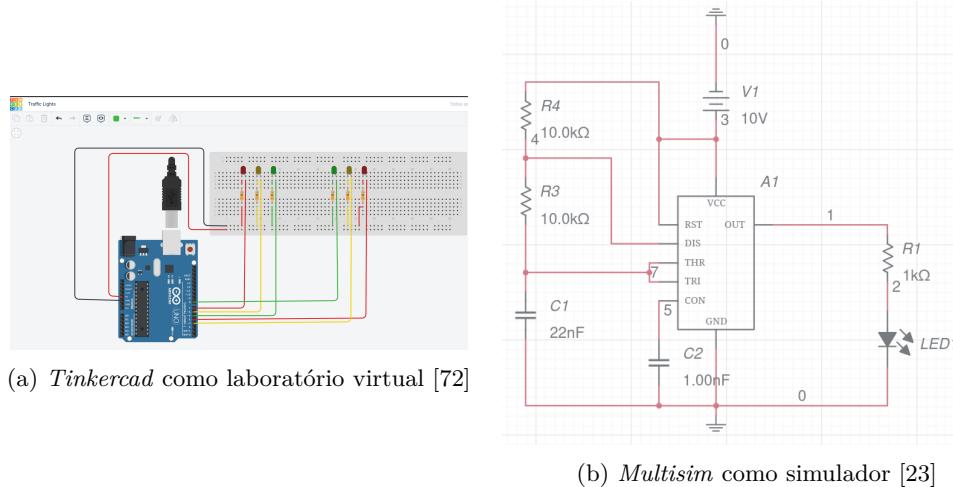


Figura 2.5: Laboratório virtual *vs* simulador

O *Falstad* [24], representado como exemplo na Figura 2.6, é outro dos simuladores *online* amplamente utilizados em contexto de sala de aula. Ao contrário do *Multisim*, que permite ao utilizador construir circuitos a partir de componentes e esquemas eléctricos, o *Falstad* simula o comportamento de circuitos electrónicos com base em esquemas previamente desenhados e estruturados, frequentemente recorrendo a uma *interface* mais simplificada e visualmente acessível. Este simulador é particularmente útil para introduzir conceitos fundamentais de electrónica e teoria de circuitos, permitindo a visualização dinâmica de tensões, correntes e cargas, o que o torna uma ferramenta valiosa no ensino da Electrónica.

Tal como foi referido anteriormente, não há um consenso na forma como são

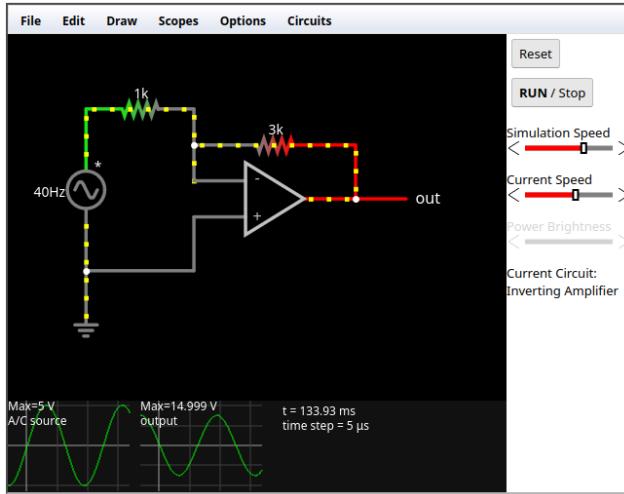


Figura 2.6: Simulador *Falstad* (Exemplo) [24]

denominadas estas ferramentas. Faiña (2022) [73], refere-se ao *Tinkercad* como sendo um simulador: “Existem vários simuladores destinados a estudantes de electrónica, como o *TinkerCAD*”. No mesmo trabalho de investigação e refereindo-se ao *Frizing* [74], escreve: “O simulador apresentado neste artigo é implementado no *Frizing* (...)” [73]. Já Knörig *et al.* (2009), no seu artigo *“Fritzing: a tool for advancing electronic prototyping for designers”* [75], referem que “(...) decidiu permitir ao utilizador documentar o seu protótipo de trabalho baseado numa placa de ensaio com uma metáfora visual que imita a situação do utilizador no mundo real.”. Além disso, “(...) um laboratório virtual pode ser definido como um ambiente no qual as experiências são conduzidas ou controladas parcial ou totalmente através de operação, simulação e/ou animação por computador, quer localmente, quer remotamente através da Internet.”, tal como referido por Chan e Fok (2023), no seu artigo *“Evaluating learning experiences in virtual laboratory training through student perceptions”* [76]. Os laboratórios virtuais oferecem aos alunos um conjunto de oportunidades diferentes, não só como substituto, mas também como complemento dos laboratórios reais.

Assim sendo, e sem prejuízo para os assuntos abordados nesta dissertação, é seguro afirmar que, na ausência de uma uniformização dos critérios relativos às definições e conceitos, todos os laboratórios virtuais podem ser considerados simuladores - reforçando, mais uma vez, que o contrário nem sempre é válido. No contexto da electrónica, optar-se-á por apresentar os laboratórios virtuais como ambientes que procuram replicar visualmente os componentes e a disposição dos circuitos de acordo com a realidade física, ao passo que os simuladores serão entendidos como ferramentas cuja representação é puramente esquemática.

Apesar disso, autores como Heying, Kejie e Jiang (2010) [77], bem como Umenne e Hlalele (2020) [78], classificam o Multisim [23] como um laboratório virtual nos

respectivos trabalhos de investigação.

Uma vez clarificada a distinção entre laboratórios virtuais e simuladores, importa agora enquadrar estes conceitos numa perspectiva particular, considerando os diferentes tipos de laboratórios já utilizados no ensino da Electrónica. Cada uma destas tipologias apresenta características próprias, vantagens específicas e contextos de aplicação distintos, sendo particularmente relevantes no contexto do ensino da electrónica e da abordagem STEM.

Laboratório real

Neste tipo de laboratórios, os alunos têm à sua disposição os recursos, o equipamento e os materiais físicos necessários para realizar experiências, analisar dados, desenvolver competências de trabalho em equipa e cultivar o interesse pelas ciências. Estas competências revelam-se cruciais para muitas carreiras e profissões, especialmente nas áreas STEM. Além disso, os laboratórios podem ajudar a melhorar a compreensão dos alunos sobre o processo científico e a importância da investigação científica.

No caso específico do ensino secundário - e por experiência própria - uma das soluções encontradas para equipar e desenvolver os laboratórios passa pela aquisição de microcontroladores - como o Arduino ou ESP32 - ou o Raspberry Pi. Estes dispositivos, em conjunto com uma vasta gama de sensores disponíveis no mercado, são amplamente utilizados em ambientes educacionais e de investigação, permitindo a prototipagem rápida, a experimentação prática e a aprendizagem activa em disciplinas como a Electrónica. A principal vantagem prende-se com a relação custo-eficácia: os microcontroladores e os componentes associados a eles são relativamente acessíveis, o que os torna viáveis mesmo em instituições com orçamentos limitados. Acresce a existência de uma comunidade de suporte activa e extensa documentação, factores que facilitam significativamente a aprendizagem e a implementação de projectos por parte de estudantes e docentes. Com estes dispositivos, é possível desenvolver uma variedade quase ilimitada de experiências, desde simples medições de temperatura até projectos avançados de automação, controlo e robótica educativa. Em Portugal, esta vertente prática e experimental tem sido amplamente incentivada através de eventos e competições de robótica, que promovem o espírito inovador e empreendedor dos alunos, ao mesmo tempo que reforçam aprendizagens em contexto de sala de aula e de laboratório [79, 80, 81]. Entre as mais relevantes, destacam-se:

- *RoboParty*;
- Festival Nacional de Robótica;
- *Cansat*.

A eficácia do Arduino como ferramenta pedagógica tem sido amplamente documentada. Yoder (2015) [82], desenvolveu uma alternativa ao laboratório tradicional recorrendo ao Arduino: “(...) a plataforma Arduino estimulou o interesse e o envolvimento dos alunos desde o início. Vários alunos começaram a alargar os projectos para além dos requisitos na terceira semana de aulas.”. Graven, *et al* (2018), [83], citados por Plaza, *et al.* (2018), [84] destacam que “(...) No domínio da educação, o Arduino é também muito utilizado. Os estudantes de engenharia electrotécnica podem aceder a um laboratório compacto para trabalhar quando e onde quiserem.”. O mesmo autor refere ainda que “(...) Tal como foi demonstrado por muitas experiências e trabalhos, a robótica combinada com STEM constitui uma forma atractiva de transformar conceitos aborrecidos num processo de aprendizagem divertido.”. Também Marzoli *et al.* (2021), [85], no estudo intitulado “*Arduino: From Physics to Robotics*”, exploram vários pontos e questões, entre os quais se o Arduino pode melhorar a prática laboratorial no Ensino Secundário italiano e mudar as atitudes dos alunos em relação às disciplinas STEM. Os autores questionam “Como melhorar as práticas laboratoriais no ensino secundário, tendo em conta os orçamentos e as instalações limitadas disponíveis?”. As conclusões a que estes autores chegaram ajudam a revelar as potencialidades do Arduino em contexto laboratorial: “A interacção profícua entre professores com diferentes formações foi fundamental para a concepção de novas soluções e a exploração de novas aplicações.(...) Assim, o Arduino pode ser considerado como uma espécie de micro-laboratório (...)” [85].

As possibilidades oferecidas por estes dispositivos - nomeadamente o Arduino - em contexto de sala de aula e como parte integrante de um laboratório são vastas, permitindo a realização de uma grande diversidade de projectos inovadores. Esta flexibilidade torna-o uma ferramenta valiosa para a educação e para a investigação, ao facilitar a aprendizagem prática e o desenvolvimento de competências em electrónica e programação.

Laboratório virtual - Acesso local e/ou remoto

Um laboratório virtual é uma poderosa ferramenta que utiliza modelos matemáticos para emular dispositivos reais. Actualmente, os programas de simulação por computador são um padrão de desenvolvimento de produtos aceite pela indústria e amplamente utilizados no ensino [66, 67]. A principal diferença entre os dois tipos de acesso aos laboratórios virtuais reside na forma como o utilizador acede ao programa. O *Tinkercad* [72], representado como exemplo na Figura 2.5, é um dos laboratórios virtuais mais frequentemente utilizados em contexto de sala de aula. No entanto, está disponível apenas em versão online. Já o *Fritzing* [74], representado na Figura 2.7, embora com capacidades de simulação mais limitadas, centra-se na prototipagem e visualização de circuitos. Ao contrário do *Tinkercad*, só pode ser utilizado localmente, uma vez que não dispõe de versão *online*.

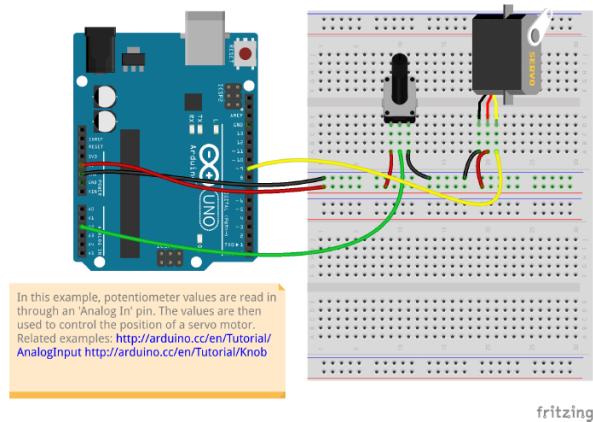


Figura 2.7: Laboratório virtual *Fritzing* exemplo

Um laboratório virtual relativamente recente, apresentado como exemplo na Figura 2.8, embora ainda pouco explorado, que pode constituir uma alternativa bastante interessante ao *Tinkercad*, é o *Wokwi* [86]. Este recurso permite simular diversas placas de desenvolvimento, como o Arduino, o ESP32, o *STM32*, o Raspberry Pi Pico, bem como uma vasta gama de sensores e actuadores [86].

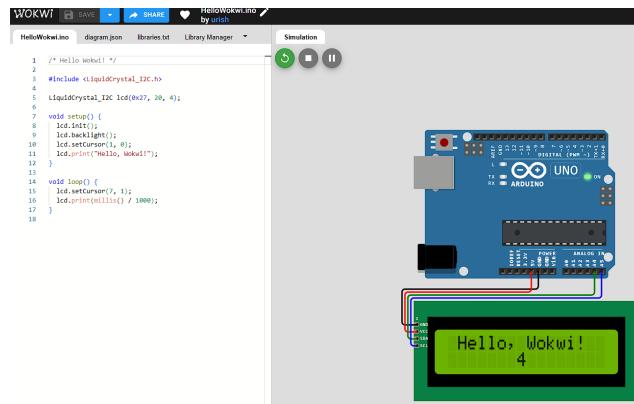


Figura 2.8: Laboratório virtual *Wokwi* exemplo

Os laboratórios virtuais permitem a verificação e o ensaio de circuitos analógicos e digitais complexos. No caso do Ensino Secundário, por exemplo, plataformas como o *Tinkercad* conseguem reproduzir componentes reais com um grau de precisão adequado a este nível de ensino. As faculdades e universidades de todo o mundo introduzem habitualmente este tipo de *software* de simulação nos seus cursos de engenharia. Uma vez que todos os circuitos são virtuais, os estudantes podem trabalhar e experimentar uma vasta gama de elementos sem o risco de danificar ou destruir equipamento físico. Estes laboratórios virtuais oferecem, assim, um conjunto de oportunidades pedagógicas relevantes, não apenas como substituto, mas também como complemento aos laboratórios reais [87].

No caso concreto de uma turma com vinte ou mais alunos, por exemplo, torna-se mais seguro, numa primeira fase, simular circuitos que envolvam componentes como o *TIP120*, o *L293D* ou um microcontrolador como o *Arduino*, utilizando plataformas como o *Tinkercad*. Esta abordagem permite aos alunos testar o funcionamento dos circuitos, identificar erros e compreender os princípios de controlo e potência em electrónica básica, antes de avançarem para a montagem física dos projectos. Para além de preservar recursos e reduzir o risco de danos em equipamento real, esta estratégia promove uma aprendizagem mais segura, progressiva e eficaz. Mas as vantagens dos laboratórios virtuais vão muito para além das descritas anteriormente [88, 89, 90, 91]. Estes laboratórios oferecem um ambiente seguro para a realização de experiências complexas e potencialmente perigosas, especialmente em fases introdutórias, reduzindo os riscos para estudantes e professores. Permitem ainda que os alunos progridam ao seu próprio ritmo e repitam as experiências tantas vezes quantas forem necessárias, uma vez que estão acessíveis em qualquer momento e a partir de qualquer lugar. Os laboratórios virtuais são, por natureza, mais económicos, de fácil instalação e manutenção. A estas vantagens acresce a vasta disponibilidade de informação, apoio técnico e tutoriais *online* que facilitam a sua integração no processo de ensino-aprendizagem.

No entanto, os laboratórios virtuais também apresentam algumas desvantagens. A principal prende-se com o desfasamento em relação à realidade. Retomando o exemplo anterior - a simulação de circuitos de potência -, o facto de não existirem consequências físicas reais pode induzir uma atitude de desresponsabilização ou falta de cuidado, levando o estudante a assumir que nada de grave poderá acontecer [67]. Acrescem ainda os constrangimentos relacionados com a constante evolução tecnológica dos sistemas que suportam o laboratório virtual, bem como a necessidade de uma ligação à Internet estável e de qualidade. Quando o laboratório virtual não é utilizado em contexto de sala de aula, tende a reduzir-se a interacção directa entre os alunos e entre estes e os professores, uma vez que a comunicação ocorre sobretudo em ambiente *online*. Além disso, exige-se do aluno um maior grau de autonomia e iniciativa. Há ainda vantagens que, em certos contextos, se podem transformar em desvantagens. Por exemplo, o facto de o aluno poder testar e simular sucessivas vezes sem penalização pode, a longo prazo, reduzir a sua sensibilidade e rigor no manuseamento de componentes reais. Da mesma forma, a imensa quantidade de informação disponível online exige do aluno uma capacidade de selecção crítica e filtragem informada [67, 91, 92, 93].

No caso de a versão ser remota, as vantagens são semelhantes às de trabalhar com qualquer programa na nuvem:

- Não há necessidade de instalar *software* adicional no computador (versão *online*);

- Desde que a velocidade da Internet seja estável, pode-se aceder ao simulador em qualquer lugar;
- Os circuitos são guardados e armazenados na nuvem;
- É ideal para trabalhos colaborativos e partilha de recursos.

Simuladores - Acesso local e/ou remoto

Já foi referido na Secção 2.3.1 que os simuladores são ferramentas que permitem simular o comportamento de sistemas físicos ou electrónicos, sem a necessidade de replicar visualmente os componentes e a disposição dos circuitos.

Um dos principais simuladores disponíveis gratuitamente, embora com algumas limitações funcionais, e utilizado regularmente em contexto de sala de aula, é o *Multisim Online* [23]. Durante os períodos de confinamento, este simulador revelou-se um verdadeiro “salva-vidas”. Existe também uma versão *premium*, que disponibiliza uma gama mais alargada de recursos *online*, bem como uma versão que pode ser instalada localmente no PC. O funcionamento destas duas versões é, na prática, idêntico, sendo que as diferenças se manifestam ao nível da interface gráfica e, sobretudo, na quantidade de recursos disponível, sendo que na versão local é obviamente muito mais extensa e completa, embora mais desactualizada (Para fins didácticos e educativos, revela-se extremamente eficaz.), como se pode ver na Figura 2.9a e Figura 2.9b.

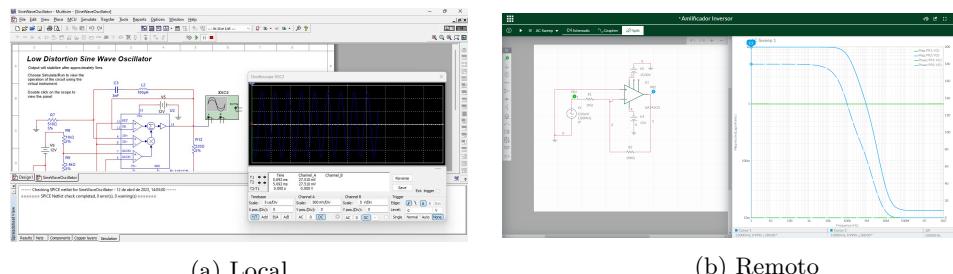


Figura 2.9: Simulador *Multisim*

Ainda assim, para os objectivos de estudo de circuitos simples, no âmbito do currículo do Ensino Secundário, qualquer das versões se revela adequada. Assim, sempre que for feita referência ao *Multisim* [23], considerar-se-á, salvo indicação em contrário, que a afirmação se aplica a ambas as versões, sem prejuízo da generalidade.

Este *software* integra a simulação virtual *Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis* (SPICE) padrão da indústria com um ambiente esquemático interactivo para visualizar e analisar instantaneamente o comportamento de circuitos electrónicos. É uma ferramenta poderosa, que utiliza modelos matemáticos para simular componentes reais, dispositivos ou circuitos com uma precisão muito boa, através de um navegador *web*. Fornece uma plataforma para “colmatar” a lacuna

entre a teoria dos manuais e os circuitos reais e também proporciona aos estudantes uma boa plataforma para experiências abrangentes e inovadoras [23]. Além disso, dispondo de poderosas funcionalidades de aprendizagem e integração de *hardware* de laboratório, o *Multisim* ensina aos alunos conceitos fundamentais de electrónica analógica, digital e de potência presentes em todo o currículo de engenharia e ciências [94].

Tomando novamente o exemplo de uma turma com vinte ou mais alunos, torna-se mais seguro simular circuitos de potência envolvendo componentes com TRIACs, DIACs ou SCRs. Além disso, a possibilidade de simular circuitos complexos, como amplificadores operacionais, circuitos digitais e sistemas de controlo, torna o *Multisim* uma ferramenta valiosa para a compreensão dos princípios fundamentais da electrónica. Citando Heying, Kejie e Li, (2010), “(...) podemos concluir que a criação de uma plataforma de simulação virtual através do *Multisim* num computador permite construir facilmente todo o tipo de circuitos. (...) Seguem-se os comentários de alguns alunos:”

- “O ensino experimental utilizando o *Multisim* é uma boa abordagem para me ajudar a compreender as matérias;”
- “Gostei de trabalhar na plataforma de simulação virtual *Multisim*;”
- “A simulação *Multisim* ajudou-me a compreender melhor as experiências.”

Os mesmos autores concluem que: “O laboratório virtual [*Multisim*] desempenha um papel muito importante na atualização do método de ensino experimental, na melhoria da qualidade do ensino dos cursos em circuito e na otimização do efeito do ensino.” [95].

Outro simulador, representado como exemplo na Figura 2.6, e amplamente utilizado em contexto de sala de aula, foi criado e desenvolvido por Paul Falstad em 1985, estando disponível em www.falstad.com [24]. Trata-se de um simulador livre e de código aberto [96], que funciona directamente num navegador *web* sob a forma de uma *Java Applet*. A sua importância advém, em grande parte, da facilidade de interacção e da simplicidade com que representa circuitos eléctricos — aspectos particularmente relevantes na produção de recursos multimédia nas áreas da Electrónica e da Electricidade⁶. Além disso, o simulador *Falstad* tem vindo a ser desenvolvido como uma aplicação de Internet há vários anos. De acordo com da Silva et al. (2011) [98], citados por *Falstad* (2024) [24], este simulador tem demonstrado versatilidade e aplicabilidade no ensino à distância.

O principal constrangimento prende-se com a ausência de parametrização avançada e de um modelo matemático robusto, o que faz com que este simulador não

⁶Para maior rigor, importa referir que este recurso não se limita aos circuitos electrónicos, estando igualmente ligado a outras áreas da ciência, como a termodinâmica, a mecânica quântica, o processamento de sinal, entre outras [97].

seja adequado para aplicações de engenharia profissional. No entanto, para fins didácticos e educativos, revela-se extremamente eficaz.

Por exemplo, como se pode observar na Figura 2.6, destacam-se as seguintes funcionalidades:

- Os pontos amarelos animados representam a corrente eléctrica, cujo movimento demonstra o fluxo de cargas em “tempo real”;
- A cor do fio varia entre verde e vermelho, consoante a direcção da corrente;
- Os componentes apresentam diferentes níveis de tensão;
- As formas de onda podem ser visualizadas directamente no circuito;
- É possível representar e controlar diferentes tipos de interruptores (por exemplo, para variar a frequência ou a tensão), o que permite ao utilizador observar fenómenos transitórios;
- A velocidade da simulação, bem como a intensidade da corrente, podem ser ajustadas.

Estas funcionalidades tornam o simulador *Falstad* uma ferramenta didáctica particularmente útil para introduzir conceitos fundamentais da electrónica, como corrente, tensão, formas de onda e comportamento dinâmico de circuitos. A sua *interface* visual e interactiva contribui para uma melhor compreensão dos fenómenos eléctricos, mesmo por parte de alunos com conhecimentos ainda iniciais. Embora limitado em termos de precisão e análise avançada, este simulador permite visualizar, de forma intuitiva e acessível, muitos dos princípios que são abordados nas aulas teóricas, servindo como uma excelente ponte entre a teoria e a prática, sobretudo em ambientes com recursos laboratoriais físicos reduzidos.

Laboratório remoto

Alguns dos constrangimentos associados aos laboratórios reais já foram abordados ao longo deste capítulo. Apesar do seu inegável valor pedagógico — sobretudo pela possibilidade de os alunos interagirem com recursos físicos e concretos — a sua implementação levanta vários desafios. No Ensino Secundário e Superior, garantir o acesso generalizado a estes recursos nem sempre é viável. Por um lado, há limitações financeiras significativas para manter laboratórios devidamente equipados; por outro, torna-se muitas vezes incompatível assegurar condições para que todos os alunos realizem experiências em simultâneo, especialmente em turmas numerosas. No Ensino Superior, em que os estudantes são, pelo menos teoricamente, mais autónomos do que no Ensino Secundário, o principal obstáculo prende-se com a disponibilidade dos laboratórios fora do horário das aulas presenciais.

Numa época em que a tecnologia é cada vez mais encarada como um facilitador no processo de ensino/aprendizagem, a utilização de laboratórios remotos é cada vez mais comum e generalizada [99]. Além disso, os laboratórios remotos apresentam algumas vantagens em relação aos laboratórios reais e mesmo aos simuladores, tais como: flexibilidade, acessibilidade, disponibilidade e segurança [99]. Estes tipos de laboratórios - que incluem, por exemplo, o VISIR ou o *LabsLand* [100] - permitem que professores/investigadores e alunos acedam a equipamentos e/ou computadores através da Internet para realizar experiências e tarefas laboratoriais sem estarem no espaço físico dos laboratórios [101].

Num laboratório remoto, a interacção tem lugar à distância com a ajuda da infraestrutura remota. Esta é uma nova camada que se situa entre o utilizador e o equipamento do laboratório. É responsável pela transmissão das acções do utilizador e pela recepção da informação sensorial do equipamento. Várias investigações mostram que os estudantes podem efetivamente aprender com a utilização de laboratórios remotos e também de laboratórios virtuais, obviamente se estiverem empenhados no que estão a estudar [99]. Se se aplicar os conceitos abordados na Secção 2.3.1, o VISIR pode ser considerado um laboratório remoto virtual, já que a interface gráfica tenta replicar, visual e funcionalmente, um ambiente laboratorial real, tal como representado na Figura 2.10.

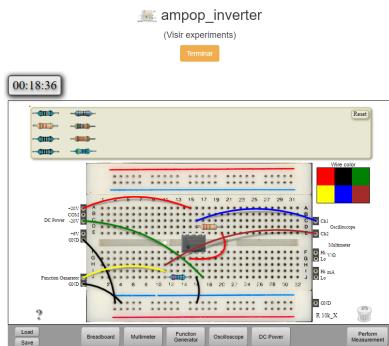


Figura 2.10: Exemplo VISIR

De acordo com Viegas *et al.* (2018) [64], que citam Brinson (2015) [9] e Corder *et al.* (2011) [11], os resultados obtidos com simuladores e laboratórios remotos podem ser considerados semelhantes - ou mesmo superiores - aos dos laboratórios práticos reais. No entanto, uma abordagem à aprendizagem laboratorial que utilize uma combinação de laboratórios práticos, simulações e procedimentos de laboratórios remotos parece ser a forma mais eficaz de aprendizagem, tirando partido dos benefícios dos três [9]. Esta mesma conclusão foi obtida por Mel e Samaranayaka (2017) [102], no estudo intitulado “*Extending the boundaries of remote laboratory by providing hands on experience*”. Citando os autores: “(...) os estudantes estão disponíveis a usar o laboratório remoto juntamente com o real (...)”, mas “(...) não

aconselham a total substituição (...)" . O estudo conclui, ainda, que não há grande diferença entre o laboratório real e remoto, sendo que os conhecimentos adquiridos são (praticamente) os mesmos.

Podem ser considerados outros estudos que, por exemplo, comparem laboratórios reais (práticos) e simulados, laboratórios reais e virtuais. De facto, Corter *et al.* (2007) [103], no seu estudo intitulado “*Constructing reality: A study of remote, hands-on, and simulated laboratories*” concluem que “(...) os laboratórios remotos e simulados podem ser pelo menos tão eficazes como os laboratórios práticos tradicionais no ensino de conceitos específicos da disciplina”. Outro estudo feito por Kocijancic e O’Sullivan (2004) [104], intitulado “*Real or virtual laboratories in science teaching - is this actually a dilemma?*”, conclui que “(...) não se trata de saber se é melhor utilizar experiências reais ou laboratórios virtuais no ensino das ciências, uma vez que ambas as abordagens, utilizadas de forma complementar, podem contribuir para uma aprendizagem activa mais eficaz.”. Tsihouridis *et al.* (2019), concluem também que “não há um vencedor final nesta controvérsia intemporal entre os dois ambientes de laboratório experimental, de acordo com a nossa investigação.” [105].

Ainda que os estudos apontem para a complementaridade entre laboratórios reais e remotos (virtuais e simuladores), é relevante compreender os factores que explicam o crescimento acentuado deste tipo de laboratórios em contextos de ensino. Segundo Nafalski *et al.* (2010) [106], com base em Auer e Gravier (2009) [107], este crescimento está relacionado com:

- A crescente complexidade das tarefas de engenharia;
- O equipamento cada vez mais especializado e dispendioso, as ferramentas de software e os simuladores necessários;
- A necessidade de utilizar equipamentos e ferramentas de *software*/simuladores dispendiosos em projectos com prazos curtos (como os apresentados em [101]);
- A aplicação de equipamentos de alta tecnologia necessários em pequenas e médias empresas;
- A necessidade de pessoal altamente qualificado para controlar os novos equipamentos;
- As exigências da globalização e da divisão do trabalho.

No entanto, segundo Fan *et al.* (2021) [62], a integração de laboratórios remotos com a Industry 4.0 - tema já abordado no Capítulo 1 - apresenta várias vantagens. Esta perspectiva é sustentada por vários autores citados no seu estudo, incluindo Tawfik *et al.* (2016) [99], Chen *et al.* (2010) [108] e Simão *et al.* (2014) [109], que identificam os seguintes benefícios:

- Os estudantes podem fazer os exercícios da disciplina ao seu próprio ritmo e de acordo com o seu nível de interesse;
- A quantidade de tempo (muitas vezes horas extraordinárias) que os professores têm de despender na preparação e ensino dos laboratórios pode ser reduzida;
- Podem ser efectuadas várias experiências utilizando a mesma configuração;
- Os laboratórios remotos permitem o acesso de um maior número de utilizadores, o que significa que a sua instalação acaba por ser mais barata do que a dos laboratórios físicos;
- Os laboratórios remotos estão acessíveis 24 horas por dia, 7 dias por semana;
- Os laboratórios remotos podem ajudar a reforçar o trabalho autónomo dos alunos;
- Os laboratórios remotos são mais seguros, tanto para o utilizador como para o equipamento ou software, uma vez que estão fisicamente separados e são orientados para a tecnologia.

Embora os laboratórios remotos ofereçam muitas vantagens, como as descritas acima, é importante estar ciente das suas desvantagens (muitas delas comuns com as descritas para os laboratórios virtuais). A falta de interacção física directa, a dependência da ligação com a Internet, os desafios técnicos e de manutenção, a experiência de aprendizagem menos imersiva e a limitação da interacção com colegas e professores são pontos críticos que devem ser considerados ao implementar esses laboratórios. No entanto, a principal desvantagem prende-se com a complexidade da sua implementação. Como os laboratórios remotos seguem uma arquitectura cliente-servidor, além do servidor é ainda necessário ter em conta a questão do *hardware* e a sua integração com o *software* que pode, ou não, ser proprietário. Há ainda a questão essencial da forma como os utilizadores acedem ao laboratório. Isto levanta problemas de largura de banda, que restringe o número de utilizadores que podem aceder simultaneamente ao laboratório remoto [66].

Existem muitos tipos de laboratórios nos mais diversos campos da ciência - como a Física, Electrónica, Robótica ou Química - e com distintas arquitecturas de *hardware* e *software*. Entre os laboratórios remotos atualmente em funcionamento, e que abrangem as áreas STEM, destacam-se os seguintes:

- Universidade de *Deusto*, em Bilbao - tem disponível uma conjunto de laboratórios remotos, que inclui o VISIR, o comando de um robô através de um Arduino ou a programação de uma *Field Programmable Gate Array* (FPGA);

- *iSES*⁷ - tem várias experiências remotas que abrangem diversas áreas da ciências, como Física, Electrónica, Radioactividade, Electromagnetismo, etc.
- *OpenSTEM*⁸ - estes laboratórios têm uma colecção de experiências abrangendo áreas científicas que vão desde a saúde, engenharia ou observatórios;
- *Remote-LAB GymKT*⁹ - tem várias experiências que vão desde o controlo de um braço robótico através de um Arduino até experiências no campo da Física e da Electrónica.

Em síntese, os laboratórios remotos não devem ser vistos apenas como uma versão reduzida dos laboratórios reais (práticos), mas como uma abordagem distinta, com pontos fortes e limitações próprias, que oferece oportunidades de aprendizagem únicas, não proporcionadas pelas metodologias tradicionais. Quando integrados de forma complementar com laboratórios físicos e simulações, permitem explorar o melhor de cada abordagem. Com base nos estudos apresentados nos parágrafos anteriores, pode afirmar-se com segurança que os laboratórios remotos constituem uma alternativa viável - e, em muitos casos, vantajosa - face aos laboratórios convencionais, sobretudo pela sua maior acessibilidade e pela redução de custos operacionais. Os resultados de aprendizagem não parecem ser significativamente afectados pela sua utilização. De facto, algumas universidades já começaram a integrá-los nas suas sessões práticas [110].

VISIR - Virtual Instrument Systems in Reality

No contexto desta dissertação, importa, no entanto, abordar o caso particular do VISIR. De facto, este laboratório remoto esteve na génese da criação do LaRE e encontra-se actualmente disponível no ISEP, conforme ilustrado na Figura 2.11.



Figura 2.11: VISIR no ISEP

O VISIR é um laboratório remoto para concepção, ligação e medição de circuitos electrónicos. O sistema VISIR foi desenvolvido no *Blekinge Institute of Technology*

⁷<https://www.ises.info/index.php/en/systemises/sdkisesstudio>

⁸<https://learn5.open.ac.uk/>

⁹<http://remote-lab.fyzika.net/>

(BTH), *Karlskrona*, Suécia, em 1999, e as suas funcionalidades e comunidade de utilizadores têm vindo a crescer desde então [99]. O projecto foi lançado no final de 2006 em conjunto com a NI, nos EUA, (como fornecedor de instrumentos) e a *Axiom EduTECH*, na Suécia, (como fornecedor de educação, *software* técnico e serviços de engenharia para análise de ruído e vibrações). Foi apoiado financeiramente pela BTH e pela Agência Governamental Sueca para os Sistemas de Inovação (VIN-NOVA) [111]. Este sistema oferece aos estudantes a oportunidade de utilizarem recursos experimentais 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem um aumento significativo no custo por estudante. Com mais tempo dedicado a estas experiências, os estudantes tornam-se verdadeiros "experimentadores", capazes de criar bens e serviços que satisfaçam os requisitos de uma sociedade sustentável. Desta forma, o VISIR não só melhora a aprendizagem, como também contribui para a formação de profissionais comprometidos com o desenvolvimento sustentável [112].

Em 2018, tal como referido no artigo “*PILAR: a Federation of VISIR Remote Laboratory Systems for Educational Open Activities*” [113], o VISIR já tinha sido implementado em 8 Instituições de Ensino Superior diferentes, situadas em 6 países, incluindo o ISEP (Portugal). No mesmo ano, segundo a mesma publicação, foram instalados novos sistemas em várias instituições da América do Sul. O *software* do VISIR é lançado sob uma licença GNU GPL. O conceito subjacente a este consiste em acrescentar uma opção de operação remota aos laboratórios de ensino tradicionais para os tornar mais acessíveis, independentemente de os alunos estarem no *campus* ou principalmente fora do *campus* [114].

A arquitectura, do VISIR pode ser dividida em quatro partes, tal como referido em [115] e como se pode ver na Figura 2.12a:

- *Equipment Server* - Compreende todo o equipamento do VISIR (módulos e *chassis*): as placas *PCI eXtensions for Instrumentation* (PXI) e instrumentação (que estão ligadas à matriz de relés) controlados através do LabVIEW;
- *Measurement Server* - Trata-se de um servidor escrito em Visual C++ para a *Microsoft*. É programado por ficheiros “max list”, que contêm os valores máximos dos componentes e ajustes dos instrumentos para cada experiência e servem para evitar a concepção de circuitos perigosos e proteger os instrumentos;
- *Web Server* - Aloja a *interface Web* do VISIR e foi concebida em *Apache* com uma base de dados em *MySQL*;
- *Web Interface*, Figura 2.12b - É o *site* do VISIR e foi escrito em PHP, com o cliente de experiências integrado escrito em *Flash*.

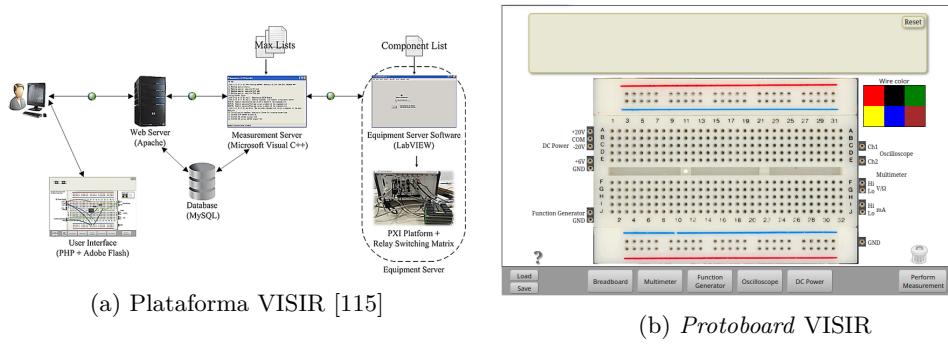


Figura 2.12: Arquitectura do VISIR

O *chassis* PXI-1033 [116], Figura 2.13, é um controlador integrado com 5 *slots* que foi concebida para aplicações de controlo remoto. Naturalmente, este dispositivo exige uma *interface* para PC, que, neste caso, é feita através do LabVIEW.



Figura 2.13: Chassis PXI-1033 [116]

Existem várias possibilidades de integração de módulos na PXI-1033, nomeadamente os que compõem o sistema VISIR. Estes módulos podem variar consoante a configuração pretendida, estando disponíveis diversas opções adicionais no site oficial da National Instruments¹⁰. No caso do VISIR, os módulos utilizados são os seguintes:

- Osciloscópio, PXI-5114, 12 MHz, 250 MS/s, 8-Bit, Figura 2.14
- Gerador de sinal, PXI-5402, 10 MHz *Bandwidth*, 1-*Channel*, 14-Bit, Figura 2.15
- Multímetro Digital, 6^{1/2}Digitos, ±300 V, *Onboard* 1.8 MS/s Digitalizador isolado, suporte para medições de indutâncias e capacitâncias, Figura 2.16;
- Fonte de tensão programável, 3 canais, corrente de saída máxima de 1 A, gama de tensão de saída analógica: -20 V a 20 V, Figura 2.17.

O VISIR possuí uma Matriz de Comutação de Relés (MCR) concebida no BTH especialmente para o uso em experiências electrónicas em laboratórios remotos tal

¹⁰<https://www.ni.com/en-us>



Figura 2.14: Osciloscópio PXI-5114 [117]



Figura 2.15: Gerador de sinal PXI-5402 [118]



Figura 2.16: Multímetro Digital PXI-4072 [119]



Figura 2.17: Fonte de tensão PXI-4110 [120]

como ser visto na Figura 2.18. Esta matriz é constituída por quatro placas PC/104¹¹ (de baixo para cima): fontes de tensão, multímetro digital, osciloscópio e a placa de topo, que permite configurar os componentes. A matriz é controlada por uma *Programmable Interrupt Controller* (PIC), PIC18F4550 [121], montada na placa de alimentação (fontes de tensão) e comunica com um PC, via USB, e com os controladores das outras placas através das PICs, PIC16F767 [122], via *Inter-Integrated Circuit* (I^2C), montadas em cada placa [123].

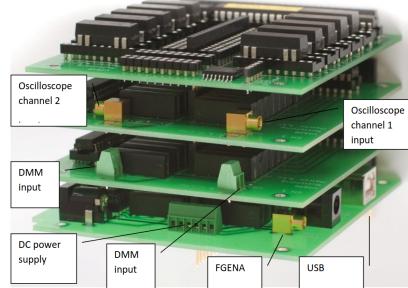


Figura 2.18: Matriz VISIR[123]

Segundo Tawfik et al. (2012) [115] e Tawfik et al. (2013) [124], seis universidades já tinham implementado o VISIR. No entanto, Pereira et al. (2017) referem que o VISIR estava presente em 12 instituições e sete países [125].

Levanta-se, então, uma questão: Como fazer a integração de todos os laboratórios remotos de forma a aproveitar os recursos e potenciar o trabalho colaborativo?

PILAR O projecto *Platform Integration of Laboratories based on the Architecture of visiR* (PILAR) Erasmus+, foi iniciado em 2016 tendo terminado em 2019 e tinha como objectivos criar uma Federação de cinco nós VISIR existentes, partilhando experiências, capacidade e recursos entre as diversas instituições e permitir o acesso

¹¹<https://pc104.org/>

ao laboratório remoto VISIR, através do consórcio PILAR, a estudantes de outras instituições de ensino [126].

O VISIR *Special Interest Groups* (SIG) é organizado para pessoas interessadas em Engenharia *online* ou remota, especialmente na abertura de laboratórios universitários para acesso remoto 24/7. Este projecto foi lançado com o objectivo de divulgar métodos de abertura de laboratórios para acesso remoto, partilhar ideias, equipamento e material didáctico, bem como discutir o desenvolvimento da plataforma VISIR. Outro dos objectivos é a padronização de bancos de trabalho *online* localizados em universidades de todo o mundo, constituindo laboratórios de rede disponíveis para sessões de laboratório para estudantes dentro e fora do *campus* [127].

A missão da Federação VISIR é actualizar e alargar o VISIR SIG, integrando indivíduos e instituições. O objectivo é fornecer um sistema uniforme, em que os estudantes se possam registar e utilizar os laboratórios federados baseados no VISIR e os materiais de aprendizagem de diferentes instituições pertencentes à Federação. Através de um mecanismo comum partilhado, deverá ser possível aceder a cada experiência a partir de um único sistema de gestão da aprendizagem. Os principais objectivos da Federação são [128]:

- Expandir o SIG a instituições;
- Conectar todos os nós VISIR;
- Alargar a gama de aplicações;
- Melhorar a utilização do VISIR;
- Promover o laboratório remoto VISIR;
- Partilhar materiais de aprendizagem;
- Trocar experiências entre os detentores e utilizadores do VISIR.

Como se viu anteriormente, o VISIR funciona numa base de cliente-servidor, o que significa que, se um determinado servidor não estiver disponível, também o laboratório não estará. Neste caso, a Federação permite o redirecccionamento dos pedidos dos clientes para um outro nó VISIR que esteja disponível [129].

Capítulo 3

LaRE - Laboratório Remoto Expansível

“*Make your lives extraordinary*”

— Professor John Keating, *Dead Poets Society*

Neste capítulo descreve-se o processo que levou à criação do LaRE, a arquitectura de *hardware* e *software*, o motivo das escolhas e a implementação dos circuitos.

3.1 Contextualização

Como já foi referido na Secção 1.2 o principal objectivo desta dissertação passa pelo desenvolvimento de um LR para o ensino da electrónica, que visa colmatar (ou resolver) algumas das limitações que afectam o VISIR.

De acordo com a Secção 2.3.1, o *software* do VISIR foi disponibilizado sob licença GNU GPL. No entanto, o *software* de programação do *firmware* do controlador da matriz, fornecido com o próprio sistema, não é livre, o que significa que não pode ser modificado ou atualizado por terceiros. Acresce ainda que o equipamento associado aos módulos e placas de instrumentação é controlado através do LabVIEW, cujas licenças têm custos anuais que variam entre 523€ e 4300€, conforme a versão adquirida [130].

A criação do LR surge, assim, como resposta prática a estas limitações. Numa fase inicial do desenvolvimento, foram realizados testes preliminares de controlo de

relés utilizando um Arduino Mega, representado na Figura 3.1, em conjunto com um ambiente de programação simples implementado em LabVIEW.

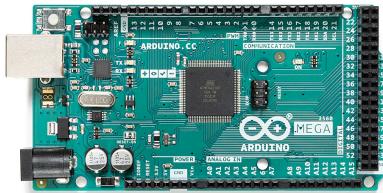


Figura 3.1: *Arduino* Mega [131]

No entanto, de forma a ultrapassar o problema levantado pelo elevado preço do LabVIEW, surge um segundo objectivo que se prende com a substituição deste *software* por outro que fosse gratuito e *open source*. A eliminação do LabVIEW implicou a implementação de um servidor. Sendo assim, numa primeira abordagem, foram analisadas algumas opções, tais como: *FastApi*¹, *Django*² e *Flask*³. Estas opções enquadram-se no que se pode chamar *frameworks* ou *micro-frameworks*. Neste caso são todas desenvolvidas para aplicação em Python.

Uma *micro-framework* é um tipo de *framework* minimalista, que fornece apenas as funcionalidades essenciais para o desenvolvimento de aplicações, sem incluir bibliotecas ou componentes adicionais que não os estritamente necessários. Isso permite a quem desenvolve adicionar apenas as funcionalidades específicas para cada projecto ou aplicação. Daqui resulta um ambiente de desenvolvimento mais leve e flexível [132]. Optou-se, então, pelo *Flask* e as razões da escolha, assim como uma explicação mais detalhada serão apresentadas na Secção 3.6.

É possível combinar o Arduino com o Python, mas isso implicaria uma mudança ao nível do *firmware*, uma tarefa que não é trivial [133]. A linguagem nativa do Arduino é similar ao *C++* e o *firmware* instalado foi projectado para interpretar e executar código escrito nesse tipo de linguagem. De forma mais rigorosa, o uso do *Python* no Arduino ou em qualquer outro microcontrolador, faz-se através de *MicroPython*, uma implementação simples e eficiente do Python que inclui um pequeno subconjunto da bibliotecas padrão e é optimizado para funcionar em microcontroladores e em ambientes limitados [134]. Quer isto dizer que todas as bibliotecas usadas na programação da aplicação ou projecto têm de ser carregadas para a memória dos microcontroladores. No caso do Arduino Mega, uma análise ao *datasheet* [135] revela que este tem 256 Kbytes reservados para o envio de programas e 8 Kbytes de memória *SRAM* reservado para variáveis temporárias. Para além das limitações de

¹<https://fastapi.tiangolo.com/>

²<https://www.djangoproject.com/>

³<https://flask.palletsprojects.com/en/3.0.x/>

memória, e tendo em conta que o Arduino necessita de funcionar como servidor, tornou-se necessário encontrar uma alternativa mais adequada, uma vez que a versão apresentada na Figura 3.1, baseada no Arduino Mega, não se revelou apropriada para esse fim.

No mercado, existe o ESP32, uma alternativa mais poderosa que o Arduino e com placa de rede sem fios integrada, tal como é apresentado na Figura 3.2. No entanto, este microcontrolador sofre dos mesmos problemas de memória que o Arduino Mega e da utilização do *MicroPython*. Uma análise ao *datasheet* [136] revela que a memória *flash* varia entre os 4-16 Megabyte. No modelo "ESP32-DEVKITC-32E", que estava disponível para este projecto, o valor é de 4 MB [137]. Estas limitações não permitem a implementação de um servidor minimamente robusto usando o Arduino Mega ou o ESP32.

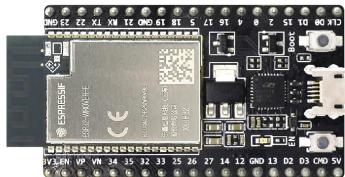


Figura 3.2: *ESP32* [138]

A opção seguinte recaiu no Raspberry Pi, versão 5⁴, que à data da escrita desta dissertação é a versão mais actual, apresentada na Figura 3.3.



Figura 3.3: *RaspberryPI5* [139]

Considerou-se, portanto, que seria uma mais-valia desenvolver um LR com as seguintes características:

- Python como linguagem principal;
- Raspberry Pi como servidor *Flask*;
- *Interface* com o utilizador desenvolvido em *HyperText Markup Language* (HTML).

⁴Doravante, sempre que for referido *Raspberry Pi*, subentende-se a versão 5.

Estava dado o último passo na escolha do *hardware* e do *software* que viriam a compor o LaRE.

3.2 Solução proposta

Os objectivos principais foram apresentados na Secção 1.2 e as características gerais do projecto descritas na Secção 3.1. Pretende-se que o LaRE seja um LR capaz de controlar e comandar um conjunto de experiências electrónicas, assim como efectuar medições de várias grandezas eléctricas. Para que a solução proposta seja completa e definitiva, é necessário definir os instrumentos de medida e os circuitos que compõem as experiências.

No contexto desta dissertação, o instrumento de medida adoptado foi o *Virtual-Bench* (VB), modelo VB-8012, que pode ser controlado de duas formas: através do *software* fornecido pela NI ou através do *pyVirtualBench*⁵ [140]. O *pyVirtualBench* é um Wrapper⁶ que permite controlar o VB através de uma aplicação Python [141]. No entanto, este Wrapper não é compatível com *Linux*.

Perante este facto, decidiu-se integrar um PC no LaRE - pormenores da instalação do *driver* no *site* da NI [140] - sendo que todo o peso computacional passaria para o PC e o Raspberry Pi controlaria os relés. Esta decisão justifica-se pela possibilidade de, no futuro, o *pyVirtualBench* vir a ser compatível com sistemas *Linux*.

A outra forma de controlar o VB é usando a aplicação disponibilizada pela NI e compatível com *Windows*. Esta aplicação faz uma apresentação integrada dos cinco instrumentos apresentados no VB, como pode ser visto na Figura 3.4. A aplicação também inclui funcionalidades de fluxo de trabalho, como a importação e exportação de configurações de instrumentos e a captura de dados. Importa salientar que o VB não pode ser controlado simultaneamente por ambas as *interfaces*.

As características do LR são as seguintes:

- Python como linguagem principal;
- PC como servidor *Flask*;
- Raspberry Pi como controlador dos relés;
- *Interface* com o utilizador desenvolvida em HTML.

Definidas - de uma forma geral - as soluções de *hardware* e *software*, agora com a integração de um PC - passou-se ao estudo da arquitectura do LaRE.

⁵ Apesar de não ser abordado no contexto desta dissertação, existe também a possibilidade de aceder ao VB através do LabVIEW.

⁶ Este Wrapper é um *software* de terceiros, suportado e mantido pela comunidade e não é directamente suportado pela NI.

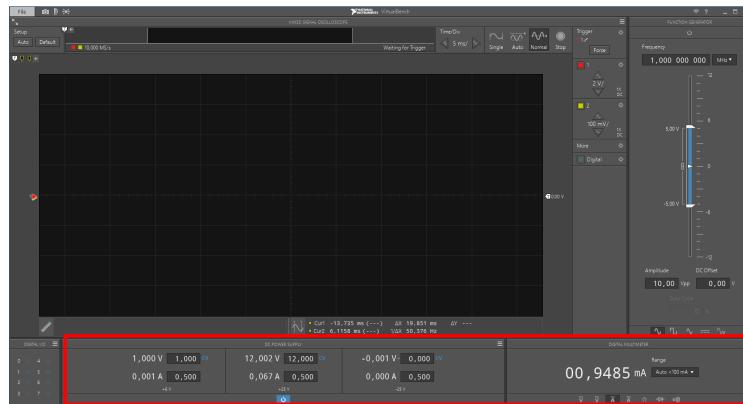


Figura 3.4: Exemplo do VB usado como multímetro digital

3.3 Arquitectura

Como já se viu na Secção 3.1, a arquitectura do LaRE proposta baseia-se numa estrutura cliente-servidor, suportada ao nível do *hardware* pelo VB, pelo Raspberry Pi e um PC como servidor. Uma representação geral do que será o LaRE pode ser vista na Figura 3.5.

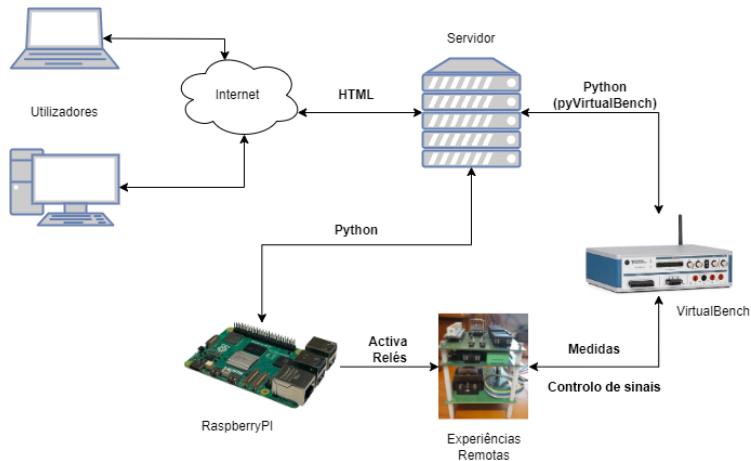


Figura 3.5: Arquitectura geral - LaRE

Antes de mais, importa clarificar as formas de comunicação entre os diversos dispositivos que compõem o LaRE. Tanto o servidor, como o Raspberry Pi e o VB têm disponíveis interfaces de rede sem fios e com fios, assim como *interfaces USB*. A comunicação entre os diversos dispositivos é feita da seguinte forma:

- **Servidor - Raspberry Pi:** comunicação via rede sem fios. Para maior flexibilidade e simplicidade de programação, a comunicação entre o servidor e o Raspberry Pi é feita através da rede sem fios, utilizando *sockets* que, através da sua API, facilitam a comunicação entre processos em rede, independentemente da infraestrutura utilizada - seja por ligação com fios, sem fios ou através de

redes locais, permitindo, assim, o envio e recepção de mensagens entre dispositivos ligados em rede [142]. O fluxograma de uma chamada ao *sockets* está representado na Figura 3.6;

- **Servidor - VB:** comunicação via rede sem fios ou USB. Entre estes dois dispositivos é, basicamente, indiferente a forma como é feita a comunicação. Isto porque esta parte é gerida pelos *drivers* da aplicação instalada no *Windows*, independentemente de se utilizar o *pyVirtualBench* ou a aplicação;
- **Controlo de relés e medidas:** O controlo dos relés é feito através da ligação directa do Raspberry Pi ao *driver* dos relés. Por sua vez, as leituras e medições das grandezas eléctricas são efectuadas pelo VB, ligado directamente aos pontos específicos do circuito.

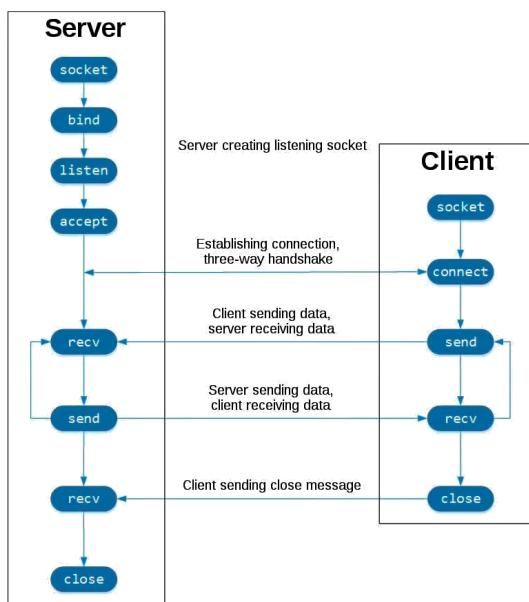


Figura 3.6: Fluxograma de uma chamada ao *socket* [142]

Ao nível do *software*, o servidor será implementado no PC com base no *Flask*, como já foi referido na Secção 3.1 e 3.2, e será descrito com mais pormenor na Secção 3.6. A comunicação entre o servidor e o VB, entre o servidor e o Raspberry Pi e o controlo dos relés é feita em *Python*. A *interface* com o utilizador é feita em *HTML*.

A Figura 3.7 apresenta com mais pormenor a solução implementada no LaRE. De uma forma geral, podemos ver como é realizada a comunicação e a troca de informação entre os diferentes dispositivos de *hardware*.

3.4 Circuitos experimentais

A escolha dos circuitos teve como base os que estão disponíveis no VISIR do ISEP e reduzindo os objectivos do LaRE à sua forma mais básica, pode afirmar-se que

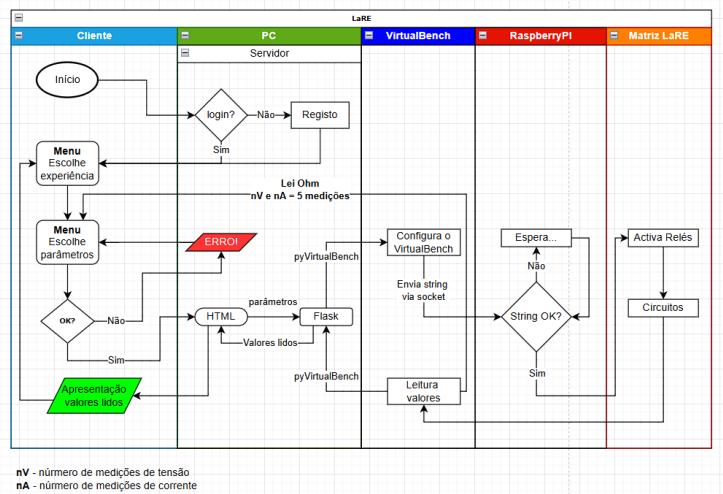


Figura 3.7: Arquitectura geral - LaRE

se pretende “provar um conceito”. Escolhendo experiências com circuitos integrados ou transístores, poderia tornar a implementação desnecessariamente mais complexa e, por conseguinte, com menos experiências. Portanto, o objectivo passará por criar um LR com experiências típicas para a introdução à electrónica e que permitam uma aprendizagem gradual em contexto de sala de aula. E, assim, “provar o conceito”.

Sendo assim, os circuitos que compõem o LaRE e satisfazem os critérios definidos em cima são:

- Lei de Ohm;
- Rectificador de meia onda;
- Rectificador de onda completa;
- Filtro RC passa-baixo;
- Filtro RC passa-alto.

Doravante, considera-se que cada experiência é composta por dois circuitos distintos, com excepção da experiência dedicada à Lei de *Ohm*. Por exemplo, a experiência sobre rectificação inclui os circuitos de meia onda e de onda completa; já a experiência dos filtros abrange os circuitos passa-baixo e passa-alto.

3.4.1 Lei de *Ohm*

Na forma da Equação 3.1, a Lei de *Ohm* estabelece que a resistência eléctrica (R) de um condutor é determinada pelo quociente entre a tensão eléctrica (U) aplicada aos seus terminais e a corrente eléctrica (I) que o atravessa.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

Isto significa que a Equação 3.1 define uma relação linear entre a tensão e a corrente para uma determinada resistência de valor fixo, o que implica que o gráfico obtido, representado na Figura 3.8, é uma linha recta que passa pela origem. O declive dessa recta representa o valor da resistência eléctrica (R). A Lei de *Ohm* é descrita com maior detalhe no Capítulo 2 da 10.^a edição de Hayt *et al.* [143].

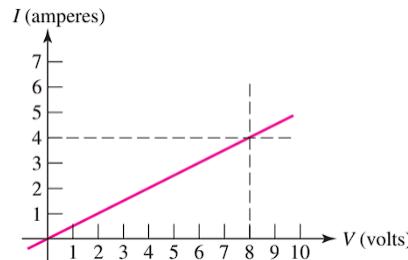


Figura 3.8: Gráfico da Lei de *Ohm*[143]

Da forma como foi implementado, há duas possibilidades de realizar este estudo, exemplificadas nas Figuras 3.9a e 3.9b. O tutor ou professor, poderá optar por apresentar o conceito de duas formas distintas, mas em ambos os casos são efectuadas cinco medições, construído o respectivo gráfico e calculado o valor do declive da recta analiticamente. A diferença está na forma como se confrontam os resultados práticos. No entanto, no contexto desta dissertação foi implementado o caso descrito na Figura 3.9a⁷.

LaRE
LABORATÓRIO REMOTO EXPANSÍVEL

Menu Principal

Lei de Ohm

Rectificador de meia onda

Rectificador de onda completa

Filtro Passa-Alto

Escolha uma das três resistências

Clique **OK** para iniciar as medições, **STOP** para interromper

OK **STOP/RESET**

Seleccionar Vcc. ▾
 Seleccionar R. ▾
 1
 2
 3
 4
 5

Seleccionar Vcc. ▾
 Seleccionar R. ▾
 1.1
 1.5

(a) Opção 1

Escolha uma das três resistências

Clique **OK** para iniciar as medições, **STOP** para interromper

OK **STOP/RESET**

Seleccionar Vcc. ▾
 Seleccionar R. ▾
 Ra
 Rb
 Rc

Seleccionar Vcc. ▾
 Seleccionar R. ▾
 1
 2
 3
 4
 5

Figura 3.9: Experiência Lei de *Ohm*

No caso em que a resistência é dada, o declive pode ser calculado e confrontado com as soluções e, no caso em que é desconhecida, o declive da recta é calculado e a partir deste resultado infere-se o valor da resistência.

⁷Como trabalho futuro, o menu poderia ser desenvolvido para o utilizador - aluno ou professor - escolher a opção pretendida.

3.4.2 Rectificadores

Nas experiências dos rectificadores pretende-se estudar e avaliar a diferença entre os dois tipos de rectificação, consoante as quatro combinações possíveis dos pares resistência/condensador e a influência que têm na variação da tensão de *ripple*. No caso da rectificação de meia onda, é ainda possível variar a frequência entre os 50 Hz e 2000 Hz mas no caso da rectificação de onda completa, a frequência é fixa ao valor da rede eléctrica - 50 Hz.

A Figura 3.10 apresenta o diagrama de blocos simplificado do processo de rectificação, que pode ser usado, por exemplo, para o projecto duma fonte de alimentação em contexto de sala de aula. Este é composto por quatro blocos principais:

- Bloco 1 - Transformador: reduz a tensão proveniente da rede eléctrica para valores mais baixos e adequada ao nível de tensão alternada que se deseja;
- Bloco 2 - Rectificação: realiza a conversão da tensão alternada CA em tensão contínua unidirecional, ainda com ondulação;
- Bloco 3 - Filtragem: suaviza a forma de onda, reduzindo a componente alternada (*ripple*);
- Bloco 4 - Estabilização: regula e estabiliza a tensão de saída, garantindo um valor contínuo e constante.

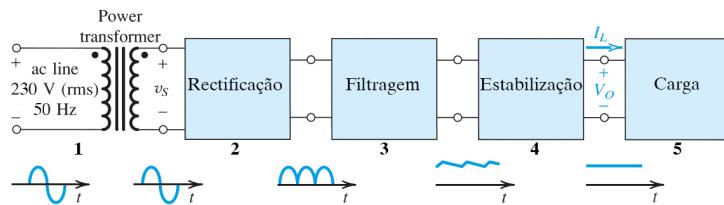


Figura 3.10: Diagrama de blocos da rectificação [144]

A tensão de *ripple* é uma componente variável no tempo que surge à saída do Bloco 3 - Filtragem - devendo esta ser minimizada para estabilizar a tensão de saída em corrente contínua - Bloco 4 - tal como ilustrado na Figura 3.10. As Figuras 3.11a e 3.11b representam, com mais pormenor, a forma de onda à saída do Bloco 3, quando é utilizada a rectificação de meia onda, considerando um diodo ideal. Estes circuitos e a respectiva fundamentação teórica são descritos com maior detalhe no Capítulo 4 da 8.^a edição de Sedra *et al.* [144], de onde foram adaptados.

A tensão de *ripple* pode ser calculada através da Equação 3.2:

$$U_r = U_P \left(1 - e^{-\frac{T}{RC}}\right) \quad (3.2)$$

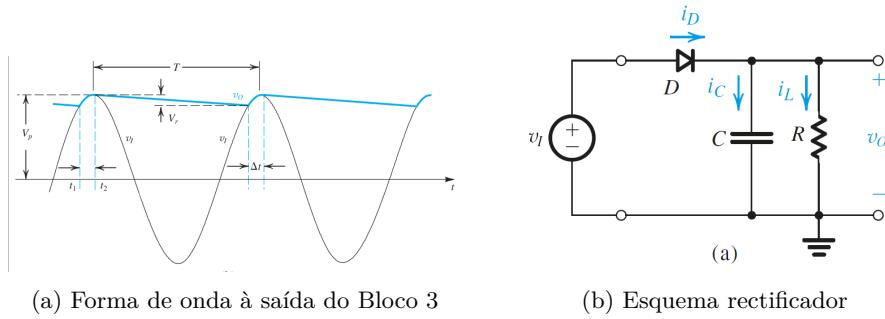


Figura 3.11: Rectificação meia onda [144]

Observa-se, a partir da Equação 3.2, que, quando a constante de tempo $RC \gg T$, o cálculo da tensão de *ripple* pode ser reduzido à Equação 3.3.

$$U_r = \frac{U_P}{fRC} \quad (3.3)$$

Neste caso, a tensão de *ripple* é baixa e v_o , ou seja, a tensão à saída do filtro é praticamente constante e dada pela Equação 3.4:

$$u_o = U_P - \frac{1}{2}U_r \quad (3.4)$$

No entanto, pode tornar-se este circuito mais eficiente, se se usar a rectificação de onda completa. A Figura 3.12a e a Figura 3.12b representam a forma de onda e o esquema, tal como descritos com maior detalhe no Capítulo 4 da 8.^a edição de Sedra *et al.* [144], de onde foram também adaptados. Note-se que, neste tipo de rectificação, a frequência da tensão de *ripple* é o dobro da frequência da onda de entrada.

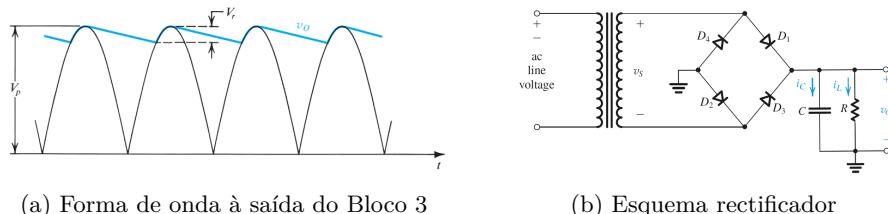


Figura 3.12: Rectificação onda completa [144]

Sendo assim, o valor da tensão de *ripple*, neste caso, será dado pela Equação 3.5:

$$U_r = \frac{U_P}{2fRC} \quad (3.5)$$

São estas formas de onda, representadas pelas Figuras 3.11a e 3.12a, que se pretendem estudar e avaliar, assim como os valores dados pelas Equações 3.3 e 3.5. (A Equação 3.2 deve ser usada quando os valores dos condensadores e resistências são pequenos ou frequência é baixa, isto é, quando o *ripple* não é desprezável.)

3.4.3 Filtros

Representados na Figura 3.13 estão os filtros simplificados, lecionados em contexto de sala de aula no Ensino Secundário. Estes circuitos são descritos com maior detalhe no Capítulo 17 da 8.^a edição de Sedra *et al.* [144], de onde foram adaptados.

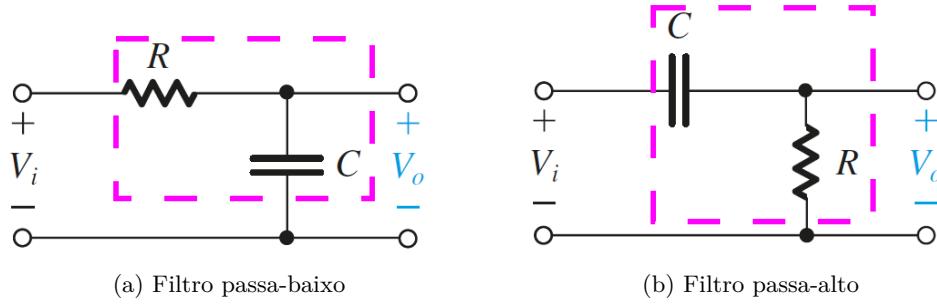


Figura 3.13: Esquemas dos filtros [144]

A possibilidade de variar a frequência do sinal de entrada permite que estas experiências sejam utilizadas para estudar a resposta em frequência dos filtros, analisar o Diagrama de *Bode*, determinar a frequência de corte dada pela Equação 3.6 e ainda relacionar, por exemplo, o valor da tensão de entrada com a tensão de saída.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.6)$$

As Figuras 3.14a e 3.14b apresentam os Diagramas de *Bode* [ideais], que servem de referência para o estudo desta experiência.

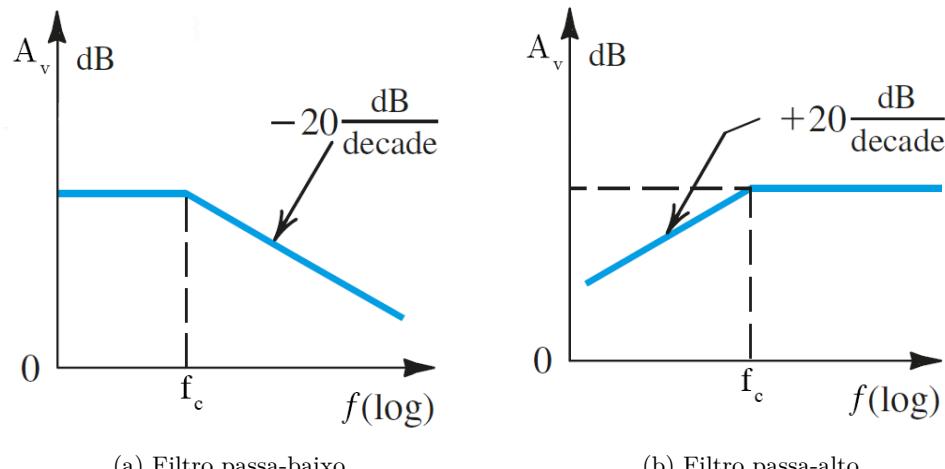


Figura 3.14: Diagramas de *Bode* [ideal] [144]

Para além da análise em frequência, um outro aspecto complementar a considerar é a relação entre as ondas de entrada e saída, em função da frequência. Nos filtros, o intervalo de frequências permitido é igual ao já referido para os rectificadores: entre 50 Hz a 80 000 Hz.

A frequência de corte de um filtro é definida como o ponto onde o ganho do filtro sofre uma atenuação de 3 dB em relação ao seu valor máximo. Para um filtro passa-baixo (passa-alto) ideal, o ganho em baixas (altas) frequências é unitário. Quando o sinal atinge a frequência de corte, a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada reduz-se para:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \quad (3.7)$$

... ou na escala logarítmica:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = 20 \log_{10}(0.707) \approx -3 \text{ dB} \quad (3.8)$$

Assim, a frequência de corte de um filtro corresponde ao ponto em que a amplitude do sinal de saída é aproximadamente 70.7% da amplitude do sinal de entrada, o que corresponde a -3 dB.

3.5 Hardware

3.5.1 VirtualBench

Este dispositivo desenvolvido pela NI integra vários instrumentos e ferramentas de teste, tais como um osciloscópio digital com análise de protocolo, um gerador de formas de onda, um multímetro digital, uma fonte de alimentação Corrente Contínua (CC) programável e E/S digitais num único dispositivo que se liga a um PC, via USB ou rede sem fios, como se pode ver na Figura 3.15. As principais características deste modelo estão descritas na Figura 3.16 [145]. A forma como pode ser controlado e configurado já foi abordada na Secção 3.2.



Figura 3.15: Painel traseiro *VirtualBench* VB-8012 [145].

3.5.2 Matriz LaRE

Definidas as soluções de *hardware* e *software*, bem como as experiências a implementar, iniciou-se o projecto da matriz. Tal como anteriormente, e tendo o VISIR como referência, decidiu-se desenvolver uma matriz cujas placas respeitem as dimensões definidas pelo consórcio PC/104 [146], que estabelece um padrão caracterizado pelo seu formato compacto e modular.

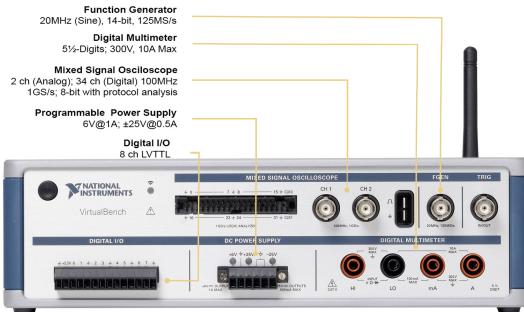


Figura 3.16: Painel frontal *VirtualBench* VB-8012 [145].

Os esquemas finais das experiências encontram-se no Anexo A, onde se pode verificar que o número de relés necessários varia entre 8 — no caso da Lei de *Ohm* — e 13 — nos casos dos rectificadores e dos filtros. Sendo assim, com o objectivo de facilitar a implementação, os testes, a detecção de erros e, mais tarde, a manutenção, optou-se por dividir o LaRE em três placas. O desenho dos esquemas e dos *Printed Circuit Board* (PCB) foi elaborado com recurso ao KiCad. A Figura 3.17 apresenta uma visão geral da matriz do LaRE.

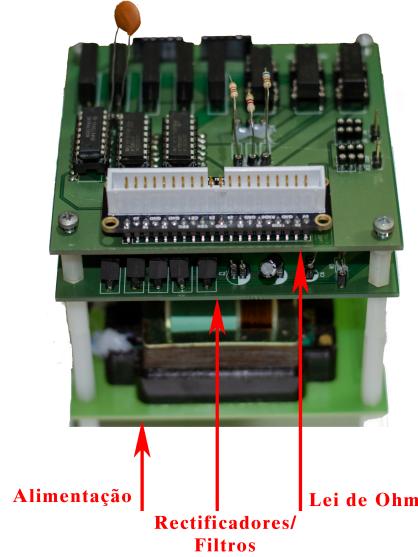


Figura 3.17: Matriz do LaRE

Lei de *Ohm*

A placa desenvolvida para esta experiência está representada na Figura 3.18:

1. Ligação ao Raspberry Pi através de um conector *Insulation Displacement Connector* (IDC) de 40 pinos (1);
2. Relés (2);

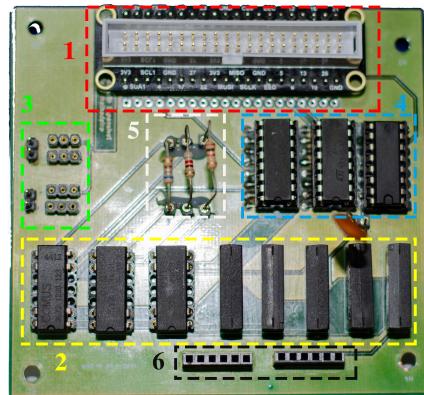


Figura 3.18: [Placa] Lei de *Ohm*

3. Ligações aos aparelhos de medida (3);
4. *Drivers* de relés e registo de deslocamento (4);
5. Resistências em estudo (5);
6. Ligação à placa seguinte através de conectores “Arduino stackable” (6).

Rectificadores/Filtros

A Figura 3.19 apresenta a placa da experiência referente aos rectificadores/filtros:

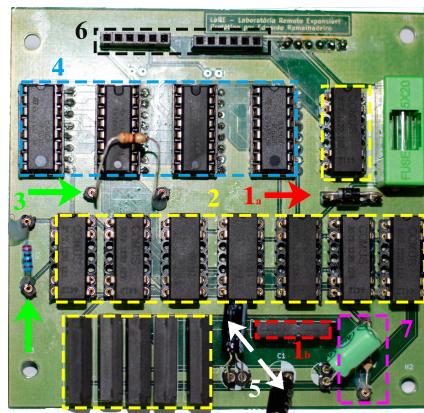


Figura 3.19: [Placa] rectificadores e filtros

1. Rectificação;
 - (a) Díodo rectificador - meia onda (1_a) e Ponte rectificadora - onda completa (1_b);
2. Relés (2);
3. Resistências - [componentes comuns a ambas as experiências](3);

4. Drivers de relés e registo de deslocamento (4);
5. Condensadores [componentes comuns a ambas as experiências](5);
6. Ligação à placa seguinte através de conectores “Arduino stackable” (6);
7. Resistência e condensador exclusivo dos filtros (7).

Fontes de alimentação

A placa referente às fontes de alimentação está representada na Figura 3.20. É constituída por um transformador de 230 V/8 VCA, uma ponte rectificadora que realiza a rectificação de onda completa e uma fonte de 5 V, regulada com o *LM317*[147]. O esquema completo encontra-se disponível no Anexo A.



Figura 3.20: [Placa] fontes de alimentação

3.5.3 Raspberry Pi

Como já foi referido na Secção 3.1, a ideia inicial passava por utilizar o Raspberry Pi como servidor e como controlador dos relés, no fundo desempenhando as funções de RLMS. Este dispositivo insere-se numa gama de pequenos computadores de placa única SBC, acessíveis e versáteis, como o *Banana Pi*, *BeagleBone Black*, *Orange Pi* ou *Odroid*, amplamente utilizados em ensino, prototipagem e aplicações de IoT.

Em contexto de laboratório estavam disponíveis os modelos PI2 e PI3, algo desactualizados. O PI3 já se mostrou lento nos primeiros testes e, por isso, optou-se pela última versão do Raspberry Pi, que à data da escrita deste documento é a 5. Esta versão traz várias melhorias e novos recursos, sendo que as principais diferenças de *hardware* para a versão 4B estão representadas na Tabela 3.1. No entanto, estas melhorias acarretam um maior consumo de energia e, por isso, é recomendado o uso de arrefecimento activo [148]. Na Figura 3.21 está representado o Raspberry Pi usado no LaRE.

Comum às versões anteriores, o Raspberry Pi possui um conector de 40 pinos denominados *General Purpose Input/Output* (GPIO)s, como se pode ver na Figura 3.22. Os GPIOs são pinos versáteis e configuráveis e permitem que a placa



Figura 3.21: *Raspberry PI5* com dissipador activo utilizado no LaRE

Tabela 3.1: *Raspberry PI4 vs Raspberry PI5 - principais diferenças*
[149]

| Raspberry PI4 | Raspberry PI5 |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.8 GHz | 2.4 GHz |
| VideoCore VI @ 500 MHz, Vulkan 1.0 | VideoCore VII @ 800 MHz, Vulkan 1.2 |
| LPDDR4-3200 SDRAM até 8 GB | LPDDR4X-4267 SDRAM 4 GB/8 GHz |
| 5 V/3 A via USB-C (15 W) | 5 V/5 A via USB-C (27 W) |

interaja com uma variedade de componentes electrónicos e outros dispositivos, como por exemplo, relés, sensores, motores, etc.. Os GPIOs são pinos digitais, isto é, o Raspberry Pi não possui um *Analog-to-Digital Converter* (ADC) interno para ler sinais analógicos. No entanto, pode usar-se um ADC externo, como por exemplo, o MCP3008 ou o módulo ADS1115. Quer isto dizer que só trabalham com duas tensões: 3.3 V ou 0 V, correspondendo aos valores lógicos “1” ou “0”, respectivamente. Dependendo da configuração dos GPIOs - entrada ou saída - estes podem ler ou fornecer as tensões correspondentes aos níveis lógicos desejados.

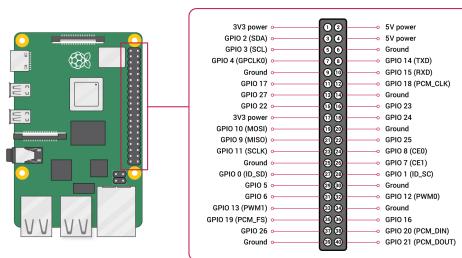


Figura 3.22: *GPIOs RaspberryPI* [148]

A corrente no Raspberry Pi pode ser configurada para valores entre 2 mA e 16 mA (em intervalos de 2 mA) por cada GPIO. No entanto, quando vários GPIOs são utilizados em simultâneo, o valor total combinado da corrente não deve exceder os 50 mA. Se for fornecida uma tensão superior a 3.3 V aos GPIOs, o Raspberry Pi corre

o risco de se danificar irremediavelmente. [148]. Na Figura 3.23 está representada uma forma alternativa de visualizar os GPIOs, mais intuitiva e que permite perceber melhor a função dos pinos. Representados a cor amarela estão os GPIOs que podem ser configurados como entrada ou saída; a vermelho, laranja e preto as alimentações de 5 V, 3.3 V e *ground*, respectivamente. Por fim, os GPIOs representados pela cor branca, GPIO0 e GPIO1, correspondentes aos pinos físicos 27 e 28, respectivamente, estão reservados para utilização avançada, nomeadamente, a comunicação I^2C com a EEPROM de identificação presente em HATs compatíveis. Esta EEPROM permite a configuração automática do sistema aquando do arranque.

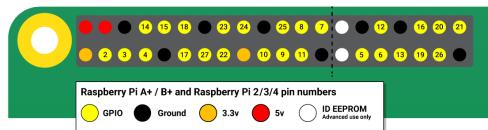


Figura 3.23: Representação alternativa dos GPIOs [148]

3.5.4 Relés

Como já foi referido na Capítulo 2, os circuitos que compõem o VISIR são controlados através de relés. Estes dispositivos funcionam como interruptores electromecânicos simples que utilizam um sinal eléctrico para controlar um eletroíman. Os relés electromecânicos são constituídos por uma bobine e um contacto, que pode ser normalmente aberto ou fechado. A corrente eléctrica ao passar pela bobine gera um campo magnético que atrai o contacto, fechando-o ou abrindo-o, conforme o caso. A Figura 3.24 mostra um esquema simplificado de um relé electromecânico, onde se pode observar a inclusão do diodo de “roda livre”, comum em muitos circuitos de comando com relés. Este diodo é utilizado para proteger o circuito de comando de picos de tensão induzidos pela bobine do relé, quando a corrente é desligada, segundo a Lei de Faraday. O diodo permite que a corrente induzida pela bobine circule em circuito fechado, evitando danos nos componentes de comando.

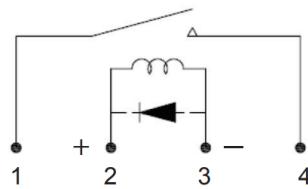


Figura 3.24: Esquema simplificado de um relé [150]

Os relés utilizados no LaRE estavam disponíveis em contexto laboratorial e são em tudo idênticos aos que se encontram instalados no VISIR do ISEP. Foram usados

dois tipos de relés: simples (*Single Pole Single Throw* (SPST)) e duplos (*Double Pole Single Throw* (DPST)), como ilustrado na Figura 3.25. Ambos os modelos são da marca *Comus* - o relé SPST, ref. 3570-1331-123 e o relé DPST, ref. 3572-1220-123. As características principais encontram-se descritas no Anexo A e as completas nos respectivos *datasheet* [150].

Nos códigos de referência dos relés, os dois primeiros quartetos indicam a série, enquanto os três dígitos indicam a tensão nominal da bobine e a presença, ou não, do diodo de “roda livre”. No caso dos modelos utilizados, esta tensão é de 12 V e o diodo está ligado entre os pinos 2(+) e 6(-) [150]. Sempre que possível, tentou-se utilizar os relés SPST no comando das fontes e aparelhos de medida e os relés DPST no controlo dos componentes. Serão devidamente referidos os casos em que isso não foi possível, por indisponibilidade dos componentes.

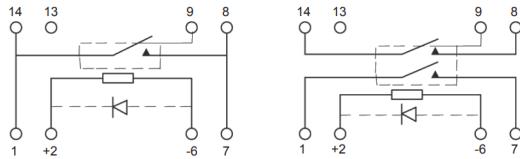


Figura 3.25: Relés SPST e DPST [150]

Como já foi referido na Secção 3.5.3, a tensão de funcionamento dos GPIOs, quer estejam configurados como entrada ou saída, é de 3.3 V, sendo que a máxima corrente por cada GPIO é de 16 mA. Com estes valores, o Raspberry Pi não tem capacidade para comandar os relés, já que funcionam a 12 V. Para activar os relés, é necessário o uso de *drivers*⁸ que consigam fornecer a tensão e corrente necessárias para o efeito.

3.5.5 Driver de Relés

O circuito integrado ULN2003A, é um *driver* muito usado para controlar relés. Além disso estava disponível em contexto laboratorial. Tipicamente, é usado em conjunto com microcontroladores ou Raspberry Pi⁹ no comando de cargas indutivas, como motores, bobinas e relés. Estes *drivers* possuem sete pares de transístores NPN, em configuração *Darlington*, que apresentam saídas de alta tensão com diodos *clamp* de cátodo comum para comutação de cargas indutivas [151], como se representa esquematicamente na Figura 3.26.

⁸Doravante, sempre que for referido o termo *driver* no contexto de relés, subentende-se o circuito integrado *ULN2003A*.

⁹Importa distinguir entre SBCs, como o Raspberry Pi e microcontroladores, como o Arduino. Enquanto os SBCs funcionam como computadores completos capazes de executar sistemas operativos e aplicações complexas, os microcontroladores são dispositivos mais simples, ideais para tarefas de controlo directo, operando sem sistema operativo e com recursos significativamente mais limitados.

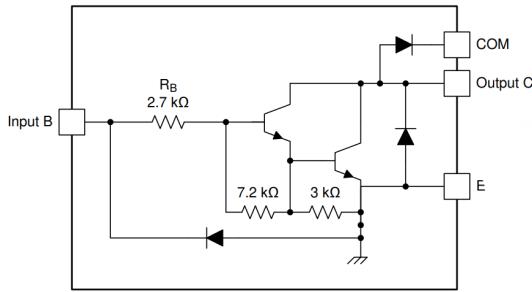


Figura 3.26: Diagrama de blocos ULN2003A [151]

A corrente de colector de saída (única) é de 500 mA e a corrente de entrada, para uma tensão de entrada de 3.85 V, é 0.93 mA [151].

Pela análise dos esquemas, representados no Anexo A e já referenciado na Secção 3.5.2, verifica-se que os GPIOs disponíveis no Raspberry Pi - 26 no total - não são suficientes para comandar os relés do LaRE. Ao todo são utilizados 21 relés, o que corresponderia a 21 saídas, faltando adicionar 10 GPIOs necessários para o controlo da transmissão das *strings* de *bits*. Sendo assim, houve a necessidade de criar uma solução que permitisse comandar os relés, já que o Raspberry Pi não possui GPIOs suficientes.

3.5.6 Registo de deslocamento

O uso de registos de deslocamento foi a solução encontrada de forma a ultrapassar o problema da falta de GPIOs. O *SN74HC595*¹⁰ é um circuito integrado comum e bastante utilizado que contém um registo de deslocamento de 8 *bits* com saídas 3-State, do tipo *Serial Input Parallel Output* (SIPO), que alimenta um registo de armazenamento do tipo D, também de 8 *bits* e com saídas paralelas 3-State. O sinal de relógio para o registo de deslocamento e armazenamento é independente. A potência consumida é muito baixa, assim como a corrente de entrada [152].

Descrição dos pinos de controlo:

- *Serial Input* (SER): é utilizado para enviar os *bits* para o registo de deslocamento, um *bit* de cada vez;
- *Shift Register Clock* (SRCLK): é o relógio do registo de deslocamento e é ativado no flanco ascendente, por cada impulso dado um *bit* é enviado para o registo de deslocamento;
- *Register Clock* (RCLK): é o relógio do registo de armazenamento e é activo no flanco ascendente. Quando activo, o conteúdo do registo de deslocamento

¹⁰Doravante, sempre que for referido registo de deslocamento, subentende-se o circuito integrado *SN74HC595*.

é transferido para o registo de armazenamento, que eventualmente aparece na saída;

- *Shift Register Clear* (SRCLR): permite fazer o *clear* ou *reset* ao registo de deslocamento. Isto equivale a colocar todos os *bits* a zero. Este pino é activo baixo.
- *Output Enable* (OE): pino activo baixo que controla o estado da saída do registo: Se a zero as saídas estão activas, se a um as saídas estão desactivadas

Como referido na Secção 3.5.2, a experiência da Lei de *Ohm* requer 8 relés, enquanto as experiências de rectificadores e filtros necessitam de 13. Cada relé é acionado por um *bit* de um registo de deslocamento, sendo que cada registo permite o controlo de até 8 relés. Assim, é necessário um registo para a experiência da Lei de *Ohm* e precisamos dois registos para as experiências de rectificação e filtragem. Deste modo, é enviada uma *string* de 8 ou 13 *bits*, conforme a experiência a controlar - os *bits* são enviados um-a-um, armazenados no registo e depois enviados para a saída. Dado que o número de *bits* varia entre experiências e estas se encontram distribuídas por duas placas distintas (conforme descrito na Secção 3.5.2), optou-se por utilizar pinos diferentes do Raspberry Pi para o envio das *strings*. No Anexo A, Figura 11 e Figura 12, estão definidos os pinos usados na configuração e envio das *strings*. A Figura 3.27 apresenta o diagrama de blocos do registo de deslocamento, enquanto a Tabela 3.2 descreve os seus modos de funcionamento. Como se pode observar, o controlo do envio de uma *string* de dados requer 5 pinos GPIO configurados como saídas. Deste modo, para comandar os relés das experiências distribuídas pelas duas placas, são necessários 10 pinos GPIO no total.

Importa notar que seria tecnicamente possível reduzir este número para apenas 6 pinos, utilizando os mesmos sinais de controlo para ambos os registos de deslocamento e activando-os seletivamente através da linha *OE* - *Output Enable* de cada registo. No entanto, dado que a implementação e os testes dos circuitos foram realizados de forma faseada, optou-se por manter conjuntos de pinos independentes para cada registo de deslocamento, facilitando a deteção e resolução de eventuais erros. As implicações ao nível do *software* de programação são mínimas e ao nível do *hardware* estão dentro dos limites de número de GPIOs do Raspberry Pi.

3.6 Software

O *software* do LaRE foi dividido em duas grandes partes: *Back-end* e *Front-end*.

Por *Back-end* entende-se toda a programação e os processos que correm em segundo plano w que sustentam o funcionamento do LaRE, incluindo o servidor, as

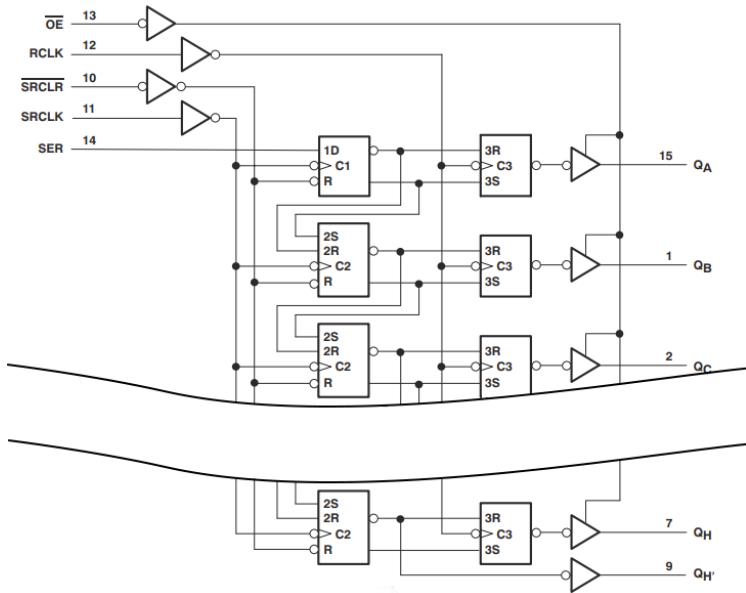


Figura 3.27: Diagrama [em corte] de blocos SN74HC595 [152]

Tabela 3.2: Modos de funcionamento do SN74HC595 [152]

| Entradas | | | | | Função |
|----------|-------|--------------------|------|-----------------|---|
| SER | SRCLK | \overline{SRCLR} | RCLK | \overline{OE} | |
| X | X | X | X | H | Saídas Q_A - Q_H estão desabilitadas. |
| X | X | X | X | L | Saídas Q_A - Q_H estão habilitadas. |
| X | X | L | X | X | Registo de deslocamento é limpo. |
| L | ↑ | H | X | X | Primeiro passo do registo de deslocamento vai a “0”. Passo seguinte armazena os dados do estado anterior, respectivamente. |
| H | ↑ | H | X | X | Primeiro passo do registo de deslocamento vai a “1”. Passo seguinte armazena os dados do estado anterior, respectivamente. |
| X | X | X | ↑ | X | Os dados do registo de deslocamento são armazenados no registo. |

APIs ou base de dados [153]. Existem diversas linguagens de programação, *frameworks* e ferramentas para gerir esta parte do sistema. Na implementação do LaRE, foi utilizada a linguagem *Python*, em conjunto com a *Framework Flask*.

O *Front-end*, por sua vez, gera a *interface* do *site*, ou seja, a camada com que o utilizador interage directamente. As linguagens utilizadas na sua implementação foram o HTML, *Cascading Style Sheets* (CSS) e JavaScript. Enquanto o HTML constitui a estrutura base da página, o CSS define o estilo visual dos elementos e o JavaScript permite a criação de comportamentos dinâmicos e interactivos [153].

De forma resumida, o desenvolvimento de *Front-end* corresponde ao lado do cliente (aspecto da página Web), enquanto o *Back-end* diz respeito ao lado do servidor (funcionamento da página Web).

3.6.1 Back-End

Python

O *Python* é uma linguagem poderosa e fácil de aprender. Possui estruturas de dados de alto nível eficientes e uma abordagem simples, mas eficaz à programação orientada para objectos [4]. Apresenta, também, uma série de vantagens que se enquadram nos objectivos do desenvolvimento e implementação do LaRE [154]:

- Curva suave de aprendizagem;
- Quantidade e variedade das bibliotecas;
- Portabilidade;
- Flexibilidade;
- Robustez;
- Suporte da comunidade.

Como desvantagens há a referir que, comparado com outras linguagens, o *Python* é mais lento em termos de execução, já que é um tipo de linguagem de alto-nível, pelo que não é adaptado para aplicações móveis e consome mais recursos [154] [155]. Ainda assim, segundo a *IEEE Spectrum* [156], a linguagem *Python* foi considerada a mais popular em 2023.

Flask

O *Flask* é uma *framework* leve e flexível para *Python* que segue a filosofia *UNIX* de “fazer uma coisa bem feita”. A escolha do *Flask* deveu-se, essencialmente, à facilidade de integração com o *Python*, sendo uma das *frameworks* mais populares em *Python* [132]. É uma *framework* de aplicações *Web Server Gateway Interface* (WSGI) que descreve a forma como um servidor *Web* comunica com aplicações *Web* e como essas aplicações podem ser encadeadas para processar um pedido [157]. Depende, ainda do *Jinja*, que é um motor de criação de modelos que permite escrever código semelhante à sintaxe do *Python*, de forma a renderizar o documento final [158].

Tal como foi referido na Secção 3.1, foram ainda analisadas várias opções, incluindo a *Django*, outra *framework* bastante popular. Em [159] e [160], por exemplo, é feita uma comparação exaustiva entre as duas *frameworks*, não havendo uma decisão final sobre qual a melhor, mas sim sobre qual a que melhor se adapta às necessidades de implementação e desenvolvimento dos projectos. No entanto, o *Flask* foi concebido para tornar a iniciação rápida e fácil, com a capacidade de evoluir até aplicações mais complexas, sendo mais adaptado a pequenos projectos.

Tendo em conta os argumentos anteriormente apresentados e a análise dos respetivos prós e contras, considerou-se que a linguagem de programação *Python*, em

conjugação com o *Flask* enquanto *framework* para desenvolvimento de aplicações web e APIs, constitui a solução que melhor se enquadra e adapta aos objectivos definidos para o LaRE.

Jinja2

O *Jinja2*¹¹ é um sistema de *templates* para aplicações *Web* escrito em *Python*, amplamente utilizado em conjunto com a *framework* *Flask*. O seu principal objetivo é permitir a separação entre a lógica da aplicação e a apresentação visual, promovendo um desenvolvimento mais organizado, modular e sustentável. Inspirado na sintaxe do próprio *Python*, o *Jinja* permite incorporar estruturas de controlo, como ciclos e condições, directamente nos ficheiros HTML através de marcação específica, facilitando a criação dinâmica de conteúdo [158]. Na Listagem 3.1 pode ver-se um exemplo de código *Jinja* incluído na página *base.html*.

```

1   <title>{% block title %}Home{% endblock %}</title>
2   {% if user.is_authenticated %}
3       <a class="nav-item nav-link" id="home" href="/">
4           Home </a>
5   {% else %}
6       <a class="nav-item nav-link" id="login" href="/
7           login">Login</a>
8   {% endif %}
9
10  {% with messages = get_flashed_messages(with_categories
11      =true) %}
12      {% for category, message in messages %}
13          {{ message }}
14      {% endfor %}
15  {% endwith %}

```

Listagem 3.1: Exemplo *Jinja* incluído na página *base.html*

O mecanismo de *renderização* disponibilizado pelo *Flask*, através da função *render_template()*, tira partido do *Jinja* para gerar páginas HTML com base em *templates* pré-definidos e dados fornecidos pela aplicação. Isto permite, por exemplo, apresentar resultados de medições, estado dos relés ou mensagens personalizadas, de forma automatizada e responsiva. O *Jinja2* permite gerar HTML dinâmico através da substituição de variáveis (`{{...}}`) e da execução de instruções lógicas (`% ... %`) no lado do servidor, antes de o conteúdo ser enviado ao navegador. Como resultado, o utilizador final visualiza apenas o HTML já processado, sem qualquer traço do

¹¹O nome *Jinja2* refere-se à versão actual do sistema de *templates* *Jinja*, resultante de uma reescrita significativa da sua versão original. Na documentação e na comunidade, é comum referir-se a este motor simplesmente como *Jinja* [158]. Assim, e sem perda de generalidade, será adoptada ao longo deste trabalho a designação *Jinja*.

código *Jinja*. Esta abordagem estabelece uma ligação simples e segura entre a lógica implementada em *Python* no *back-end* e a apresentação em *HTML* no *front-end* [158].

3.6.2 Front-End

Webpage

Como já foi referido na Secção 3.6, o *Front-end* diz respeito ao aspecto gráfico das páginas *Web* e pretende-se que a prioridade na construção da página seja a simplicidade. A escolha do desenvolvimento da página recaiu no *HTML*, no *CSS* e no *JavaScript*.

O *HTML* é a linguagem *standard*, usada para definir a estrutura do seu conteúdo e consiste numa série de elementos usados para delimitar ou agrupar diferentes partes do conteúdo. As *tags* ou etiquetas, podem transformar uma palavra ou imagem num *hyperlink*, pôr palavras em itálico, aumentar ou diminuir a fonte, etc. [161]

Existem 3 tipos de elementos [162]:

- **Normais:** são elementos que têm uma etiqueta de abertura e outra de fecho. Por exemplo, `<p></p>` define um parágrafo;
- **Texto:** são elementos que não têm uma etiqueta de fecho. Por exemplo, `<Title>` especifica o título da página em texto simples;
- **Vazios:** têm somente uma etiqueta de início na forma de `<tag>`. Por exemplo, a etiqueta `` referencia um ficheiro externo, neste caso uma imagem ou `
` que força uma quebra de linha.

Na Figura 3.28 está representada a estrutura de uma página *HTML*. É de referir que os navegadores não exibem as etiquetas *HTML*. O seu propósito é ler os documentos *HTML* e apresentá-los corretamente.

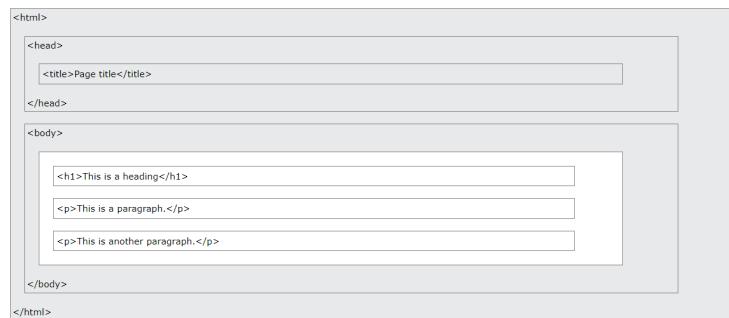


Figura 3.28: Estrutura de uma página *HTML* [161]

Segundo o consórcio W3C, as *CSS* são mecanismos fundamentais para a separação de preocupações no desenvolvimento *web*. Ao delegar a responsabilidade de

formatação visual no CSS, o HTML concentra-se na estrutura semântica do conteúdo. Isso resulta num código mais limpo, de fácil manutenção e acessível. As regras de estilo, que especificam como os elementos HTML devem ser apresentados, podem ser aplicadas a elementos individuais, classes ou *IDs*, permitindo um alto grau de customização. Além disso, o CSS oferece a possibilidade de criar hierarquias de estilos, onde os mais específicos sobrepõem aos mais gerais. As folhas de estilo podem ser inseridas directamente no documento HTML ou vinculadas a ele através de um arquivo externo, proporcionando maior organização e reutilização de estilos [163]. Um exemplo simples pode ser visto na Listagem 3.2.

```
1      <!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.01//EN">
2      <html>
3          <head>
4              <title>My first styled page</title>
5              <style type="text/css">
6                  body {
7                      color: purple;
8                      background-color: #d8da3d }
9                  </style>
10             </head>
11
12             <body>
13                 (...)
```

Listagem 3.2: Exemplo CSS incluído na página HTML [164]

As linhas 5 e 6 indicam que é uma folha de estilos escrita em CSS e que o estilo está aplicado ao elemento *body*. As linhas seguintes definem as cores do texto e fundo. No exemplo dado na Listagem 3.2, a folha de estilos está integrada directamente no ficheiro HTML. Mas à medida que a página cresce em complexidade, torna-se incomportável manter a folha de estilos no ficheiro (ou ficheiros) HTML. Para isso, cria-se a folha de estilos com a extensão *.css* e referencia-se este ficheiro em todas as páginas. Neste caso, o exemplo da página apresentado na Listagem 3.2 ficaria da forma apresentada na Listagem 3.3:

```

1      <!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.01//EN">
2      <html>
3          <head>
4              <title>My first styled page</title>
5              <link rel="stylesheet" href="meuestilo.css">
6          </head>
7
8          <body>
9              (...)
```

Listagem 3.3: Exemplo da página HTML com o CSS definida externamente [164]

Por sua vez, o ficheiro *meuestilo.css* da forma apresentada na Listagem 3.4:

```

1      body {
2          color: purple;
3          background-color: #d8da3d }
4      </style>
5      (...)
```

Listagem 3.4: Exemplo do CSS definido externamente [164]

As folhas de estilo CSS e as páginas HTML podem ser validadas para garantir que estão de acordo com os padrões definidos pelo consórcio W3C [165, 166]. Esta validação é importante para assegurar a compatibilidade entre navegadores e dispositivos, bem como para melhorar a acessibilidade e a experiência do utilizador.

Já o *JavaScript* é uma linguagem de programação orientada para objectos e utilizada principalmente para *scripts* dinâmicos do lado do cliente, permitindo que uma aplicação coloque elementos num formulário HTML e responda a eventos do utilizador, como cliques do rato, preenchimento de formulários e navegação na página. Também pode ser utilizada no lado do servidor, permitindo que uma aplicação comunique com uma base de dados, mantenha a continuidade das informações entre diferentes chamadas da aplicação ou manipule ficheiro no servidor. Isso significa que, no navegador, o *JavaScript* pode alterar a aparência da página e, da mesma forma, o *Node.js* - versão mais avançada do *JavaScript* no servidor - pode responder a solicitações personalizadas enviadas pelo código executado no navegador. Os programas escritos nesta linguagem são designados por *scripts* e podem ser inseridos directamente numa página HTML, sendo executados automaticamente aquando do seu carregamento. Por serem interpretados, estes scripts são escritos em texto simples e não requerem compilação prévia para serem executados. O *JavaScript* pode ser executado não apenas nos navegadores, mas também nos servidores, ou, basicamente, em qualquer dispositivo que tenha um *JavaScript Engine*, isto é, *software* específico que execute o código *JavaScript* [167]. Na Listagem 3.5 está representado

um exemplo de *JavaScript* que desabilita os seletores de um formulário quando o botão “OK” é clicado.

```
1 (...)  
2 <script>  
3 //Accionar a funcao habilitarSeletores quando o botao "OK"  
    for clicado  
4  
5 document  
6     .querySelector(".stop")  
7     .addEventListener("click", desabilitarSeletores);  
8 </script>  
9 (...)
```

Listagem 3.5: Exemplo de *JavaScript*

Estas linguagens - HTML, CSS e *JavaScript* - são interdependentes e frequentemente utilizadas em conjunto no desenvolvimento *web*, cada uma desempenhando um papel específico na construção e estilização de páginas *web* e na implementação de interatividade. Se o HTML define o conteúdo das páginas, o CSS define a sua aparência e o *JavaScript* define o comportamento [168].

Apesar de a arquitectura modular permitir a futura adição de novos módulos e experiências, a actual implementação abrange apenas um conjunto básico. A expansibilidade do sistema está assegurada, mas levanta questões de ordem *software* e/ou *hardware*. Tal como está concebido, a *string* de controlo utilizada para activar os relés varia consoante a experiência: no caso da Lei de *Ohm*, é composta por 8 *bits*; nas experiências de rectificação e filtragem, são necessários 13 *bits*, correspondendo ao número de relés a comandar. No LaRE, optou-se por utilizar um conjunto de cinco pinos de controlo dedicados por placa, como apresentado na Tabela 3.2.

Capítulo 4

Implementação

“Do or do not. There is no try.”

— Master Yoda, *Star Wars - The Empire Strikes Back*

Este capítulo aprofunda os aspectos técnicos do LaRE, tomando como referência a arquitetura apresentada na Figura 3.7. O desenvolvimento começou pela implementação e desenvolvimento do servidor *Flask* e página *web*, sendo que o primeiro circuito a ser implementado e testado foi a Lei de Ohm. O projecto foi evoluindo com a adição dos restantes circuitos que compõem o LaRE. Para o desenvolvimento do *software*, utilizou-se o IDE *Visual Studio Code*¹, e o projecto encontra-se alojado no *GitHub*. O sistema operativo instalado no Raspberry Pi é uma versão ligeiramente modificada do *Arch Linux ARM*. Os circuitos que compõem o LaRE foram testados e validados individualmente em *breadboards*, antes de se proceder à construção da matriz de placas, como referido na Secção 3.5.2. No Anexo A encontram-se os esquemas completos de todas as experiências, bem como o desenho das placas que compõem a matriz do LaRE. Esta matriz foi organizada em três placas distintas: uma dedicada à experiência da Lei de *Ohm*, outra às experiências de rectificação e filtragem e uma terceira exclusivamente responsável pelas fontes de alimentação.

¹<https://code.visualstudio.com/>

4.1 Hardware

4.1.1 Relés

Como já foi referido na Secção 3.2, o LaRE é composto por cinco circuitos. A implementação começou com o desenho esquemático e, tal como referido na Secção 3.5.4, tentou-se, sempre que possível, utilizar os relés SPST no comando das fontes e aparelhos de medida e os relés DPST no controlo dos componentes, tal como se pode ver no exemplo ilustrado na Figura 4.1. O relé K_4 - SPST - comanda a fonte de alimentação de 5 V e os relés K_1 a K_3 - DPST - comandam os componentes. Os esquemas completos de cada circuito podem ser consultados no Anexo A.

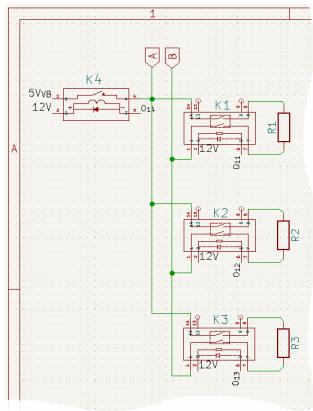


Figura 4.1: Exemplo de utilização de relés SPST e DPST

4.1.2 Driver de relés

Conforme referido na Secção 3.5.5, o Raspberry Pi não tem capacidade para comandar directamente os relés. Para esse efeito, é necessário utilizar um *driver* de relés. A Figura 4.2 apresenta o diagrama simplificado correspondente a um canal de entrada e saída do *driver* [151].

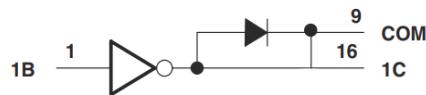
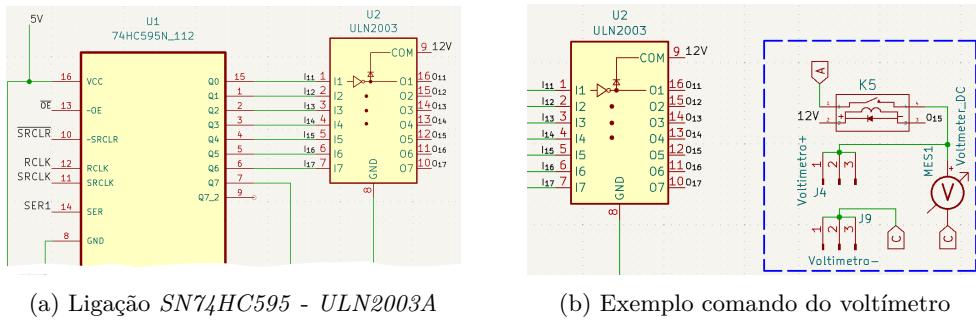


Figura 4.2: Diagrama de blocos simplificado do *ULN2003A*

O terminal 9, designado por *COM*, deve ser ligado à tensão de alimentação dos relés — 12 V no caso dos utilizados neste projecto — e destina-se aos diodos de “roda livre”, conforme descrito na Secção 3.5.4. As Figuras 4.3a e 4.3b servem como exemplos práticos ilustrando o funcionamento do procedimento referido na Figura 4.4. Neste exemplo, foi utilizado um relé SPST. No entanto, o funcionamento é idêntico para os relés DPST, variando apenas a disposição dos pinos.

Figura 4.3: Exemplo de uso do *SN74HC595* e *ULN2003A*

As entradas I_1 a I_7 recebem os *bits* enviados pelo Raspberry Pi através do registo de deslocamento, conforme apresentado na Figura 4.3a. As saídas O_1 a O_7 controlam os relés nos terminais “3”, enquanto os terminais “2” dos relés são ligados aos 12 V, como ilustrado na Figura 4.3b. No caso específico do exemplo acima descrito, se $I_5 = 0\text{ V}$, então a saída $O_5 = 12\text{ V}$, não existindo diferença de potencial entre os terminais “2” e “3” da bobina do relé “K5”. Nesse cenário, o relé permanece desactivado. Por outro lado, se $I_5 = 12\text{ V}$, a saída $O_5 = 0\text{ V}$, estabelecendo-se uma diferença de potencial nos terminais da bobina, o que provoca a activação do relé. No caso em que a *string* a ser transmitida for maior que 8 *bits*, há a necessidade de usar mais do que um registo de deslocamento. Neste caso, o pino 9 - Q'_H - do primeiro registo é ligado ao pino SER do segundo registo e assim sucessivamente.

4.1.3 Registo de deslocamento

O *SN74HC595* é um registo de deslocamento de 8 *bits* do tipo SIPO, cujo funcionamento já foi detalhado na Secção 3.5.6. Uma *string* de (até 8) *bits* é enviada pelo Raspberry Pi para o registo através do pino SER. Na Figura 4.4 pode ver-se o diagrama explicativo do processo de envio:

1. Pinos OE e SRCLR activados;
2. Um *bit* “0” ou “1” é enviado para o pino SER;
3. N impulsos ascendentes no pino SRCLK fazem com que os N *bits* sejam enviados para o registo de deslocamento (N *bits* ≤ 8);
4. Um impulso ascendente no pino RCLK faz com que os N *bits* sejam enviados para o registo de memória e, por conseguinte, para os relés (através do *ULN2003A*).

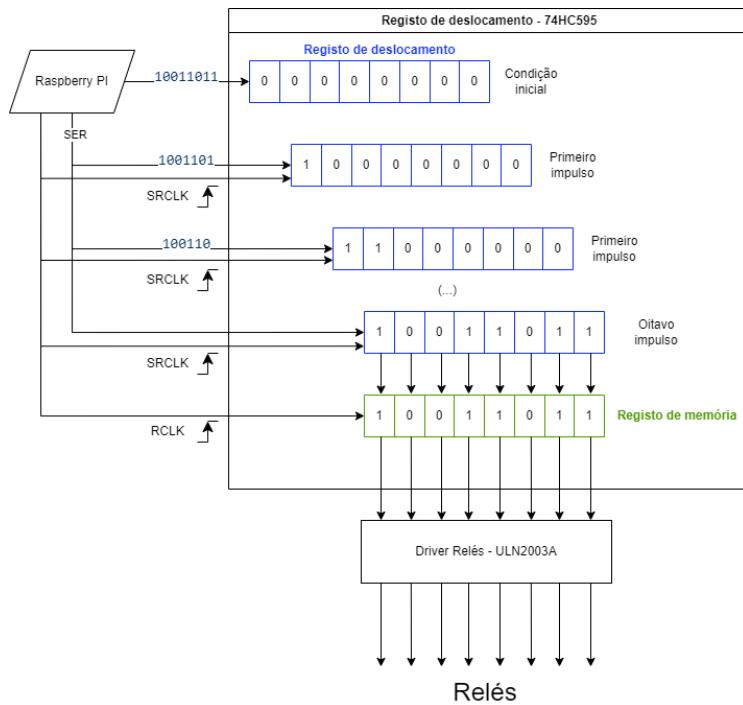


Figura 4.4: Envio de *bits* para o registo de deslocamento

4.1.4 Fontes de alimentação

O LaRE utiliza várias fontes de alimentação, todas passíveis de serem controladas por *software* e neste aspecto tentou-se simplificar/limitar o uso de fontes externas, além das que poderiam ser fornecidas pelo VB.

Como pode ser visto na Figura 3.16 ou na Figura 4.5 com mais pormenor, o VB possuí três fontes de alimentação (CC variáveis): 6 V, 25 V e -25 V ².



Figura 4.5: Fontes de tensão do VB

Assim, referente ao VB e à Figura 4.5, o LaRE utiliza as seguintes fontes de alimentação:

- 6 V (CC), utilizada na experiência da Lei de Ohm;
- 25 V (CC), utilizada na alimentação dos relés e dos *drivers*.

²No contexto do LaRE a fonte de tensão negativa não é usada.

No entanto, ainda são necessárias mais duas fontes de alimentação, nomeadamente:

- 5 V (CC), fonte projectada com recurso ao *LM317* e com tensão de entrada obtida a partir da fonte de 25 V - utilizada na alimentação dos registos de deslocamento;
- Para o estudo dos circuitos rectificação e filtragem, foi utilizado um transformador 230 V/8 V CA, disponível em contexto laboratorial e que se mostrou adequado aos objectivos trabalho.

Fonte de tensão 6 V - variável e Fonte de tensão 12 V - fixa

As fontes de 6 V e 25 V são configuradas por *software*. A primeira, utilizada na experiência da Lei de *Ohm*, varia entre 1 V e 6 V, enquanto a segunda é ajustada para fornecer 12 V. Mais detalhes sobre estas configurações são apresentados na Secção 4.2.2 e os esquemas consultados no Anexo A.

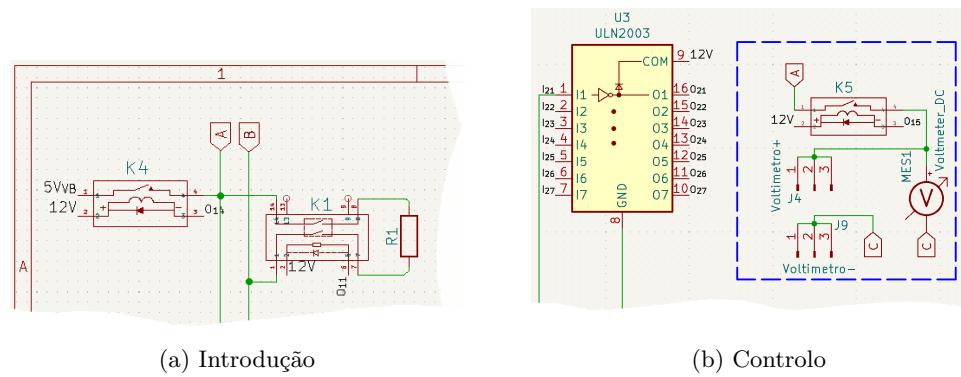


Figura 4.6: Implementação Fontes de 6 V e 12 V

As Figuras 4.6a e 4.6b ilustram os exemplos das ligações das respetivas fontes de tensão. Complementando com a Figura 4.5, o terminal “1” do relé *K₄*, designado por *5VVB*, está ligado ao terminal de 6 V do VB, enquanto a alimentação dos relés - terminais “2” e a alimentação dos *drivers* - terminais “9”, estão ligados ao terminal de 25 V.

Fonte de tensão 5 V - fixa

De forma a alimentar os circuitos com 5 V fixos foi projectada - Figura 4.7a e implementada - Figura 4.7b - uma fonte de alimentação [147].

Esta fonte teve como base o *LM317* e o esquema presente na página 11, Figura 9, do *datasheet* [147]. A utilização do *LM317* em detrimento, por exemplo, do *LM7805* prendeu-se com a disponibilidade do regulador em contexto laboratorial. Este regulador serve perfeitamente os propósitos deste projecto, já que a tensão

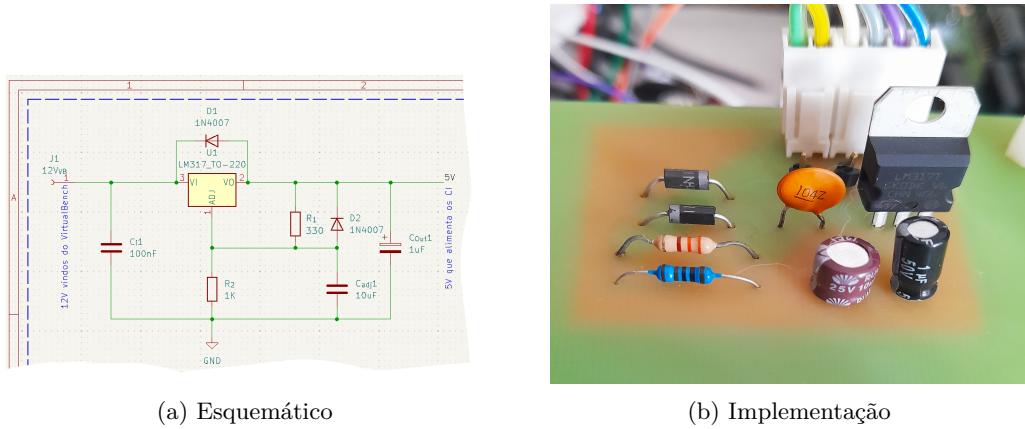


Figura 4.7: Fonte de 5 V [LM317]

de saída, regulável, varia entre os 1.25 V e os 37 V e a corrente de saída pode ser superior a 1.5 A.

Relativamente aos diodos de protecção, D_1 e D_2 , representados no esquema da Figura 4.7, em vez de se usarem os diodos 1N4002, por uma questão de disponibilidade dos componentes, usaram-se os diodos 1N4007. Estes diodos pertencem à mesma família de diodos retificadores da série 1N400x. Ambos têm especificações elétricas e mecânicas semelhantes, nomeadamente, a capacidade de suportar correntes directas até 1 A - valor suficiente para o nosso projecto que, relembrar-se, é limitado pelo VB a 0.5 A. No entanto, a principal diferença entre eles está na tensão inversa máxima que cada modelo é capaz de suportar [169]:

- 1N4002: Possui uma tensão inversa máxima de 100 V;
- 1N4007: Suporta uma tensão inversa máxima de 1000 V.

Estes valores são, pois, mais que suficientes para os níveis de tensão usados.

Sendo assim, para uma tensão de saída de 5 V, calcularam-se as resistências com base na expressão apresentada do *datasheet*, representada na Equação 4.1:

$$V_O = V_{REF}(1 + \frac{R_2}{R_1}) + (I_{ADJ} \times R_2) \quad (4.1)$$

De notar que, segundo o *datasheet* do LM317 [147], $V_{REF} = 1.25$ V e o valor do termo $I_{ADJ} \times R_2$ pode ser simplificado. De facto, I_{ADJ} é, tipicamente, $50 \mu\text{A}$, sendo que, para o nosso projecto, o valor escolhido para R_2 foi de $1 \text{k}\Omega$. Assim, segundo a Equação 4.2, tem-se que:

$$V_{ADJ} = I_{ADJ} \times R_2 = 0.05 \text{ V} \quad (4.2)$$

A Equação 4.1 fica então reduzida a:

$$V_O = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.3)$$

Considerando $V_O = 5\text{ V}$, e uma vez que a Equação 4.3 tem duas incógnitas, R_1 e R_2 , atribuiu-se a R_2 o valor de $1\text{ k}\Omega$, tal como foi dito anteriormente. Desta forma, obteve-se $R_1 = 333.33(3)\Omega$, tal como descrito na Equação 4.4:

$$5\text{ V} = 1.25 \times \left(1 + \frac{1000}{R_1}\right) \Leftrightarrow R_1 = 333.33(3)\Omega \quad (4.4)$$

O valor da resistência normalizada mais próxima é de 330Ω . Importa, pois, reverter a Equação 4.3 e confirmar o valor de V_O obtido:

$$V_O = 1.25 \times \left(1 + \frac{1000}{330}\right) \Leftrightarrow V_O = 5.037(87)\text{ V} \quad (4.5)$$

Portanto, este é um valor perfeitamente aceitável para alimentar os circuitos integrados.

Fontes de tensão 230 V/8 V CA

As experiências respeitantes aos rectificadores e filtros utilizam tensão alternada sinusoidal. Tal como já foi referido anteriormente, tentou-se, sempre que possível, simplificar o uso de fontes externas.

Na prática e em contexto de sala de aula, a experiência de rectificação de onda completa levanta um problema de massas, se se pretender usar um gerador de sinal. Quer isto dizer que não é possível medir, simultaneamente, os sinais de entrada e saída. Como se pode ver pelo esquema representado na Figura 4.8, o diodo está curto-circuitado (linha magenta a tracejado, entre os pontos 2 e 3) devido ao facto de as massas serem comuns.

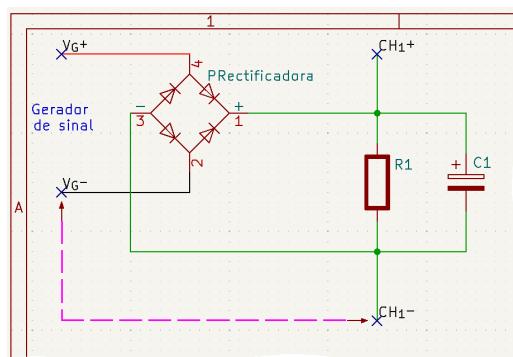


Figura 4.8: Problema de massa - onda completa

A forma de contornar este problema é usar um transformador e, assim, medir a onda de saída com o osciloscópio. Ainda assim, não é possível medir as ondas de entrada e saída **simultaneamente**, se for esse o objectivo.

No caso do LaRE, e com recurso ao uso de relés, é possível controlar a massa dos dois canais do osciloscópio por *software*, tal como representado no esquema simplificado da Figura 4.9 e representar as duas ondas (entrada e saída) na mesma imagem. De referir que, desta forma, seria possível usar o gerador de sinal. No entanto, o uso do transformador justifica-se pelas seguintes razões:

- Facilidade e simplicidade em controlar as massas por *software* - três, no caso do uso do gerador de sinal (CH_{1-} , CH_{2-} e VG_-), ou duas, no caso de se usar um transformador (CH_{1-} , CH_{2-});
- Em contexto laboratorial e de sala de aula, usa-se um transformador para rectificar a onda completa.

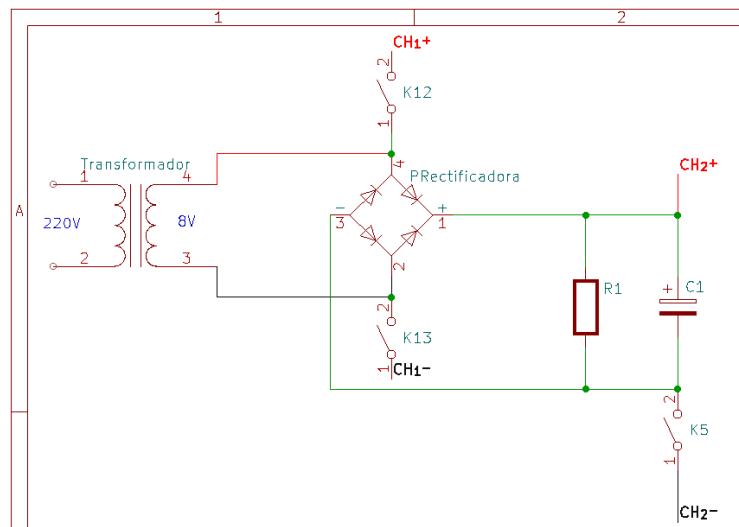


Figura 4.9: Problema de massa - onda completa [Resolvido]

O esquema completo da experiência de rectificação de onda completa pode ser consultado no Anexo A.

4.1.5 Aparelhos de medida - voltímetro e amperímetro

A medição de tensão e corrente são feitas utilizando o multímetro digital - *Digital Multimeter* (DMM) - PXI-4072, referenciado na Secção 2.3.1, Figura 2.16 e cujo painel frontal está representado na Figura 4.10.



Figura 4.10: Painel frontal Multímetro Digital

Na Figura 4.11a está representado o esquema simplificado da Lei de *Ohm* que pode ilustrar o funcionamento dos aparelhos de medida. O ponto C é comum e é controlado pelo relé K_7 . O terminal positivo do voltímetro está ligado ao ponto A, controlado pelo relé K_5 mas o amperímetro necessita de mais um relé, já que é inserido em série. Neste caso o relé K_8 funciona como um *bypass* quando se pretende medir tensão e o relé K_6 controla o terminal positivo do amperímetro.

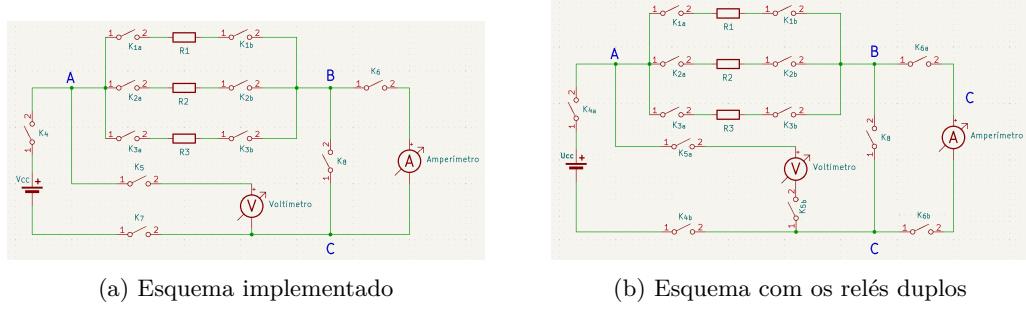


Figura 4.11: Esquema completo - Lei de *Ohm*

No entanto, faz-se notar o seguinte: embora os aparelhos de medida sejam independentes, partilham a mesma massa. Esta escolha foi motivada pela indisponibilidade de relés duplos em contexto laboratorial, pelo que se optou por fazer a gestão da forma a que o propósito do projecto fosse atingido e o conceito provado. Na Figura 4.11b apresenta-se o esquema simplificado, com os relés duplos, adicionados aos aparelhos de medida.

De referir que, se se pretender expandir o LaRE com mais circuitos, é possível utilizar o voltímetro e o amperímetro da forma como estão implementados. A Tabela 4.1 apresenta o estado dos relés, K_5 a K_8 consoante a grandeza que se pretende medir.

Tabela 4.1: Exemplo funcionamento de medição da Lei de Ohm

| Estado dos relés | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 | K_7 |
| Medir Tensão | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Medir Corrente | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

4.1.6 Experiências

De forma a permitir um melhor desenvolvimento, foco, organização, detecção e correcção de erros, as experiências foram implementadas de forma independente. As primeiras ideias passavam por, além da Lei de *Ohm*, implementar o estudo da rectificação de meia e onda completa. Contudo, verificou-se que seria possível incluir

uma experiência adicional, dedicada ao estudo prático de filtros passa-alto e passa-baixo, já que estas duas experiências possuem componentes comuns, ampliando, assim, o alcance e a aplicabilidade do LaRE.

Lei de Ohm

Na Figura 4.11a apresenta-se o esquema simplificado da implementação prática da Lei de *Ohm*. O esquema completo pode ser consultado no Anexo A. A Figura 4.12, anteriormente apresentada, é aqui repetida com o objetivo de ilustrar de forma mais clara a correspondência entre o circuito e a sua implementação física na placa, tal como representado na imagem.

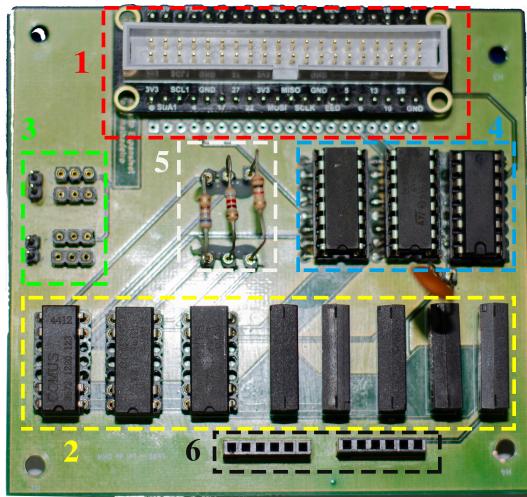


Figura 4.12: [Implementação] Lei de *Ohm*

A fonte de tensão e os aparelhos de medida foram projectados de forma a serem independentes, tal como é referido na Secção 4.1.5, permitindo a sua utilização caso se pretenda expandir o LaRE com mais experiências. A fonte de tensão pode ser utilizada desactivando K_5 e K_7 .

O funcionamento do circuito é relativamente simples, sendo que qualquer que seja a resistência a medir, é fechado o respectivo relé - K_1 ou K_2 ou K_3 ; a fonte U_{CC} é ligada ao circuito através do relé K_4 e K_7 . A medição da tensão e da corrente faz-se da seguinte forma:

- Medição da tensão:
 - Os relés K_5 e K_8 são fechados e K_6 é aberto (Amperímetro desactivado). Desta forma, o voltímetro fica em paralelo com a resistência a medir - entre os pontos A e B.
- Medição da corrente:
 - Os relés K_5 e K_8 são abertos e K_6 é fechado (Amperímetro activado).

- Os relés K_5 e K_8 são abertos (voltímetro desactivado) e K_6 é fechado. Desta forma, o amperímetro fica em série com a resistência a medir - entre os pontos B e C.

Como exemplo, se se pretender estudar a Lei de Ohm para a resistência R_1 , os relés seriam activados da forma representada na Tabela 4.1:

Rectificadores e filtros

Uma vez que a implementação destas duas experiência foi realizada na mesma placa, além de que partilham componentes, optou-se por apresentá-las em conjunto. Na Figura 4.13 estão representados os esquemas simplificados dos circuitos. Nela se podem ver os componentes comuns - rectângulo tracejado laranja - assim como os rectificadores de meia e onda completa - rectângulo tracejado vermelho e verde, respectivamente. Exclusivo dos filtros estão, também, representados, o condensador e resistência, no rectângulo tracejado magenta. O esquema completo encontra-se representado no Anexo A.

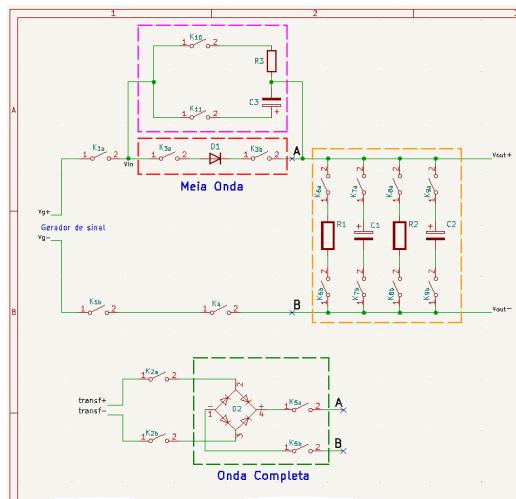


Figura 4.13: Esquema completo (simplificado) - rectificadores e filtros

A Figura 4.14, já anteriormente apresentada, é aqui retomada para ilustrar com maior clareza a correspondência entre o circuito e a sua implementação física na placa. Nesta implementação, foi necessário recorrer a dois tipos distintos de tensão de entrada. Como referido na Secção 4.1.4, o circuito de meia onda utiliza o gerador de sinal, mas, devido ao problema de massa já descrito nessa mesma secção, optou-se por utilizar um transformador no circuito de rectificação de onda completa.

Como referido na Secção 4.1.6, a implementação dos filtros foi realizada após a conclusão dos rectificadores. De forma a permitir a integração desta experiência no circuito já concluído, foi necessário realizar um *bypass* ao diodo D_1 (assinalado pelo

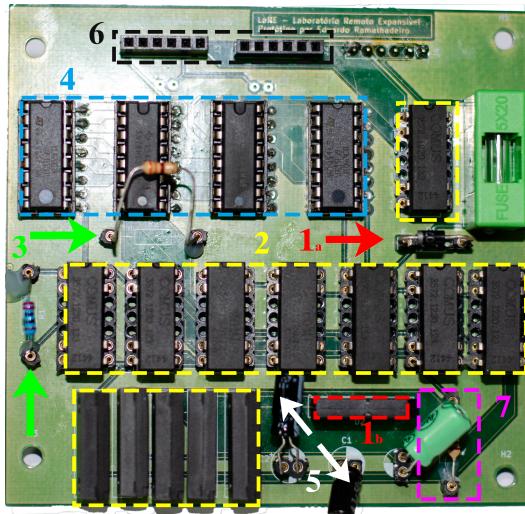


Figura 4.14: [Implementação] rectificadores e filtros

retângulo tracejado a vermelho na Figura 4.13). Esta alteração permitiu a introdução de uma resistência (R_3) ou de um condensador (C_3), consoante a configuração do filtro em estudo. Os esquemas teóricos dos filtros estão representados nas Figuras 3.13a e 3.13b, sendo que R e C correspondem a R_3 e C_3 .

Portanto, se se pretender estudar o filtro passa-baixo, é activado o relé K_{10} (R_3) e o condensador de saída pode ser escolhido entre os C_1 e C_2 , consoante a configuração que se pretende estudar. O mesmo se aplica ao filtro passa-alto, onde o relé K_{11} (C_3) é activado e a resistência de saída pode ser escolhida entre os R_1 e R_2 . Na Tabela 4.2 e com o auxílio da Figura 4.13 (ou do circuito completo apresentado no Anexo A), pode ver-se o estado dos relés, respeitante a uma combinação possível para cada circuito.

Tabela 4.2: Exemplo funcionamento do rectificador de meia onda

| | Estado dos relés | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 | K_7 | K_8 | K_9 | K_{10} | K_{11} | K_{12} | K_{13} |
| Meia Onda | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Onda Completa | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Filtro Passa-Alto | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Filtro Passa-Baixo | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

4.2 Software

Hoje em dia vive-se (n)uma Era em que toda a informação está disponível na “ponta dos dedos” e à distância de um *click*. A pesquisa, desenvolvimento e testes dos assuntos mais técnicos revelou-se um processo exigente e, por vezes, moroso. A

abundância dos recursos disponíveis colocou o desafio adicional de tentar perceber a dicotomia certo/errado. No apoio a este processo, recorreu-se à Inteligência Artificial, documentação técnica *online*, fóruns de discussão, ajuda pessoal, tutoriais *online* e vídeos no *YouTube*.

Este projecto de código fonte aberto está dividido em dois repositórios, disponíveis para consulta e modificação sob a licença GPL-3.0 (GNU General Public License, versão 3) no GitHub: LaRE e PiCode. Assim, os ficheiros são referenciados relativamente ao respectivo repositório. Ao longo deste capítulo, sempre que se justificar e para fins de clareza, será apresentado o código necessário - em pequenos trechos - de forma a melhor ilustrar os conceitos discutidos. Não se pretende, contudo, abordar exaustivamente todas as instruções ou métodos de configuração do VB, uma vez que os ficheiros se encontram comentados, sendo possível obter informações adicionais através da sua consulta.

4.2.1 Servidor Flask

Na Secção 3.6.1 foram já referidas as razões que levaram à escolha do *Flask* como servidor *web*. A base para a implementação do *Flask* teve como base e referência a documentação técnica disponível no *site* do *Flask* [132] e complementada com alguns tutoriais do *Youtube* [170, 171].

Estrutura base

O fluxograma apresentado na Figura 4.15 apresenta o funcionamento geral do servidor *Flask*.

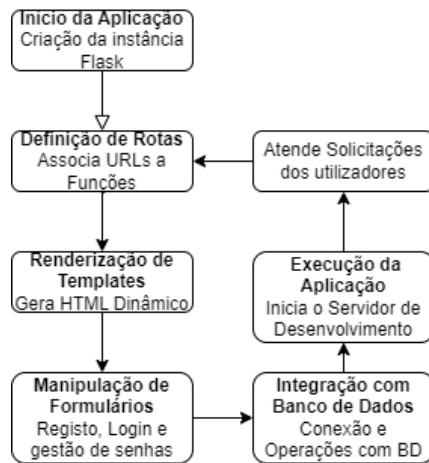


Figura 4.15: Funcionamento geral *Flask*

A estrutura de directórios do *Flask* tem uma base pré-definida que não é necessariamente rígida e pode ser adaptada consoante os requisitos do projecto [132]. No caso do LaRE a estrutura ficou organizada da forma como se mostra na Figura 4.16

```

webserver/
    └── instance/
        └── database.db
    └── website/
        ├── static/
        │   ├── images/
        │   ├── index.js
        │   └── style.css
        └── templates/
            ├── base.html
            ├── home.html
            ├── login.html
            └── sign_up.html
            (...)

    └── __init__.py
    └── auth.py
    └── models.py
    └── views.py
main.py

```

Figura 4.16: Estrutura de directórios - *Flask*

A raiz do projecto é o directório “*webserver*” e nele estão contidos o ficheiro principal, assim como outros directórios e ficheiros de configuração essenciais:

- *main.py*: O ficheiro principal do aplicativo que inicializa e configura o *Flask*;
- *requirements.txt*: Uma lista de dependências do projecto que podem ser instaladas usando *Pip Installs Packages* (PIP);
- *static/*: Este directório contém os ficheiros estáticos como CSS, *JavaScript* e as imagens usadas em toda a aplicação;
- *templates/*: Contém os modelos HTML usado para renderizar as visualizações;
- *instance/*: Directório para armazenar ficheiros de configuração ou ficheiros que mudam em tempo de execução, específicos da cada instância, por exemplo, ficheiros da base de dados.

Dentro da raiz, criou-se o directório *website* onde se incluiu os ficheiros respeitantes ao funcionamento do *site*. Dele constam os já descritos *templates*, *static* e ainda os seguintes ficheiros:

- *__init__.py*: Inicializa o *Flask* e define as configurações. Este ficheiro dentro da directória *website* faz com que esta seja tratada como um pacote *Python*. Isto quer dizer que a directória pode ser importada e tudo o que estiver dentro é executado automaticamente;

- *views.py*: Contém as funções de visualização para o tratamento de pedidos *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP);
- *models.py*: Define os modelos de dados para a aplicação;
- *auth.py*: Este ficheiro é responsável por lidar com a autenticação e autorização de utilizadores, pode incluir funções e rotas que permitem aos utilizadores registarem-se, fazer *login* e fazer *logout*.

Rotas

As aplicações Web modernas utilizam URLs amigáveis para ajudar os utilizadores a memorizar e utilizar o nome para voltar a visitar directamente uma página.

No *Flask* utiliza-se o *decorator route()* para associar uma função a um URL, tal como pode ser visto na Listagem 4.1.

```

1 @views.route("/ohm", methods=['GET', 'POST'])
2 @login_required
3 def pagina_seguinte():
4     return render_template("ohm.html", user=current_user)

```

Listagem 4.1: *Decorator route() - views.py*

O *decorator route* define a rota correspondente à URL *ohm*, a qual aceita pedidos HTTP de métodos *GET* e *POST*. Adicionalmente, o *decorator login* assegura que apenas utilizadores autenticados podem aceder a esta rota; caso contrário, o utilizador será redirecionado para a página de autenticação. Sempre que esta rota é invocada, a função *página_seguinte()* é executada. Por fim, a última linha da função invoca o template *home.html* e passa-lhe o objeto *current_user*, permitindo personalizar a página com os dados do utilizador autenticado.

Para construir um URL para uma função específica, usa-se a função *url_for()*. Esta função aceita o nome da função como seu primeiro argumento e qualquer número de argumentos de palavras-chave, cada um correspondendo a uma parte variável da regra de URL, tal como pode ser visto na Listagem 4.2

```

1 (...)

2 if user:
3     if check_password_hash(user.password, password):
4         flash('Logged in successfully!', category='success',
5               )
6         login_user(user, remember=True)
7         return redirect(url_for('views.home'))
8 (...)
```

Listagem 4.2: Construção de urls - *auth.py*

Isto quer dizer que o *Flask* gera a URL correspondente à função *home()* definida no ficheiro *views.py* dentro da Blueprint *views*. Quando usada dentro de *redirect*, redireciona o utilizador para essa URL. No *Flask*, os *decorators* são utilizados para associar funcionalidades adicionais a funções que representam rotas. Um *decorator* é uma construção da linguagem *Python* que permite modificar o comportamento de uma função sem alterar o seu conteúdo. Ao utilizar *@route*, *@login_required* e outros *decorators*, o *Flask* cria uma camada adicional de lógica que é aplicada automaticamente antes (ou depois) da execução da função “decorada”.

Blueprints

O *Flask* usa um conceito de *blueprints* para criar componentes de aplicações e suportar padrões comuns dentro de uma aplicação ou entre aplicações. As *blueprints* podem simplificar muito o funcionamento de grandes aplicações e fornecer um meio central para que as extensões do *Flask* registem operações em aplicações. As *blueprints* permitem organizar a aplicação em partes menores e de mais fácil gestão. O conceito básico das *blueprints* é que registam as operações a executar quando são integrados numa aplicação. O *Flask* associa funções de vista (*views*) a *blueprints* quando processa pedidos e gera URL entre diferentes pontos de acesso. Na Listagem 4.3 e Listagem 4.4 podem ver-se as duas *blueprints* definidas no caso da implementação do LaRE.

```
1 views = Blueprint('views', __name__)
```

Listagem 4.3: Blueprint *views* - *views.py*

```
1 auth = Blueprint('auth', __name__)
```

Listagem 4.4: Blueprint *auth* - *auth.py*

Ambas as *blueprints* são registadas no ficheiro *__init__.py*, como se pode verificar na Listagem 4.5

```
1 app.register_blueprint(views, url_prefix='/')
2 app.register_blueprint(auth, url_prefix='/')
```

Listagem 4.5: Registo das *blueprints* - *__init__.py*

Isto quer dizer que, ao registrar a *blueprint* com o prefixo “/”, os URLs serão acessíveis através da raiz da aplicação.

Pedidos

A capacidade de uma aplicação *web* em responder a solicitações de dados do cliente é um requisito essencial. No *Flask* esta informação é fornecida pelo objeto global *request*. Este objeto contém todos os detalhes da solicitação, como os métodos HTTP usados (*GET*, *POST*, etc.), os *headers* os *cookies* ou o corpo da requisição. O método de requisição pode ser determinado através do atributo *method*. Para aceder aos dados de um formulário (transmitidos numa requisição *POST* ou *PUT*), utiliza-se o atributo *form*, tal como descrito no ficheiro *auth.py*. Quando se adiciona um ponto de interrogação (?) seguido de pares chave-valor (key=value) no final de um URL, está a enviar-se dados adicionais ao servidor, chamados de **parâmetros do URL**, como se pode ver na Listagem 4.6.

```
1 const url = '/config_VirtualBench?parameter=${parameter}&
Vcc=${Vcc}&R=${Resistance}';
```

Listagem 4.6: Exemplo argumentos passados ao servidor - ohm.html

Como referido na Secção 3.6.1, a renderização das páginas HTML é realizada através do motor *Jinja*. No caso específico do LaRE, o *Flask* procura os modelos a renderizar na pasta *templates*, conforme ilustrado na Figura 4.16. Na página oficial do *Flask* é recomendado que se acceda aos parâmetros do URL com *get* ou capturando o **KeyError**, uma vez que os utilizadores podem alterar o URL e, nesse caso, apresentar uma página *400 bad request* não é de fácil interpretação.

Base de dados

A aplicação desenvolvida usa uma base de dados e autenticação de utilizador. A ligação com a base de dados é aberta no início do pedido e é obtida a informação do utilizador. No final do pedido, a ligação com a base de dados é fechada.

No contexto da documentação do *Flask* e implementação de uma base de dados, são apresentadas duas alternativas: *SQLite 3* e *SQLAlchemy*. Tal como sugerido na documentação, usou-se a extensão *Flask-SQLAlchemy*, descrita no ficheiro *__init__.py*.

Autenticação

A segurança da aplicação é assegurada através das funcionalidades de *login* e *logout*, implementadas no ficheiro *auth.py*. Para esse fim, foi instalada a extensão *flask-login* que simplifica a gestão de sessões de utilizadores ao permitir manter o estado autenticado entre diferentes requisições. Esta ferramenta disponibiliza métodos como *login_user()*, *logout_user()* e *current_user*, que simplificam a verificação e

controlo do estado de autenticação. O processo de registo envolve a recolha de credenciais, como nome de utilizador e senha, garantindo o armazenamento seguro da senha através de *hashing* com `generate_password_hash`. No `login`, a aplicação verifica as credenciais fornecidas, compara a senha inserida com a armazenada usando `check_password_hash` e, se for válida, inicia a sessão do utilizador. Além disso, certas rotas são protegidas para garantir que apenas utilizadores autenticados as possam aceder, utilizando o *decorator* `@login_required`, que redireciona utilizadores não autenticados para a página de `login`. A gestão de sessões é feita através de *cookies* seguros, permitindo ainda a funcionalidade de lembrar a sessão entre reinícios do navegador, caso seja activado o parâmetro `remember=True` no `login_user`.

Devido à complexidade da implementação de uma verificação por *email*, a aplicação restringe-se à autenticação baseada apenas no nome de utilizador e senha. A inclusão desse mecanismo exigiria um serviço de envio de *emails* e a gestão de *tokens* de confirmação.

4.2.2 Arquitectura de Comunicação

Nesta secção, o foco será analisar a comunicação (e troca de parâmetros) entre os diversos tipos de ficheiros. Na Figura 4.17 é apresentado o diagrama simplificado que ilustra o funcionamento geral deste tipo de comunicação.

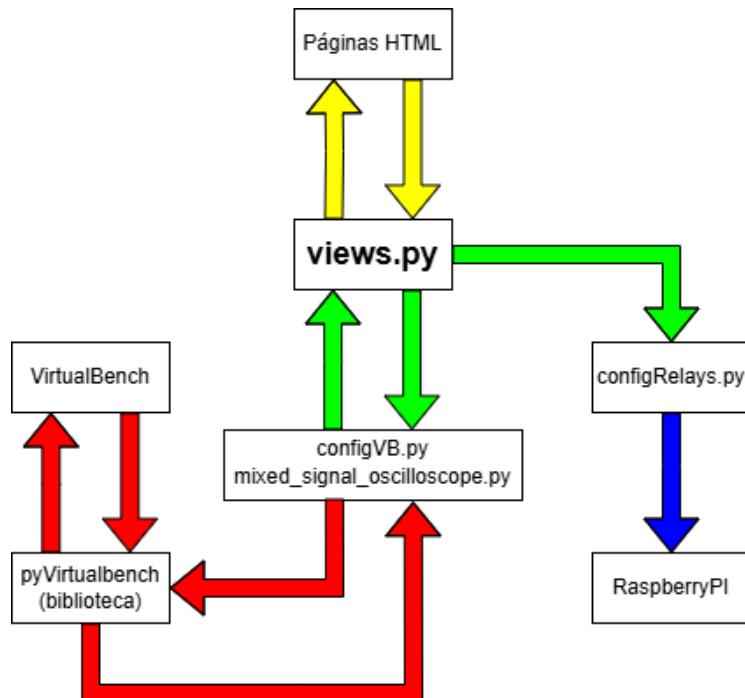


Figura 4.17: Diagrama de comunicação simplificado

A arquitectura do sistema é composta por múltiplos ficheiros que comunicam entre si, englobando a troca de parâmetros. O critério utilizado foi o de tornar o ficheiro *views.py* o mais leve e simples possível, mantendo-se o comando e controlo dos dispositivos em ficheiros separados.

Como mencionado na Secção 4.2.1, a estrutura de directórios do *Flask* possui uma base pré-definida, mas suficientemente flexível para ser adaptada conforme os requisitos específicos do projecto, como ilustrado na Figura 4.16. De uma forma geral, foram criados ficheiros específicos para cada experiência, adoptando o critério de evitar uma excessiva modularização do código. Embora esta prática ofereça vantagens, também apresenta as suas desvantagens - devido à fragmentação excessiva - já que pode tornar a compreensão e manutenção do código mais complexa.

Os seguintes ficheiros foram criados e associados às respectivas experiências:

Específicos

- *config.py* - Lei de *Ohm*;
- *mixed_signal_oscilloscope.py* - Rectificadores/Filtros;
- [ohm, meiaonda, ondacompleta, passaalto, passabaixo].html - Visualização.

Comuns

- *views.py* - parte central da aplicação, pois nele estão definidas todas as rotas *Flask*. Quer isto dizer que, cada roda representa uma funcionalidade ou página *web* específica e qualquer troca de dados ou argumentos entre ficheiros e/ou *scripts*, passa obrigatoriamente por este ficheiro. Sendo assim, tentou-se, sempre que possível, reduzir o código ao estritamente necessário;
- *configRelays.py* - ficheiro responsável pelo envio da *string* para o *RaspberryPI*.
- [login, base, sign_up].html - páginas de autenticação e registo de utilizadores.

Comunicação entre ficheiros

A comunicação entre as páginas HTML e o ficheiro *python*³ é feita nos dois sentidos - setas amarelas - já que os utilizadores enviam os parâmetros específicos de cada experiência e os resultados são apresentados nas páginas.

A Listagem 4.7 ilustra a forma como os parâmetros são enviados da página HTML para o ficheiro *python*, através de uma *query string*.

³Pode-se, neste caso, reduzir a comunicação ao caso mais geral de troca de informação entre ficheiros HTML e *python*, já que, no fundo, o ficheiro *views.py* está escrito em *python*.

```

1 const url = '/config_VirtualBench?variavel_1=${parametro_1}&variavel_2=${parametro_2}&variavel_3=${parametro_3}';

```

Listagem 4.7: Envio de parâmetros HTML → *views.py*

Do lado do servidor, o *Flask* disponibiliza o objecto *request*, a partir do qual os parâmetros enviados por URL podem ser acedidos através da função *request.args.get()*, como representado na Listagem 4.8.

```

1 Vcc = request.args.get('parametro_1', 0, int)

```

Listagem 4.8: Recepção de parâmetros

O envio de parâmetros do ficheiro *python* para as páginas HTML é feito em *JavaScript Object Notation (JSON)*, usando a instrução definida na Listagem 4.9.

```

1 return jsonify({'measurement_result': measurement_result})

```

Listagem 4.9: Envio de parâmetros *views.py* → HTML

Do lado das páginas HTML a recepção do resultado é feita através do método *fetch()*, como se pode ver na Listagem 4.10.

```

1 fetch(url)
2   .then((response) => response.json())
3   // Aceder a variável measurement_result
4   .then((data) => {
5     document.getElementById("current-measure").innerHTML
6       =
7       data.measurement_result + " mA";

```

Listagem 4.10: Recepção de parâmetros

As setas verdes representam a comunicação entre dois ficheiros *python*. O processo é bastante simples, bastando para isso, importar o ficheiro que contém a função que se pretende chamar. A Lista 4.11 ilustra a forma como se importa um ficheiro *python* e a chamada da respectiva função com o parâmetro a passar.

```

1   from ctrl_hardware import configRelays, configVB,
2       mixed_signal_oscilloscope
configRelays.config_relays_ohm(Resistance,
measure_parameter)

```

Listagem 4.11: Comunicação python - python

No entanto, o processo de medição na experiência da Lei de *Ohm* possui características específicas que justificam uma explicação detalhada. A Figura 4.18 ilustra o procedimento de leitura das medições de tensão e corrente.

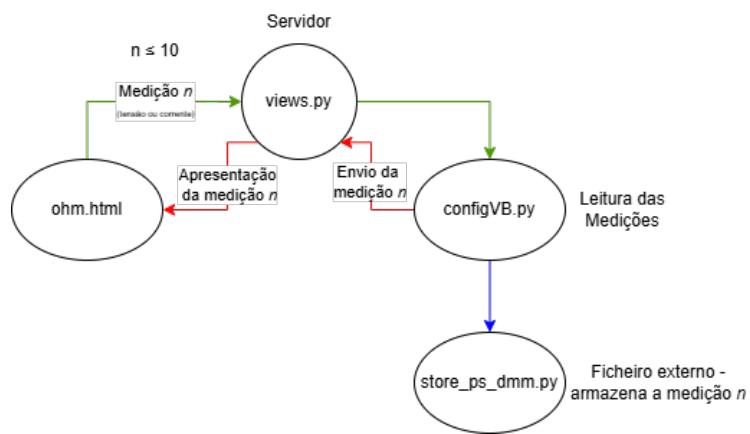


Figura 4.18: Processo de leitura das medições de tensão e corrente

As setas a verde e vermelho representam o fluxo do processo iniciado pelo utilizador ao solicitar uma medição. Este ciclo repete-se cinco vezes para cada grandeza (tensão e corrente). No entanto, como o ficheiro *configVB.py* é executado de forma independente em cada chamada, num total de dez execuções, os valores medidos não são retidos entre invocações sucessivas. Para contornar esta limitação e garantir a persistência das medições ao longo das múltiplas chamadas à API, sem recorrer a mecanismos clássicos de persistência, como ficheiros *.json*, *.csv* ou bases de dados locais — os quais implicariam operações adicionais de escrita e leitura no sistema de ficheiros — foi desenvolvido um módulo auxiliar em *Python*, implementado no ficheiro *store_ps_dmm.py*. Este módulo utiliza variáveis globais como mecanismo de armazenamento em memória. Os valores de tensão e corrente são armazenados num *array* através da função *np.append*, da biblioteca *NumPy* [172]. Dado que o servidor *Flask* se mantém activo durante todo o processo de medição, as variáveis globais permanecem acessíveis em memória entre chamadas à API. Esta abordagem simplifica a gestão do estado da aplicação numa fase inicial de desenvolvimento, sendo eficaz enquanto o processo da aplicação não for reiniciado.

Comunicação com RaspberryPi

Do lado do *Raspberry Pi*, embora de uma forma mais simples, também se usou a premissa de modularização do código, tal como referido na Secção 4.2.2. Este ficou dividido em dois ficheiros:

- *receive.py* - recebe a *string*;
- *shift_register.py* - responsável por activar os relés.

A comunicação com o *Raspberry Pi* é estabelecida através de sockets, um método já descrito na Secção 3.3. Após a configuração e teste dos parâmetros, uma *string* representando o número de relés a activar - 8 *bits* ou 13 *bits*, dependendo dos circuitos - é enviada através da *interface* de rede. A implementação do mecanismo de comunicação encontra-se no ficheiro *configRelays.py*, na função *config_Relays*.

Sendo assim, o ficheiro *receive.py* é executado inicialmente e aguarda pelo envio da *string*. De referir que, embora o *socket* esteja configurado em *blocking mode* - quer isto dizer que o cliente ficará bloqueado na Linha 3, da Listagem 4.12, esperando uma resposta do servidor [142] (acontece enquanto a *string* não for enviada) - optou-se por enviar uma confirmação do servidor ao cliente. Não sendo estritamente necessário, foi adicionada como auxílio à depuração.

```

1      # Espera pela resposta do servidor
2      while True:
3          data = s.recv(1024)
4          if not data:
5              break
6          response = data.decode()
7          if response == 'True': # Espera por uma
8              confirmacao especifica do servidor
9              print("Confirmacao recebida do servidor:",
                   response)
10             break

```

Listagem 4.12: *Block Mode [Sockets]* *configRelays.py*

O passo final é a activação dos relés, realizada no ficheiro *shift_register.py*, função *commandRelays*. O procedimento foi descrito na Secção 4.1.3, sendo que os modos de funcionamento estão representados na Tabela 3.2.

Para que as experiências funcionem correctamente, todos os relés devem ser activados em simultâneo. Para isso, a sequência de controlo dos relés é representada por uma *string* composta por 8 ou 13 dígitos binários, conforme as experiências, em que cada carácter indica o estado (ligado ou desligado) de um relé. Esta *string* é posteriormente convertida para um número inteiro, sobre o qual é realizada uma operação de *and bit a bit*. Cada um dos *bits* resultantes é, então, enviado sequencialmente para o registo de deslocamento, numa configuração SIPO, conforme ilustrado

na Listagem 4.13. Assim que os 8 ou 13 *bits* forem transferidos para o registo, a saída paralela será activada, resultando na activação dos relés.

```

1   for i in range(n_bits):
2       binaryShift = binaryString & 1
3       if binaryShift == 1:
4           WriteReg (ON, SERCLK_pin_ctrl, SER_pin_ctrl,
5                     WaitTimeSR)
6       else:
7           WriteReg(OFF, SERCLK_pin_ctrl, SER_pin_ctrl,
8                     WaitTimeSR)
9       binaryString = binaryString >> 1
10      OutputReg(RCLK_pin_ctrl)
11  return True # Fim da transmissao da string de bits,
12      reles activados

```

Listagem 4.13: *And bit bit shift_register.py*

VirtualBench - Configurações e medições

O comando e controlo do VB (e dos respetivos instrumentos) — representado na Figura 4.17 pelas setas vermelhas — é realizado através da biblioteca *pyVirtualBench* [173], a qual, como referido na Secção 3.2, funciona como um *wrapper* que permite controlar o VB a partir de uma aplicação desenvolvida em *Python*. A documentação desta biblioteca, disponível no endereço indicado, é bastante completa e detalhada, sendo recomendada para aprofundamento técnico. Além de instalar a biblioteca, os autores disponibilizam uma série de exemplos, sendo que, aqueles que mais se adequam aos objectivos deste projecto são:

- *dmm_example.py*: exemplo que demonstra como efetuar medições utilizando o multímetro digital;
- *fgen_example.py*: exemplo que demonstra como configurar e gerar uma onda através do gerador de sinal;
- *mso_simple_example.py*: exemplo que demonstra como configurar e adquirir dados do osciloscópio, utilizando a funcionalidade de configuração automática incorporada;
- *ps_example.py*: exemplo que demonstra como efetuar medições utilizando a fonte de alimentação.

De forma a realizar as configurações e medições do VB, tomou-se como ponto de partida os exemplos já fornecidos com a referida biblioteca e adaptaram-se ao contexto do projecto. Nesta secção, apresenta-se como exemplo a configuração da

fonte de alimentação, por ser o único instrumento utilizado em todas as experiências realizadas.

Através da análise dos exemplos disponibilizados para o VB (e que estão definidos no repositório já mencionado do *GitHub*), foi possível compreender a estrutura geral de configuração aplicada aos instrumentos e fontes de alimentação. Com base nessa análise, determinou-se a seguinte lógica de funcionamento:

1. Aquisição do *virtualbench*;
2. Aquisição dos instrumentos;
3. Configurações específicas de cada instrumento;
4. Desenvolvimento do programa;
5. Libertar os instrumentos;
6. Libertar o *virtualbench*.

A aquisição do VB, identificado como *VB8012-30A210F*, é feita através da criação de uma instância da classe *PyVirtualBench*, que é a classe principal da biblioteca *pyVirtualBench*, definida na Linha 1, da Listagem 4.14.

```
1     virtualbench = PyVirtualBench('VB8012-30A210F')
2     ps = virtualbench.acquire_power_supply()
```

Listagem 4.14: Instanciação da classe *PyVirtualBench*

A partir do objeto *virtualbench*, é possível aceder aos diferentes instrumentos, sendo que a aquisição é feita através do método *acquire_<instrumento>()*. Essa instância é armazenada numa variável definida pelo utilizador, permitindo o acesso às funcionalidades de configuração, controlo e medição disponibilizadas por esse instrumento. Na Listagem 4.14, linha 2, pode ver-se, a título de exemplo, como é feita a aquisição da fonte de alimentação, que é armazenada na variável *ps*. Um exemplo da configuração da fonte está descrita na Listagem 4.15.

```

1   try:
2       # Configuracao da fonte de alimentacao
3       channel = "ps/+25V"
4       voltage_level = 1.0
5       current_limit = 0.5
6       # Configuracao especifica
7       ps.configure_voltage_output(channel,
8           voltage_level, current_limit)
9       ps.enable_all_outputs(True)

```

Listagem 4.15: Exemplo *ps_example.py*

- *channel* - linha 3: especifica o canal da fonte de tensão a utilizar, sendo que, neste exemplo, é selecionado o canal de 25 V, através do nome “ps/+25V” (podendo também ser utilizado “ps/+6V” para o canal de 6 V);
- *voltage_level* - linha 4: define o valor da tensão de saída. No caso deste exemplo, 1.0 V. Pode ser, também, atribuída uma variável - V_{cc} - com base nos valores apresentados na Figura 4.22);
- *current_limit* - linha 5: é configurado o limite de corrente para 0.5 A;
- *ps.configure_voltage_output(channel, voltage_level, current_limit)* - linha 7: configura a fonte de alimentação com os parâmetros definidos nas linhas 3 a 5;
- *ps.enable_all_outputs(True)* - linha 8: activa todas as saídas da fonte de alimentação. No entanto, só a saída correspondente ao canal definido na linha 3 será activada.

No final da execução, os instrumentos e o VB têm de ser libertados, por esta ordem. Isto é feito através do método *instrumento.release()*. Se tal não for feito, o VB e os instrumentos chamados não serão libertados, ficando inacessíveis para futuras chamadas.

De referir que vários instrumentos podem ser chamados simultaneamente e, para cada um deles, assim como para o VB, é criada uma instância para o respectivo objecto, cuja referência corresponde a um endereço de memória. O resultado das instruções na Linha 2 e Linha 1 da Listagem 4.14 é:

- (...)PyVirtualBench object at 0x000001E7DEECAD20.
- (...)PyVirtualBench.PowerSupply object at 0x000001E7DEECB2F0;

No entanto, se um ficheiro for chamado várias vezes (como no caso da experiência da Lei de *Ohm*), uma nova instância do instrumento será sempre criada a cada

chamada. Além disso, se houver várias funções no mesmo ficheiro, os objetos criados (por exemplo, 0x000001E7DEECAD20) devem ser passados entre funções ou, alternativamente, o instrumento deve ser encerrado e reinicializado entre chamadas de funções.

Gráficos

Os gráficos apresentados são gerados com recurso às bibliotecas *NumPy* [172] e *Matplotlib* [174], amplamente utilizadas em *Python*. A *NumPy* é uma biblioteca fundamental para computação científica, permitindo a manipulação eficiente de *arrays* multidimensionais e fornecendo um vasto conjunto de funções matemáticas, estatísticas e de álgebra linear. No contexto da construção de gráficos, o *NumPy* é essencial na preparação e transformação dos dados a representar. O declive da recta obtido experimentalmente, no estudo da Lei de *Ohm*, representado na Listagem 4.16, foi calculado com recurso à biblioteca *SciPy*, que disponibiliza ferramentas avançadas de análise científica, incluindo ajustamento de curvas e complementa a *NumPy*, sobre a qual está construída.

```
1     slope, intercept, r_value, p_value, std_err = stats.
      linregress(voltage_measurements,
                  current_measurements)
```

Listagem 4.16: Cálculo do declive da recta

A visualização dos dados é realizada através da *Matplotlib*, uma biblioteca consolidada para criação de gráficos em *Python*. Esta permite gerar representações visuais, como gráficos de linhas, dispersão, histogramas, entre outros. Neste projeto, a *Matplotlib* é utilizada para representar de forma clara e interpretável os dados e resultados obtidos. A Listagem 4.17 ilustra a forma como se gera um gráfico experimental correspondente à Lei de *Ohm*.

```
1     plt.plot(voltage_measurements, current_measurements,
                  label='V Vs I', marker = 'o')
```

Listagem 4.17: Gráfico Corrente *vs* Tensão

Outro tipo de gráficos que são gerados são os diagramas de Bode, que representam a resposta em frequência dos filtros. A Listagem 4.18 ilustra a forma como são gerados os pontos das frequências para o gráfico de Bode. Neste caso, as frequências são geradas logaritmicamente, utilizando a função *logspace* da biblioteca *NumPy*.

```

1     num_points = int(np.log10(stop_freq / start_freq) *
2         points_per_decade)
3     frequencies = np.logspace(np.log10(start_freq), np.
4         log10(stop_freq), num=num_points)

```

Listagem 4.18: Filtros - Diagrama de *Bode*

As imagens geradas são gravadas na pasta “webserver/website/static/images/”, tal como indica o exemplo na Listagem 4.19.

```

1     plt.savefig("webserver/website/static/images/
2         ohm_graph.png")

```

Listagem 4.19: Gravação do gráfico

4.2.3 Interface WEB

Do ponto de vista do *software ou IDE*, e considerando a estrutura das experiências em termos de *design* e implementação, o estudo pode ser dividido em duas partes distintas: a primeira, que envolve a Lei de *Ohm*, apresenta um maior grau de complexidade, dado que há um número maior de parâmetros e o utilizador ou aluno tem um controle mais amplo sobre a experiência, já a segunda parte, que aborda os rectificadores e filtros, segue uma estrutura relativamente uniforme, aplicável a todas as experiências. Assim, nesta secção, apresenta-se um estudo que permite, de forma geral, compreender a componente gráfica - IDE - e a interacção dos utilizadores no controlo das experiências. Sempre que se considerar pertinente, serão destacados aspetos específicos e detalhados.

Comum a todas as experiências é a configuração inicial do VB. Esta configuração é necessária, uma vez que, antes de se iniciar o processo de medições, optou-se por activar a fonte de alimentação que alimenta os relés e os *drivers* e a fonte de alimentação composta pelo LM317 que alimenta os registos de deslocamento, tal como descrito na Secção 4.1.4. Desta forma, implementou-se nas páginas das experiências, um botão de “OK” - que habilita os selectores e configura a fonte do VB e “STOP/RESET” - que desabilita os selectores e desactiva as fontes enquanto a experiência está inactiva.

A verificação e detecção dos erros, Figura 4.19, acontece quando o utilizador tenta seleccionar um dos parâmetros antes de estes estarem habilitados ou, no caso dos rectificadores e filtros, colocar o valor da frequência fora do valor definido nas instruções. O alerta de erro é implementado nas páginas HTML das experiências, usando o método *alert()* do *JavaScript*.



Figura 4.19: Erro de selecção

Como mencionado na Secção 3.6.2, procurou-se manter a experiência de utilização e navegação o mais simples, prática e intuitiva possível. Além das páginas que compõem a base do site, representadas na Figura 4.16, há ainda a juntar as que permitem ao utilizador interagir com as experiências do LaRE. Especificamente, foram implementadas cinco páginas, correspondentes aos cinco circuitos definidos na Secção 3.2.

A navegação ficou dividida da seguinte forma:

- Autenticação;
 - Página inicial;
 - * Página introdutória da experiência;
 - Página de controle e realização da experiência.

A página de autenticação, representada na Figura 4.20, está implementada no ficheiro *auth.py*, função *login()* e os formulários estão implementados na página *login.html*, sendo que os dados de *login* e registo são guardados na directória *instance*, ficheiro *database.db*.

Figura 4.20: Página de *login*

Após o registo e *login* bem sucedido, é apresentada a página inicial, onde é feito um pequeno resumo do que é o LaRE e apresentado o menu de escolha das experiências. O menu de separadores verticais foi retirado do site *W3Schools* e modificado de acordo com as necessidades do projecto, tal como pode ser visto na Figura 4.21.



Figura 4.21: Página inicial

O modelo adoptado é uniforme para todas as experiências, apresentando o respectivo esquema e contextualização da actividade. Após a selecção da experiência, tanto as páginas introdutórias como as de controlo seguem a mesma estrutura de menus, mantendo o mesmo padrão de organização e navegação. A título de exemplo, as Figuras 4.22a e 4.22b ilustram, respetivamente, as páginas de introdução e controlo relativas à Lei de Ohm.

Figura 4.22: [Exemplo] Experiência Lei de Ohm

Lei de Ohm

Nesta experiência, optou-se por conceder liberdade de escolha e controlo aos utilizadores, o que representou um desafio à implementação. Em vez de permitir apenas a selecção do valor da resistência, com medições realizadas (automaticamente) por *software*, decidiu-se oferecer ao utilizador a possibilidade de escolher o valor da resistência e controlar as medições de tensão e corrente. Do ponto de vista pedagógico,

considerou-se mais benéfico que, neste caso, os alunos verifiquem os valores das grandezas medidas à medida que realizam as medições e avançam na experiência. Além disso, o resultado e o gráfico final serão independentes da ordem pela qual se efectuam as medições.

A Figura 4.23 ilustra a página de controlo da experiência da Lei de *Ohm*.



Figura 4.23: Lei de *Ohm* - Selecção dos parâmetros

A selecção dos valores da resistência e do U_{CC} é feita através de um formulário de selecção, feito em CSS e *JavaScript*, retirado do site *W3Schools* e modificado de acordo com as necessidades do projecto. Este formulário está implementado na página HTML da experiência. Como se pode observar pela Figura 4.23, a tensão medida no voltímetro é, efectivamente, a tensão aos terminais da fonte de tensão, U_{CC} e da resistência. Por razões pedagógicas e de coerência com o esquema, optou-se por medir e apresentar a tensão directamente nos terminais da resistência.

Como se observa na Figura 4.23, a tensão indicada pelo voltímetro corresponde à tensão presente entre os terminais da fonte de tensão U_{CC} e da resistência. Por razões pedagógicas e para manter a coerência com o esquema apresentado, optou-se por medir e representar a tensão directamente nos terminais da resistência. As medições só serão efectivamente realizadas e os valores apresentados, quando a opção “Medir tensão” e/ou “Medir corrente” forem seleccionadas. O utilizador dispõe de alguma flexibilidade na forma como realiza as medições (cinco de tensão e cinco de corrente), desde que mantenha a mesma ordem. Por exemplo, pode optar por medir todos os valores de tensão - desde o mais baixo ao mais alto - e, de seguida proceder da mesma forma com as medições de corrente. Após a conclusão das dez medições, torna-se possível seleccionar a opção “Gráfico” para visualizar o gráfico da experiência. Caso esta opção seja seleccionada antes da conclusão de todas as medições, o gráfico será apresentado com as medições disponíveis até ao momento, permitindo, ainda assim, a continuação normal da experiência.

Sendo assim, o procedimento para a realização da experiência é o seguinte:

1. Selecionar “OK” para activar a fonte do VB e alimentar os integrados;

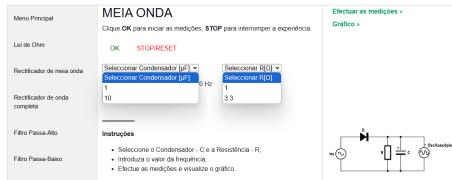
2. Escolher o valor da resistência;
3. Escolher o valor de U_{CC} ;
4. Efectuar cinco medições de tensão (“Medir tensão”) e cinco medições de corrente (“Medir corrente”);
5. Ver o gráfico resultante.
6. Seleccionar “STOP/RESET” para desactivar a fonte do VB.

Rectificador de meia onda e onda completa

Nestas duas experiências, pretende-se estudar e avaliar a diferença entre estes dois tipos de rectificadores, tanto ao nível da rectificação como da filtragem, nomeadamente no estudo da variação da tensão de *ripple*. A principal diferença, como foi referido na Secção 4.1.6, reside no valor da frequência. Enquanto que no rectificador de meia onda, o sinal de entrada é alimentado pelo gerador de sinal do *virtualbench*, o rectificador de onda completa, devido ao problema de massa já referenciado na Secção 4.1.4, é alimentado através de um transformador 230 V/8 V, com uma frequência de 50 Hz.

A Figura 4.24a ilustra a página de controlo da experiência do rectificador de meia onda. Os utilizadores podem seleccionar quatro valores para o termo RC, sendo que os valores de C estão definidos para 1 μF e 10 μF e a frequência varia entre 5 Hz e 2000 Hz.

 LaRE



(a) Rectificador de meia onda

 LaRE



(b) Rectificador de onda completa

Figura 4.24: Selecção de parâmetros

As medições e construção do gráfico são realizadas por *software*, baseadas nos valores seleccionados pelos utilizadores. Os resultados obtidos podem, então, ser comparados com o gráfico teórico, definido na Figura 3.11a ou pela Equação 3.3. Para o mesmo par RC, os utilizadores podem, ainda, variar a frequência e comparar os resultados obtidos.

Relativamente ao rectificador de onda completa, a Figura 4.24b apresenta a página de controlo da experiência, que é praticamente idêntica à do rectificador de meia onda, excepto pelo facto de a frequência não poder ser ajustada pelo utilizador. Os valores dos condensadores e resistências são os mesmos para ambas as experiências.

O procedimento para a realização da experiência é o seguinte:

1. Seleccionar “OK” para activar a fonte do VB e alimentar os integrados;
2. Escolher o valor da resistência;
3. Escolher o valor do condensador;
4. Efectuar as medições;
5. Ver o gráfico resultante;
6. Seleccionar “STOP/RESET” para desactivar a fonte do VB.

Filtros

As páginas dos filtros passa-baixo e passa-alto, são em tudo idênticas às dos rectificadores e estão representadas na Figura 4.25a e Figura 4.25b.

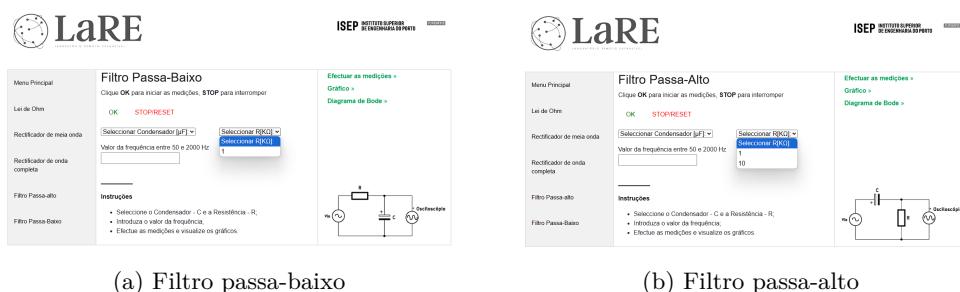


Figura 4.25: Selecção de parâmetros

Consoante a configuração do filtro, o utilizador escolhe entre dois condensadores ou duas resistências, representados no rectângulo tracejado cor-de-laranja, na Figura 4.13. Como já foi referido na Secção 4.1.6, os componentes dentro do rectângulo tracejado vermelho, representados na mesma figura, foram adicionados após a implementação dos rectificadores. Assim, quando se pretende estudar o filtro passa-baixo, o utilizador escolhe entre os dois condensadores (de saída) e se pretender estudar o passa-alto, escolhe entre as duas resistências (de saída). Eventualmente, poder-se-iam ter adicionado mais resistências/condensadores aos filtros, nomeadamente, no rectângulo tracejado vermelho, de forma a permitir uma maior versatilidade no estudo. No entanto, além de não existir o número suficiente de relés em contexto laboratorial, considerou-se que, desta forma, o estudo e os objectivos da experiência, ficariam provados. O intervalo de frequência mantém-se entre os 50 Hz e 2000 Hz. O procedimento para a realização da experiência é o seguinte:

1. Seleccionar “OK” para activar a fonte do VB e alimentar os integrados;
2. Escolher o valor do condensador - passa-baixo;

3. Escolher o valor da resistência - passa-alto;
4. Efectuar as medições;
5. Ver o gráfico resultante;
6. Ver o gráfico resultante da resposta em frequência;
7. Seleccionar “STOP/RESET” para desactivar a fonte do VB.

Capítulo 5

Resultados

“Newton’s third law. You’ve got to leave something behind”

— Cooper, *Interstellar*

Os testes foram realizados com o objetivo de validar a implementação do LaRE e verificar se os resultados obtidos correspondem aos esperados. Como forma de uniformizar conceitos, apesar de tanto as experiências desenvolvidas no LaRE como as realizadas na “placa branca” serem reais, designar-se-ão os testes efetuados na “placa branca” como experiências práticas ou valores práticos.

Sendo assim, a confrontação dos resultados obtidos no LaRE foi efetuada com recurso às experiências práticas, ao *MultisimLive* e aos valores teóricos previamente descritos na Secção 4.1.6. Para a análise dos resultados, serão apresentados um ou dois exemplos representativos por tipo de experiência, sendo que os restantes são obtidos de forma análoga. No caso específico da Lei de *Ohm*¹, há ainda a possibilidade de verificar os valores com recurso a um multímetro de bancada. As experiências podem ser realizadas com diferentes combinações e configurações:

- **Lei de Ohm:** três opções de estudo de resistências;
- **Rectificadores:** quatro combinações possíveis de resistências e condensadores para cada rectificador;

¹Uma vez que a versão grátsis *online* do *MultisimLive* não permite realizar a análise continua - *dc sweep* - esta análise fez-se utilizando o CircuitLab

- **Filtros:** duas combinações possíveis de resistências e condensadores para cada filtro.

5.1 Lei de *Ohm*

O objetivo desta experiência é determinar o valor de uma determinada resistência através do cálculo do declive da recta obtida no gráfico da tensão em função da corrente apresentado na Figura 3.8 e, assim, confirmar a Lei de *Ohm*.

5.1.1 Resultados experimentais

No LaRE o utilizador efectua cinco medições de cada grandeza (tensão e corrente), para uma das três resistências disponíveis. Na Figura 5.1 está representado o resultado de um par de medições para uma resistência de $1\text{ k}\Omega$. As restantes medições, em intervalos de 1 V até 5 V, são obtidas de forma análoga.

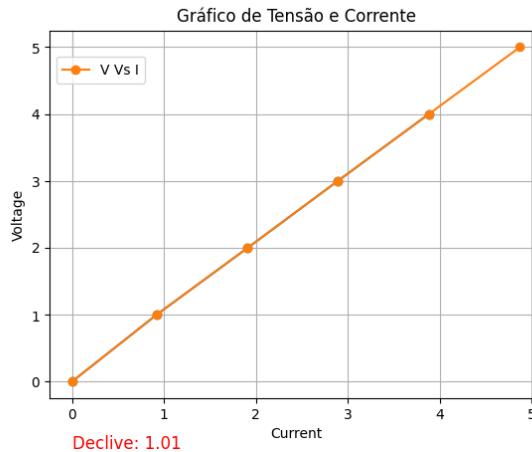


Figura 5.1: Medição prática

O valor real da resistência, obtida por medição directa, é de $998\text{ }\Omega$, estando dentro da tolerância que é de $\pm 5\%$. O erro associado aos instrumentos de medição pode ser considerado desprezável. De acordo com as especificações do modelo *VB-8012*[175], a precisão para medições de tensão em corrente contínua é:

- Escala de 1 V
 - Precisão garantida (1 ano): $\pm(0.015\% \text{ da leitura} \pm 0.005\% \text{ da faixa})$

Estes valores indicam que, para uma leitura de 1 V, o erro máximo estimado devido à precisão do instrumento seria de, aproximadamente $\pm 0.0002\text{ V}$, ou seja, $\pm 0.2\text{ mV}$. Portanto, a diferença entre a tensão fornecida pela fonte — 1 V — e os valores medidos — 0.98 V e 0.97 mA — deve-se, principalmente, à tolerância da resistência utilizada. Assim, conclui-se que os valores medidos se encontram dentro dos limites expectáveis, sendo perfeitamente aceitáveis face às tolerâncias envolvidas.

Figura 5.2: Gráfico da Lei de *Ohm* - 1 kΩ - LaRE

O gráfico U vs I , obtido para esta resistência é apresentado na Figura 5.2. O declive da recta, que representa a resistência, foi calculado e comparado com o valor real da resistência.

O erro relativo entre o valor teórico e o valor obtido no LaRE, pode ser calculado através da Equação 5.1:

$$\text{Erro Relativo} = \frac{|R_{real} - R_{obtido}|}{R_{real}} \times 100 \quad (5.1)$$

O erro relativo obtido é de, aproximadamente, 1.2 %, sendo um valor perfeitamente aceitável.

Os resultados da experiência prática, efectuados com a mesma resistência utilizada no LaRE, estão representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores práticos - Lei de *Ohm*

| Tensão (V) | Corrente (mA) | Resistência (kΩ) |
|------------|---------------|------------------|
| 0.998 | 0.998 | 1 |
| 1.99 | 1.99 | 1 |
| 2.99 | 2.99 | 1 |
| 3.99 | 3.99 | 1 |
| 4.99 | 4.99 | 1 |

Estes valores foram obtidos com recurso ao VB e demonstram que o valor da resistência, que corresponde ao declive da recta é constante, o que confirma a Lei de *Ohm*. A partir da Equação 5.1, o valor do erro relativo é inferior a 1 %.

Ainda assim e como forma de complementar a análise dos resultados, foram efectuados testes com o *Multisim*. A Figura 5.3 mostra o gráfico obtido.

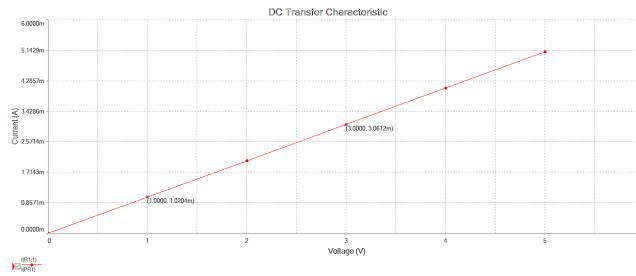


Figura 5.3: Multisim - Lei de Ohm

Analizando os valores é possível calcular o declive da recta, dado pela Equação 5.2:

$$m = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad (5.2)$$

O valor do declive, correspondente à resistência, obtido para estes simuladores é de $m_{\text{multisim}} \approx 0.980$. Tendo em conta que a escala do eixo do y está representada em mA, os valores das resistências surgem expressos em $k\Omega$, isto é, $R_{\text{multisim}} = 0.980 k\Omega$. Assim, aplicando a Equação 5.1 obtém-se um erro relativo inferior a 1%.

Verifica-se, através da análise dos gráficos, que os dados obtidos com o LaRE estão em concordância com os resultados simulados e com os valores práticos.

5.2 Rectificadores

As duas experiências foram implementadas com o objectivo de estudar e avaliar a tensão de *ripple* nos circuitos rectificadores de meia onda e onda completa, considerando as quatro combinações possíveis dos pares resistência/condensador. As formas de onda esperadas estão representadas na Figura 3.11a e Figura 3.12a sendo os valores teóricos da tensão de *ripple* determinados pela Equação 3.2 e pela Equação 3.5 - (ou Equação 3.3). Os utilizadores podem escolher uma das quatro combinações de resistência e condensador, sendo que no caso do rectificador de meia onda podem fazer variar a frequência entre 50 Hz e 2000 Hz mas no caso do rectificador de onda completa a frequência é de 50 Hz. Em ambas as experiências, os exemplos em análise far-se-ão com os seguintes valores: $R = 2.2 k\Omega$, $C = 100 \mu F$, $v_{in} = 6.6 V$ e $f = 50 Hz$.

5.2.1 Resultados experimentais [meia onda]

Para se determinar qual expressão a usar para calcular a tensão de *ripple*, é necessário verificar a condição descrita na Equação 5.3:

$$RC >> \frac{1}{f} \quad (5.3)$$

$$2.2 \text{ k}\Omega * 100 \mu\text{F} \gg \frac{1}{100} \quad (5.4)$$

Uma vez que esta condição se verifica, a expressão a utilizar para calcular a tensão de *ripple* teórica pode ser dada pela sua aproximação, representada pela Equação 3.3. O resultado obtido está representado na Equação 5.5:

$$U_{\text{ripple}} = \frac{6.6 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{50 \text{ Hz} * 2.2 \text{ k}\Omega * 100 \mu\text{F}} \approx 536.36 \text{ mV} \quad (5.5)$$

A Figura 5.4 apresenta a forma de onda da tensão de saída e o valor da tensão de *ripple* obtido no LaRE, que foi de 420 mV.

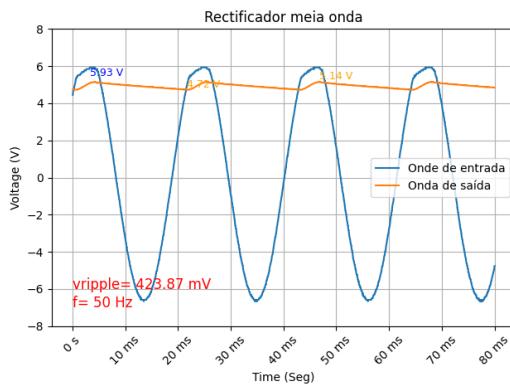


Figura 5.4: Tensão de *ripple* no LaRE - meia onda

As Figuras 5.5a e 5.5b representam, respectivamente, os resultados práticos e simulados. A tensão de *ripple* medida foi de 481 mV e 490.98 mV, respectivamente.

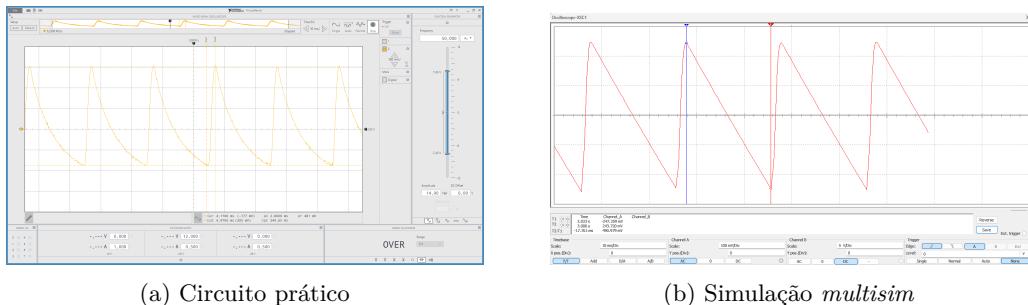


Figura 5.5: Valores experimentais e simulados - tensão de *ripple*

Os erros relativos obtidos foram de 20.1 % no LaRE, 10.32 % no circuito prático e 8.46 % na simulação. Esta discrepância relativamente ao valor teórico resulta de diversos fatores, sendo de destacar a simplificação inerente à expressão analítica utilizada, que assume componentes ideais e condições perfeitas — como resistência constante e condensador sem perdas [144].

A simulação, embora mais próxima da realidade, recorre igualmente a modelos ideais por omissão. É o caso dos condensadores no *Multisim*, que não incluem resistência série (ESR) nem indutância série (ESL)². Ainda assim, a simulação contempla fenómenos como as quedas de tensão nos diodos e os efeitos transitórios do circuito, o que a torna mais precisa do que o modelo teórico.

A maior discrepância observada nos resultados do LaRE pode ser justificada por erros no cálculo da tensão de *ripple*. Através da Figura 5.4 pode ver-se que a onda apresentada distorce ligeiramente nos picos positivos. Além disso, tal como nos valores obtidos na prática, as tolerâncias típicas dos condensadores electrolíticos são elevadas, sendo que, neste caso, atingem os 20%[176]. Outro factor que também condiciona o erro relativo são as baixas correntes nos diodos. Esta corrente segue uma relação exponencial com a tensão directa aplicada, tornando-se extremamente sensível a pequenas variações de tensão ou do parâmetro I_S . Nesta zona, fenómenos secundários como corrente de fuga, variações térmicas e limitações instrumentais assumem maior relevância e desviam o comportamento do diodo do modelo ideal [144].

Assim, as diferenças entre os vários métodos de obtenção de resultados são compreensíveis e enquadram-se no esperado, considerando as limitações e simplificações de cada abordagem.

5.2.2 Resultados experimentais [onda completa]

Uma vez que a condição dada pela Equação 5.3 se verifica para ambos os rectificadores, já que os valores de R , C e f são os mesmos, a expressão utilizada para calcular a tensão de *ripple* teórica é dada pela Equação 3.5. O valor teórico da tensão de *ripple* está representado na Equação 5.6:

$$U_{\text{ripple}} = \frac{6.6 \text{ V} - 1.4 \text{ V}}{2 * 50 \text{ Hz} * 2.2 \text{ k}\Omega * 100 \mu\text{F}} \approx 236.36 \text{ mV} \quad (5.6)$$

Antes do início dos testes, verificou-se a disponibilidade da ponte rectificadora utilizada no LaRE — modelo *B250C2300-1500* — na biblioteca de componentes do *Multisim*. Constatou-se que este componente não se encontra disponível no simulador. Optou-se, assim, por realizar testes complementares com uma ponte rectificadora construída a partir de diodos *1N4007* [169], disponíveis no *Multisim*. As medições foram efectuadas em contexto laboratorial, com os circuitos montados na “placa branca”. A Tabela 5.2 reúne todos os resultados dos testes complementares.

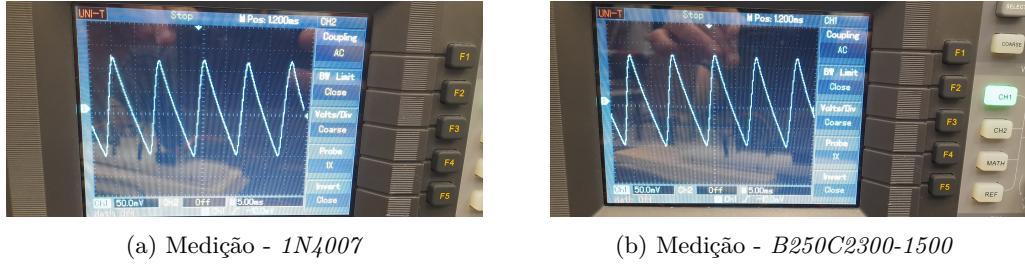
Apesar de se esperar que a tensão de *ripple* no circuito com a ponte *B250C2300-1500* fosse ligeiramente superior à observada com a ponte construída com diodos *1N4007*, os valores medidos no osciloscópio revelaram-se praticamente idênticos, como ilustrado na Figura 5.6. Esta pequena discrepancia pode ser atribuída a erros

²Uma análise às propriedades do condensador no *Multisim* revelou que estes são ideais, baseados em modelos SPICE simplificados, representados pela seguinte estrutura: *c%p %t1 %t2 #1 %v4?IC=#5%v:%v;*

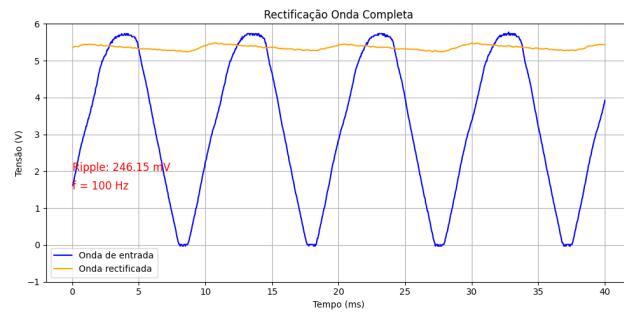
Tabela 5.2: Testes complementares - Pontes rectificadoras

| Transformador - $U_{out} = 6.7 \text{ V}$ | | |
|---|----------------|------------------------|
| | Ponte - 1N4007 | Ponte - B250C2300-1500 |
| $U_{Resistencia}$ | 5.5 V | 5.68 V |
| U_{Ripple} | 225 mV | 225 mV |
| U_{Diodo} | 0.55 V | 0.46 V |
| U_{Diodo} - medido no multímetro | 0.56 V | 0.49 V |

de leitura. Dado que as diferenças são reduzidas, com erros relativos inferiores a 4 %, pode concluir-se que os testes efectuados no *Multisim* com a ponte rectificadora constituída por quatro diodos 1N4007 não comprometem a análise, os objectivos nem as conclusões da experiência.

Figura 5.6: Medições práticas [complementares] *ripple*

Os resultados obtidos com o LaRE encontram-se representados na Figura 5.7, onde é possível observar a forma de onda da tensão de saída, bem como o valor correspondente da tensão de *ripple*.

Figura 5.7: Tensão de *ripple* no LaRE - onda completa

É importante referir que, embora ambas as formas de onda (entrada e saída) tenham sido adquiridas com os mesmos parâmetros de configuração — nomeadamente, a mesma frequência de amostragem e tempo de aquisição —, os sinais não foram captados em simultâneo. Este procedimento foi necessário devido à configuração desta experiência, em que a ligação comum de massas entre a entrada do transformador e

a saída do circuito impede a medição simultânea dos dois sinais com o VB, sob pena de provocar curto-círcito de massas. Assim, as medições tiveram de ser realizadas de forma sequencial, com reconfiguração dos relés entre cada aquisição. Ao reiniciar o osciloscópio, o sistema volta a aguardar pela condição de disparo (*trigger*), a qual pode ocorrer em pontos ligeiramente diferentes do ciclo da onda. Esta diferença no instante inicial da aquisição introduz um desfasamento temporal aparente entre os sinais apresentados, que não deve ser interpretado como um desfasamento real entre os circuitos, mas sim como uma consequência natural da aquisição faseada.

O erro relativo associado ao valor obtido no LaRE é inferior a 5 %, o que é perfeitamente aceitável.

Os testes efectuados no *multisim* com a ponte rectificadora constituída por 4 díodos *1N4007* apresentam um valor de *ripple* de 201 mV, conforme representado na Figura 5.8. O erro relativo é de 14.9 %, o que é aceitável, tendo em conta as condições de simulação, a distorção e ruído da onda e os componentes ideais utilizados, como é o caso, por exemplo, do condensador sem resistência série (ESR). Esta distorção pode comprometer a precisão da medição, dificultando a determinação rigorosa do valor real de *ripple*. Tal como já referido na análise à rectificação de meia onda, a elevada tolerância do condensador electrolítico e as correntes baixas nos díodos são factores que também condicionam o erro relativo. Assim, as diferenças observadas são compreensíveis e enquadram-se dentro do esperado.

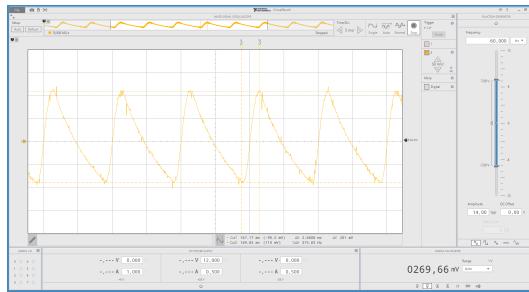


Figura 5.8: Tensão de *ripple* - *multisim* - onda completa

Comparando os resultados da tensão de *ripple* entre os dois rectificadores e considerando os diferentes testes, verifica-se que, nas mesmas condições, a tensão de *ripple* é superior no rectificador de meia onda, o que está de acordo com a teoria.

5.3 Filtros

Estas duas experiências foram realizadas com o objetivo de estudar a resposta em frequência dos filtros *RC*, nomeadamente nas configurações passa-alto e passa-baixo, resultantes das diferentes configurações entre as resistências e os condensadores. Os utilizadores podem variar a frequência entre 50 Hz e 80 000 Hz, analisando o comportamento da tensão de saída em função da frequência. A frequência de corte

é calculada através da Equação 3.6, sendo posteriormente comparada com os valores obtidos experimentalmente no diagrama de *Bode*. Adicionalmente, a atenuação da tensão de saída pode ser determinada através da Equação 3.7, ou expressa em dB utilizando a Equação 3.8.

5.3.1 Resultados experimentais [filtro passa-alto]

O circuito analisado será o filtro passa-alto, representado na Figura 3.13b e configurado com $R = 2.2\text{k}\Omega$ e $C = 10\text{nF}$. Os gráficos que se esperam obter estão representados na Figura 3.14b. Para os restantes valores e configurações, os resultados poderão ser obtidos de forma análoga e a frequência de corte teórica é dada pela Equação 3.6, sendo que o valor obtido é de 7234.32 Hz.

Os valores experimentais obtidos com o LaRE relativamente à análise do diagrama de *Bode*, estão representados na Figura 5.9, sendo que o valor aproximado da frequência de corte é de 7071.1 Hz. O erro relativo é de, aproximadamente, 2.26 %. Este valor é perfeitamente aceitável, tendo em conta a tolerância dos componentes utilizados, os erros de medição e aproximações.

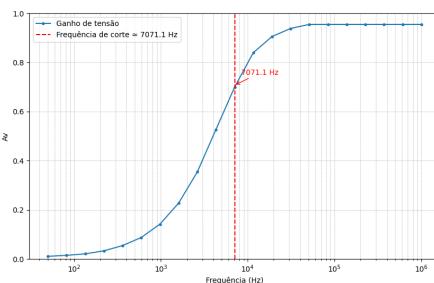


Figura 5.9: Frequência de corte - filtro passa-alto - Diagrama de *Bode*

Os resultados complementares obtidos com base na simulação efectuada no *multisim*, já que não é possível gerar o diagrama de *Bode* do circuito prático, representados na Figura 5.10, mostram que a frequência de corte é de 7282.4 Hz. O erro relativo é de 0.67 %, o que é praticamente desprezável.

O valor da frequência de corte também pode ser obtido através da análise dos gráficos que representam a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Como se pode ver pela análise da Figura 5.11, o ganho a altas frequências é praticamente unitário, estando em consonância com os valores obtidos no diagrama de *Bode*, representado na Figura 5.9.

Comparando estes valores com os obtidos através do circuito prático, representados na Figura 5.12a e Figura 5.12b do circuito simulado no *multisim*, verifica-se que os valores obtidos são praticamente iguais, podendo ser considerado, com segurança, que em ambos os casos o ganho de tensão é unitário.

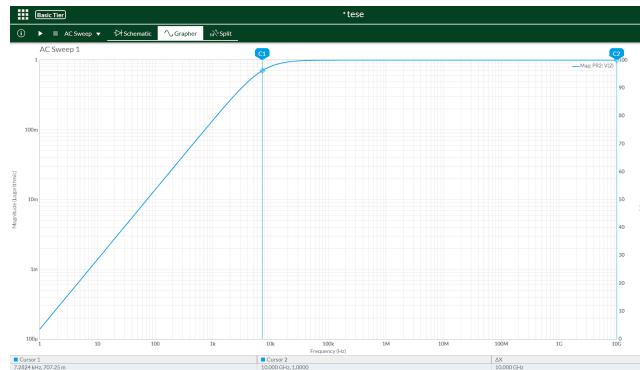


Figura 5.10: Frequência de corte - *multisim* - Diagrama de *Bode*

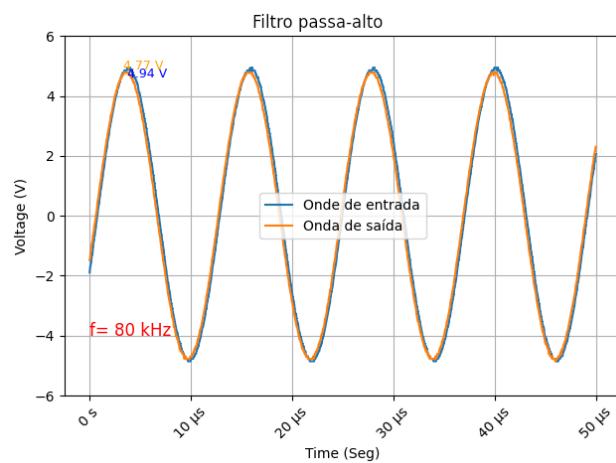
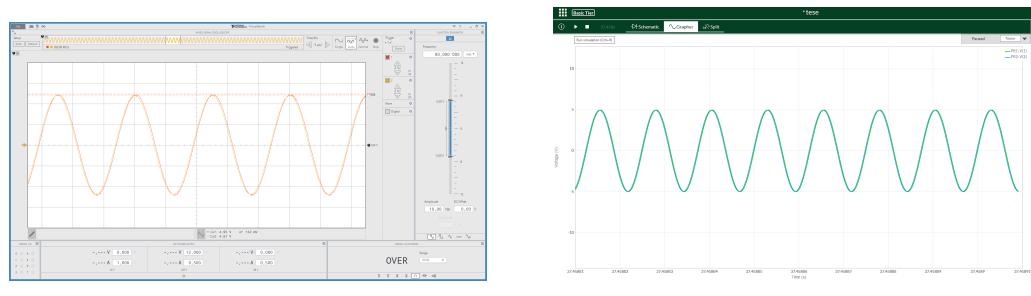


Figura 5.11: v_{out} vs v_{in} LaRE



(a) Circuito prático

(b) Simulação *multisim*

Figura 5.12: Valores práticos e simulados - v_{out} vs v_{in}

Relativamente à análise da frequência de corte, representado na Figura 5.13, o valor obtido para o LaRE é de 7230 Hz, o que corresponde a um erro relativo menor que 1 %.

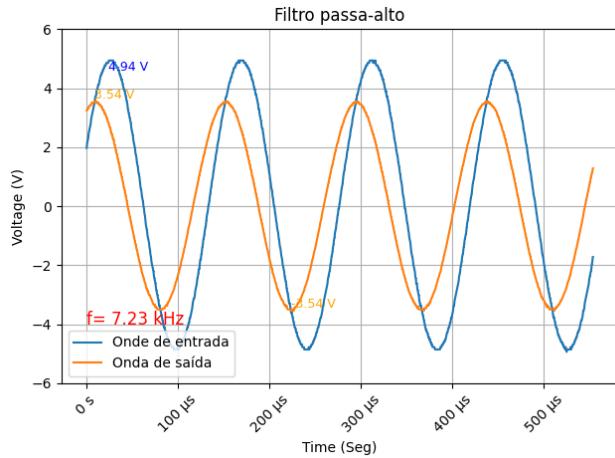


Figura 5.13: Frequência de corte - LaRE

O circuito prático apresenta uma frequência de corte de 7000 Hz, com um erro relativo de 3.24 %, enquanto a simulação no *Multisim* apresenta 7300 Hz, com um erro ainda mais reduzido de 0.9 %. Estes desvios podem ser considerados baixos e encontram-se dentro de margens aceitáveis, tendo em conta as limitações práticas do circuito real, como tolerâncias dos componentes, ruído e eventuais imprecisões nas medições. O valor obtido na simulação, por outro lado, está mais próximo do valor teórico, o que é expectável dado que os modelos usados assumem, geralmente, componentes ideais ou com parâmetros controlados.

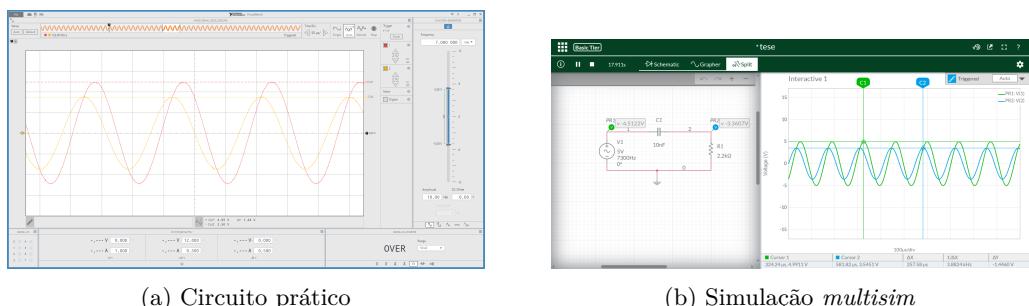


Figura 5.14: Valores experimentais reais e simulados - frequência de corte - v_{out} vs v_{in}

Capítulo 6

Conclusões

“In Case I Don’t See Ya, Good Afternoon, Good Evening and Goodnight”

— Truman Burbank, *The Truman Show*

O principal objectivo desta dissertação foi o desenvolvimento de um laboratório remoto para o ensino da Electrónica, concebido como uma alternativa viável ao VISIR, com o compromisso adicional de constituir um projecto *open-source*, acessível a qualquer instituição de ensino, independentemente da sua localização geográfica. Este objectivo foi plenamente atingido, tendo sido concretizada a construção da matriz de placas LaRE, elemento central do sistema, cuja especificação técnica se encontra detalhada no *datasheet* apresentado no Anexo A. Esta matriz permite o controlo remoto das experiências com base numa arquitectura controlada por *software* e sem dependência de software proprietário.

Um segundo objectivo consistiu em garantir que o LaRE pudesse ser utilizado sem dependência de licenças pagas, ultrapassando as limitações impostas por soluções existentes como o VISIR, cujo funcionamento depende do LabVIEW — um *software* proprietário, conforme discutido na Secção 3.1, que restringe o acesso a instituições sem capacidade para adquirir as respectivas licenças. Este objectivo foi igualmente cumprido, mediante a adopção de soluções baseadas em software livre e plataformas de *hardware* livres. Promove-se, dessa forma, o acesso universal e equitativo a recursos de ensino remoto de Electrónica, contribuindo para a inclusão de instituições com recursos mais limitados e reforçando o carácter aberto e expansível do sistema desenvolvido. Pretendeu-se assegurar, também, que todo o sistema

pudesse ser executado em plataformas livres e de baixo custo, nomeadamente no *Raspberry Pi*, com recurso exclusivo a sistemas operativos baseados em *Linux*. Este objectivo não foi integralmente cumprido, não por insuficiência do desenvolvimento realizado, mas devido à incompatibilidade da biblioteca *pyVirtualBench* com arquitecturas ARM e ambientes *Linux*, o que inviabilizou a sua execução directa no *Raspberry Pi*. Como solução alternativa, foi adoptada uma arquitectura em que um portátil com sistema *Windows* e suporte para a referida biblioteca estabelece a ligação com VB, processando os dados e transmitindo-os ao *Raspberry Pi*, que, por sua vez, gera a comunicação com o LaRE. Apesar deste desvio da intenção inicial, a solução revelou-se funcional e mantém os princípios de modularidade e interoperabilidade do sistema, podendo ser ajustada futuramente com a evolução da compatibilidade entre bibliotecas e plataformas livres.

Por fim, procurou-se assegurar que o LaRE fosse um laboratório remoto expansível e adaptável a diferentes contextos pedagógicos. Este objectivo foi globalmente atingido atingido: embora a arquitectura modular desenvolvida permita a futura integração de novos módulos e funcionalidades, a actual implementação cobre apenas um conjunto básico de experiências. No entanto, o desenho aberto do sistema e a documentação produzida oferecem condições para que futuras versões sejam estendidas com facilidade.

Neste contexto, o sistema desenvolvido representa um primeiro passo funcional nesta direcção, configurando-se como um protótipo plenamente operativo, mas que ainda oferece amplo espaço para aperfeiçoamentos e evolução futura. A sua arquitectura modular e o carácter aberto do código permitem que seja expandido, adaptado a diferentes contextos pedagógicos e enriquecido com novas funcionalidades ao longo do tempo. Nesse sentido, o trabalho aqui apresentado constitui uma base sólida e adaptável, que poderá servir de ponto de partida para o desenvolvimento de futuras soluções no domínio dos laboratórios remotos.

6.1 Limitações e trabalho futuro

Embora o sistema desenvolvido tenha atingido os principais objectivos propostos, algumas limitações e desafios foram identificados ao longo do processo. A principal limitação reside na incompatibilidade da biblioteca *pyVirtualBench*, que, como referido no capítulo anterior, impede a execução completa do sistema em plataformas como o *Raspberry Pi*. Esta restrição compromete a portabilidade e a flexibilidade do LaRE. Assim, um passo fundamental rumo à total liberdade e gratuidade do projecto passaria pelo desenvolvimento da compatibilidade da *pyVirtualBench* com arquitecturas ARM e sistemas operativos baseados em *Linux*.

Apesar de a arquitectura modular permitir a futura adição de novos módulos e experiências, a actual implementação abrange apenas um conjunto básico. A

expansibilidade do sistema está assegurada, mas levanta questões de ordem *software* e/ou *hardware*. Tal como está concebido, a *string* de controlo utilizada para activar os relés varia consoante a experiência: no caso da Lei de *Ohm*, é composta por 8 *bits*; nas experiências de rectificação e filtragem, são necessários 13 *bits*, correspondendo ao número de relés a comandar. No LaRE, optou-se por utilizar um conjunto de cinco pinos de controlo dedicados por placa, como apresentado na Tabela 3.2.

No entanto, a adição de novas experiências, ou o aumento do número de relés por experiência, exigiria o ajuste da *string* de controlo, com o risco de esta se tornar demasiado longa e a transmissão de dados excessivamente lenta. Para contornar esta limitação sem modificações de fundo no *hardware*, uma abordagem possível seria acrescentar duas ligações físicas à placa do *Raspberry Pi*, activando dois pinos adicionais dedicados ao \overline{OE} e ao *SER*, ambos já disponíveis. Esta actualização seria relativamente simples em termos de programação. Numa perspectiva mais abrangente, os esquemas e as placas poderiam ser redesenhados para permitir a expansão modular do sistema, sem necessidade de cablagens adicionais. Por exemplo, todos os pinos dos registos poderiam permanecer partilhados, com excepção do \overline{OE} , que seria ligado ao pino respectivo através de um *jumper*¹.

Neste protótipo, o IDE foi implementado com o objetivo de ser o mais leve, simples e direto possível. No entanto, há ainda espaço para atualizações e melhorias que proporcionem uma experiência ainda mais fluida, dinâmica e amigável. Nesta fase do desenvolvimento, o utilizador não tem informação sobre o estado dos gráficos; por isso, a implementação de um sistema de *feedback* visual poderia melhorar significativamente a experiência do utilizador. Além disso, a adição de funcionalidades como a possibilidade de guardar os gráficos gerados e a exportação dos dados recolhidos para formatos como *CSV* ou *Excel* poderia aumentar a utilidade do IDE.

Outra melhoria prende-se com o *Flask*, que, apesar de ser uma solução leve e eficaz para o desenvolvimento de aplicações *web*, pode não ser a mais adequada para projetos de maiores dimensões e que requeiram mais funcionalidades [160, 159]. Sendo este o caso, deveria ser considerado um estudo sobre o *Django* ou mesmo o *FastAPI*. Para além da escolha do *framework*, poderá também ser vantajosa a implementação de um sistema de autenticação e gestão de utilizadores, permitindo que diferentes alunos ou utilizadores accedam ao LaRE com as suas próprias credenciais, aumentando, desta forma, a segurança do sistema.

¹Poderia colocar-se a questão de um único pino do *Raspberry Pi* alimentar simultaneamente vários registos de deslocamento, uma vez que as saídas destes são controladas através do pino \overline{OE} . No entanto, os circuitos integrados 74HC595 são destinados a aplicações *CMOS* e, em condições normais de operação, apresentam uma corrente de entrada típica da ordem de apenas 1 μA [152], o que torna este tipo de ligação perfeitamente segura do ponto de vista elétrico.

Referências

- [1] “What is arduino? | arduino.” <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. (Accessed on 06/30/2024). [Citado na página xvii]
- [2] J. Matias, *Cursos Profissionais - Eletricidade e Eletrónica, Vol. 3.* Didáctica Editora, 2011. [Citado nas páginas xvii e xix]
- [3] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, “Industry 4.0 and industry 5.0— inception, conception and perception,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 61, pp. 530–535, 2021. [Citado na página xviii]
- [4] “The python tutorial — python 3.12.4 documentation.” <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado nas páginas xviii e 62]
- [5] “Teach, learn, and make with the raspberry pi foundation.” <https://www.raspberrypi.org/>. (Accessed on 06/30/2024). [Citado na página xix]
- [6] “Raspberry pi.” <https://www.raspberrypi.com/>. (Accessed on 06/30/2024). [Citado na página xix]
- [7] “W3c.” <https://www.w3.org/>. (Accessed on 08/03/2024). [Citado na página xix]
- [8] A. Hofstein, *The Role of Laboratory in Science Teaching and Learning*, pp. 357–368. 01 2017. [Citado nas páginas 1, 17 e 18]
- [9] J. R. Brinson, “Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research,” *Computers & Education*, vol. 87, pp. 218–237, 2015. [Citado nas páginas 1, 18, 19, 21 e 31]
- [10] L. Feisel and A. Rosa, “The role of the laboratory in undergraduate engineering education,” *Journal of Engineering Education*, vol. 94, 01 2005. [Citado na página 1]
- [11] J. E. Corder, S. K. Esche, C. Chassapis, J. Ma, and J. V. Nickerson, “Process and learning outcomes from remotely-operated, simulated, and hands-on student laboratories,” *Computers & Education*, vol. 57, no. 3, pp. 2054–2067, 2011. [Citado nas páginas 2 e 31]

- [12] “Virtual instruments systems in reality - visir+ - home.” <https://www2.isep.ipp.pt/visir/>. (Accessed on 06/29/2024). [Citado na página 2]
- [13] J. Cross, “An informal history of elearning,” *on The Horizon*, vol. 12, pp. 103–110, 09 2004. [Citado nas páginas 6 e 12]
- [14] OECD, *Using Digital Technologies for Early Education during COVID-19*. OECD, 2021. [Citado na página 6]
- [15] “Resolução do Conselho de Ministros nº 30/2020.” [Citado na página 6]
- [16] “Capacitação digital das escolas.” <https://digital.dge.mec.pt/>. (Accessed on 02/26/2023). [Citado na página 6]
- [17] Broadband Commission, “The state of broadband advocacy targets 2025,” 2025. Tradução não oficial: Esta tradução não foi criada pela União Internacional das Telecomunicações (ITU). Nem a ITU é responsável pelo conteúdo ou exatidão desta tradução. A edição original em inglês é a versão autêntica. [Citado na página 6]
- [18] International Telecommunication Union, “Facts and figures 2024 - internet use,” 2024. Tradução não oficial: Esta tradução não foi criada pela União Internacional das Telecomunicações (ITU). Nem a ITU é responsável pelo conteúdo ou exatidão desta tradução. A edição original em inglês é a versão autêntica. [Citado nas páginas ix, 6 e 7]
- [19] A. Sepúlveda, “The digital transformation of education: Connecting schools, empowering learners - broadband commission.” <https://broadbandcommission.org/publication/the-digital-transformation-of-education/>. (Accessed on 02/26/2023). [Citado na página 7]
- [20] European Commission, “Digital decade 2025 country reports,” 2024. Dados retirados de tabela não numerada na página 1. [Citado na página 7]
- [21] ILO, “Youth & COVID-19: Impacts on jobs, education, rights and mental well-being,” report, European Commission, Aug. 2020. [Citado nas páginas 7 e 8]
- [22] “290 million students out of school due to COVID-19: UNESCO releases first global numbers and mobilizes response | UNESCO.” www.unesco.org/en/articles/290-million-students-out-school-due-covid-19-unesco-releases-first-global-numbers-and-mobilizes. [Citado na página 8]
- [23] “Multisim Live Online Circuit Simulator,” July 2024. [Online; accessed 6. Jul. 2024]. [Citado nas páginas 8, 18, 22, 23, 28 e 29]

- [24] P. Falstad, “Circuit Simulator Applet,” Feb. 2024. [Online; accessed 7. Jul. 2024]. [Citado nas páginas ix, 8, 18, 22, 23 e 29]
- [25] “Covid-19 teve impacto negativo na educação de 70% dos jovens.” www.dn.pt/mundo/covid-19-teve-impacto-negativo-na-educacao-de-70-dos-jovens-12513822.html, aug 2020. (Accessed on 03/08/2023). [Citado na página 9]
- [26] J. E. com Lusa, “Prr. entrega de computadores a alunos tem-se “revelado muito difícil”, indica relatório,” 2 2023. [Online; accessed 2025-07-07]. [Citado na página 9]
- [27] Executive Digest, “Problemas nos kits digitais das escolas: Milhares de alunos e professores sem direito a hotspots de internet,” 2024. Consultado em julho de 2025. [Citado na página 9]
- [28] “Home - incode 2030.” <https://www.incode2030.gov.pt/>. (Accessed on 06/19/2024). [Citado na página 9]
- [29] D.-G. de Estatísticas da Educação e Ciência, “Observatório - observatório das competências digitais.” [Online; accessed 2025-07-08]. [Citado na página 10]
- [30] C. N. de Acompanhamento do Plano de Recuperação e Resiliência, “Relatório de acompanhamento do plano de recuperação e resiliência - junho 2025,” junho 2025. [Online; accessed 2025-07-07]. [Citado na página 10]
- [31] P. Wastiau, J. Looney, and M. Laanpere, “Portugal’s digital transition strategy for education.” <http://www.eun.org/documents/411753/11183389/Rapport-Case-Study-Portugal.pdf>, junho 2024. Online; consultado em 9 de julho de 2025. [Citado na página 10]
- [32] OECD, *The State of School Education*. OECD, 2021. [Citado nas páginas 10 e 11]
- [33] R. Steve, “What is iot ? everything you need to know about the internet of things right now.,” 2018. [Citado na página 11]
- [34] “The state of education – one year into covid - oecd education and skills today.” <https://oecdedutoday.com/state-of-education-one-year-into-covid/>. (Accessed on 02/26/2023). [Citado na página 11]
- [35] “Digital education initiatives | european education area.” <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/about-digital-education>. (Accessed on 03/04/2023). [Citado na página 11]
- [36] “Transição digital - prr - recuperar portugal.” <https://recuperarportugal.gov.pt/transicao-digital/>. (Accessed on 06/19/2024). [Citado na página 11]

- [37] J. Magano, A. Castro, and C. Vaz de Carvalho, “O e-learning no ensino superior: um caso de estudo,” vol. 1, pp. 79–92, 05 2008. [Citado na página 12]
- [38] M. J. Gomes, “E-learning: reflexões em torno do conceito,” in *E-learning: reflexões em torno do conceito*, Universidade do Minho. Centro de Competência do Projecto Nónio Século XXI, May 2005. Accepted: 2005-09-13T16:07:10Z. [Citado nas páginas 12 e 13]
- [39] “Convite à apresentação de propostas dg eac/46/02 — acções preparatórias e inovadoras 2002/b — e-learning,” Jul 2002. [Citado na página 13]
- [40] UNESCO, “Glossary article: Stem.” <https://unevoc.unesco.org/home/Glossary+article:+STEM>. (Accessed on 03/14/2023). [Citado na página 14]
- [41] H. B. Gonzalez and J. J. Kuenzi, “The u.s. science and engineering workforce: Recent, current, and projected employment, wages, and unemployment,” 2012. [Online; consultado em 16 de Julho de 2025]. [Citado na página 14]
- [42] Acola, “2024 acola annual report – acola,” 3 2024. [Online; accessed 2025-07-16]. [Citado na página 14]
- [43] J. Rothwell, “The hidden stem economy,” 2013. [Accessed on 03/14/2023]. [Citado na página 14]
- [44] M. Sanders, “Ttt+stem+article_1.pdf.” http://esdstem.pbworks.com/f/TTT+STEM+Article_1.pdf. (Accessed on 03/14/2023). [Citado na página 14]
- [45] OECD, *PISA 2022 Results (Volume II): Learning During - and From - Disruption*. Paris: OECD Publishing, 2023. Capítulo 5: Investments in a solid foundation for learning and well-being. [Citado na página 15]
- [46] “O que falta a portugal para ter um sistema de educação de sucesso?” <https://www.dn.pt/pais/o-que-falta-a-portugal-para-ter-um-sistema-de-educacao-de-sucesso-12777334.html>. (Accessed on 04/02/2023). [Citado na página 15]
- [47] “Falta de investimento na educação põe escola pública em risco: problemas rebentam um pouco por todo o lado e são cada vez mais graves! - fenprof.” <https://www.fenprof.pt/falta-de-investimento-na-educacao-poe-escola-publica-em-risco-problemas-rebentam-um-pouco-por-todo-o-lado-e-sao-cada-vez-mais-graves>. (Accessed on 04/02/2023). [Citado na página 15]
- [48] “O (des)investimento na educação em portugal.” <https://www.msedu.pt/2020/12/o-desinvestimento-na-educacao-em.html>. (Accessed on 04/02/2023). [Citado na página 15]

- [49] “Edustat - portugal gasta menos em educação do que há 20 anos.” <https://www.edustat.pt/detalhes-infostat?ID=14>. (Accessed on 04/02/2023). [Citado na página 15]
- [50] “Portugal, o país menos educado da união europeia – observador.” <https://observador.pt/opiniao/portugal-o-pais-menos-educado-da-uniao-europeia/>. (Accessed on 04/02/2023). [Citado na página 15]
- [51] OECD, *PISA 2018 Results (Volume V): Effective Policies, Successful Schools*. Paris: OECD Publishing, 2020. Capítulo 4: Teachers and support staff. [Citado na página 15]
- [52] Cedefop, *Profissões com défice e excesso de competências na Europa*. Publications Officeeg, 2016. [Citado na página 15]
- [53] Comissão Europeia, “Portugal — relatório da década digital 2024,” 2024. Consultado em julho de 2025. [Citado na página 15]
- [54] “Pandemia acentuou desigualdades na saúde, educação e no trabalho, confirma estudo,” July 2024. [Online; accessed 3. Jul. 2024]. [Citado na página 15]
- [55] R. B. Correia, “Ofap-efeitos-da-pandemia-digital-14.pdf.” <http://ofap.ics.ulisboa.pt/wp-content/uploads/2020/12/OFAP-Efeitos-da-pandemia-Digital-14.pdf>, 2020. (Accessed on 06/30/2024). [Citado na página 15]
- [56] A. Oladejo and A. Ebisin, “Virtual laboratory: An alternative laboratory for science teaching and learning,” *Journal of Pure & Applied Sciences*, vol. 3, pp. 82 – 91, 10 2021. [Citado nas páginas 16 e 21]
- [57] Pearson, “The global learner survey,” Agosto 2020. [Online; accessed 2025-07-11]. [Citado na página 16]
- [58] “Uma dificuldade nas nossas universidades é a falta de financiamento.” <https://www.dn.pt/vida-e-futuro/uma-dificuldade-nas-nossas-universidades-e-a-falta-de-financiamento-9574558.html>. (Accessed on 03/28/2023). [Citado na página 16]
- [59] “Financiamento do ensino profissional - fenprof.” <https://www.fenprof.pt/financiamento-do-ensino-profissional>. (Accessed on 03/28/2023). [Citado na página 16]
- [60] “Educação: financiar para uma melhor aprendizagem – observador.” <https://observador.pt/opiniao/educacao-financiar-para-uma-melhor-aprendizagem/>. (Accessed on 03/28/2023). [Citado na página 16]

- [61] L. Cerdeira, C. B., M. D. L. Machado-Taylor, and R. Gomes, “A fuga de cérebros em portugal: Hipóteses explicativas,” *Revista Brasileira de Administração e Educação*, vol. 31, pp. 409–418, 01 2015. [Citado na página 16]
- [62] Y. Fan, A. Evangelista, and V. Indumathi, “Evaluation of remote or virtual laboratories in e-learning engineering courses,” in *2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pp. 136–143, 2021. [Citado nas páginas 17 e 32]
- [63] ANQEP, “ANQEP - Cursos Profissionais,” July 2024. [Online; accessed 4. Jul. 2024]. [Citado na página 18]
- [64] C. Viegas, A. Pavani, N. Lima, A. Marques, I. Pozzo, E. Dobboletta, V. Atencia, D. Barreto, F. Calliari, A. Fidalgo, D. Lima, G. Temporão, and G. Alves, “Impact of a remote lab on teaching practices and student learning,” *Computers & Education*, vol. 126, pp. 201–216, 2018. [Citado nas páginas 19 e 31]
- [65] L. F. Zapata-Rivera and M. Larrondo Petrie, “Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments,” *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 12, pp. 14–21, 09 2016. [Citado na página 19]
- [66] R. Heradio, L. de la Torre, and S. Dormido, “Virtual and remote labs in control education: A survey,” *Annual Reviews in Control*, vol. 42, pp. 1–10, 2016. [Citado nas páginas ix, 19, 20, 22, 25 e 33]
- [67] V. Potkonjak, M. Gardner, V. Callaghan, P. Mattila, C. Guetl, V. M. Petrović, and K. Jovanović, “Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review,” *Computers & Education*, vol. 95, pp. 309–327, 2016. [Citado nas páginas 19, 25 e 27]
- [68] A. Hofstein and V. Lunetta, “The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century,” *Science Education*, vol. 88, pp. 28 – 54, 01 2004. [Citado na página 19]
- [69] D. Zutin, M. Auer, C. Maier, and M. Niederstatter, “Lab2go — a repository to locate educational online laboratories,” pp. 1741 – 1746, 05 2010. Citado Zapata-Rivera, Luis Felipe and Larrondo Petrie, María. [Citado nas páginas ix, 20 e 21]
- [70] L. F. Zapata-Rivera and M. Larrondo Petrie, “Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments,” *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 12, pp. 14–21, 09 2016. [Citado na página 20]

- [71] E. EMaster, “Por que os laboratórios virtuais são essenciais na educação moderna?,” *EMaster Cloud e Security*, May 2024. [Citado na página 21]
- [72] “Tinkercad - From mind to design in minutes,” July 2024. [Online; accessed 8. Jul. 2024]. [Citado nas páginas 22 e 25]
- [73] A. Faiña, “Learning hands-on electronics from home: A simulator for fritzing,” 06 2022. [Citado na página 23]
- [74] Fritzing, “Fritzing,” July 2024. [Online; accessed 7. Jul. 2024]. [Citado nas páginas 23 e 25]
- [75] A. Knörig, R. Wettach, and J. Cohen, “Fritzing: a tool for advancing electronic prototyping for designers,” *ResearchGate*, pp. 351–358, Feb. 2009. [Citado na página 23]
- [76] C. Chan and W. Fok, “Evaluating learning experiences in virtual laboratory training through student perceptions: a case study in electrical and electronic engineering at the university of hong kong.” <https://hub.hku.hk/bitstream/10722/124702/1/content.pdf>. (Accessed on 04/11/2023). [Citado na página 23]
- [77] B. Heying, D. Kejie, and J. Li, “Application multisim to virtual laboratory for experiment teaching,” in *2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, pp. 1–4, Dec 2010. [Citado na página 23]
- [78] P. Umenne and T. Hlalele, “Evaluation of the effectiveness of virtual laboratory’s for electronics in the open distance learning context,” pp. 1–5, 08 2020. [Citado na página 23]
- [79] “RoboParty,” July 2024. [Online; accessed 5. Jul. 2024]. [Citado na página 24]
- [80] “Festival Nacional de Robótica,” July 2024. [Online; accessed 5. Jul. 2024]. [Citado na página 24]
- [81] “11.ª edição do CanSat Portugal,” July 2024. [Online; accessed 5. Jul. 2024]. [Citado na página 24]
- [82] R. Yoder, “An arduino-based alternative to the traditional electronics laboratory,” pp. 107–110, 11 2015. [Citado na página 25]
- [83] O. H. Graven and J. Bjørk, “The use of an arduino pocket lab to increase motivation in electrical engineering students for programming,” in *2016 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, pp. 239–243, 2016. [Citado na página 25]

- [84] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Blazquez, F. García-Loro, S. Martin, C. Perez, and M. Castro, “Arduino as an educational tool to introduce robotics,” in *2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, pp. 1–8, 2018. [Citado na página 25]
- [85] I. Marzoli, N. Rizza, A. Saltarelli, and E. Sampaolesi, *Arduino: From Physics to Robotics*. Jan. 2021. [Citado na página 25]
- [86] “Wokwi - Online ESP32, STM32, Arduino Simulator,” July 2024. [Online; accessed 8. Jul. 2024]. [Citado na página 26]
- [87] I. Agafonov, “Web browser electric circuit simulators for education,” 05 2018. [Citado na página 26]
- [88] R. Scheckler, “Virtual labs: A substitute for traditional labs?,” *The International journal of developmental biology*, vol. 47, pp. 231–6, 02 2003. [Citado na página 27]
- [89] T. Lynch and I. Ghergulescu, “Review of virtual labs as the emerging technologies for teaching stem subjects,” pp. 6082–6091, 03 2017. [Citado na página 27]
- [90] “Blog emaster | por que os laboratórios virtuais são essenciais na educação.” <https://emaster.cloud/educacao/laboratorios-virtuais-na-educacao/>. (Accessed on 07/06/2024). [Citado na página 27]
- [91] “Advantages and Disadvantages of Virtual Laboratory,” June 2023. [Online; accessed 6. Jul. 2024]. [Citado na página 27]
- [92] B. Gherasim, “Virtual lab – advantages and disadvantages – edict,” 12 2023. [Citado na página 27]
- [93] Dr. I. Ghergulescu, “Review Of Virtual Labs As The Emerging Technologies For Teaching Stem Subjects - Adaptemy,” *Adaptemy*, Feb. 2019. [Citado na página 27]
- [94] S. Mandal, “Some important simulation software tools for a student of electronics engineering,” *Global Journal on Advancement in Engineering and Science*, vol. 3, pp. 1–8, 01 2017. [Citado na página 29]
- [95] B. Heying, D. Kejie, and J. Li, “Application multisim to virtual laboratory for experiment teaching,” in *2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, pp. 1–4, Dec 2010. [Citado na página 29]
- [96] “Licensing,” Mar. 2011. [Online; accessed 7. Jul. 2024]. [Citado na página 29]

- [97] “Math, Physics, and Engineering Applets,” Feb. 2023. [Online; accessed 8. Jul. 2024]. [Citado na página 29]
- [98] J. B. da Silva, L. R. Machado, S. M. Sommer Bilessimo, and I. N. da Silva, “Remote teaching of electrical circuits: proposal for the use of online laboratories in secondary education,” in *2021 World Engineering Education Forum/Global Engineering Deans Council (WEEF/GEDC)*, pp. 594–600, Nov 2021. [Citado na página 29]
- [99] M. A. Marques, M. C. Viegas, M. C. Costa-Lobo, A. V. Fidalgo, G. R. Alves, J. S. Rocha, and I. Gustavsson, “How remote labs impact on course outcomes: Various practices using visir,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 57, no. 3, pp. 151–159, 2014. [Citado nas páginas 31, 32 e 35]
- [100] LabsLand, “Labsland - home,” n.d. [Online; consultado em 15 de Julho de 2025]. [Citado na página 31]
- [101] A. N. S. Karmakar, N. K. Roy and P. Kumbhakar, “A remotely operated high voltage laboratory for impulse voltage testing.” [http://wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/Vol.7,%20No.1%20\(2009\)/3-Nafalski-17.pdf](http://wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/Vol.7,%20No.1%20(2009)/3-Nafalski-17.pdf). (Accessed on 04/10/2023). [Citado nas páginas 31 e 32]
- [102] W. de Mel and S. T.G.A.A., “Extending the boundaries of remote laboratory by providing hands on experience,” 09 2017. [Citado na página 31]
- [103] J. E. Corder, J. V. Nickerson, S. K. Esche, C. Chassapis, S. Im, and J. Ma, “Constructing reality: A study of remote, hands-on, and simulated laboratories,” *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, vol. 14, p. 7-es, aug 2007. [Citado na página 32]
- [104] S. Kocijancic and C. O’Sullivan, “Real or virtual laboratories in science teaching - is this actually a dilemma?,” *Informatics in Education*, vol. 3, pp. 239–250, 10 2004. [Citado na página 32]
- [105] C. Tsipouridis, D. Vavougos, M. Batsila, and G. Ioannidis, *The Timeless Controversy Between Virtual and Real Laboratories in Science Education—“And the Winner Is...”*, pp. 620–631. 01 2019. [Citado na página 32]
- [106] A. Nafalski, O. Göl, Z. Nedic, J. Machotka, J. M. M. Ferreira, and I. Gustavsson, “Experiences with remote laboratories,” 2010. [Citado na página 32]
- [107] M. E. Auer and C. Gravier, “Guest editorial: The many facets of remote laboratories in online engineering education,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 260–262, 2009. [Citado na página 32]

- [108] X. Chen, Y. Zhang, L. Kehinde, and D. Olowokere, “Developing virtual and remote undergraduate laboratory for engineering technology,” 06 2010. [Citado na página 32]
- [109] J. Simão, J. de Lima, W. Rochadel, and J. B. da Silva, “Remote labs in developing countries an experience in brazilian public education,” in *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC 2014)*, pp. 99–105, 2014. [Citado na página 32]
- [110] M. Tawfik, E. Sancristobal, S. Martín, C. Gil, A. Pesquera, P. Losada, G. Díaz, J. Peire, M. Castro, J. García-Zubia, U. Hernández, P. Orduña, I. Angulo, M. C. Costa Lobo, M. A. Marques, M. C. Viegas, and G. R. Alves, “Visir deployment in undergraduate engineering practices,” in *2011 First Global Online Laboratory Consortium Remote Laboratories Workshop*, pp. 1–7, 2011. [Citado na página 34]
- [111] M. Tawfik, E. Sancristobal, S. Martin, C. Gil, A. Pesquera, P. Losada, G. Diaz, J. Peire, M. Castro, J. García-Zubia, U. Hernández, P. Orduña, I. Angulo, M. C. Costa Lobo, M. Marques, M. C. Viegas, and G. R. Alves, “Visir: Experiences and challenges,” *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, vol. 8, p. pp. 25–32, Feb. 2012. [Citado na página 35]
- [112] “Openlabs - electrolab.” <http://openlabs.bth.se/index.php?page=ElectroLab>. (Accessed on 04/13/2023). [Citado na página 35]
- [113] F. Garcia-Loro, E. S. Cristobal, G. Diaz, A. Macho, P. Baizan, M. Blazquez, M. Castro, P. Plaza, P. Orduña, M. Auer, W. Kulesza, I. Gustavsson, K. Nilsson, A. Fidalgo, G. Alves, A. Marques, U. Hernandez-Jayo, J. Garcia-Zubia, C. Kreiter, A. Pester, C. Garcia-Hernandez, R. Tavio, K. Valtonen, and E. Lehtikangas, “Pilar: a federation of visir remote laboratory systems for educational open activities,” in *2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, pp. 134–141, 2018. [Citado na página 35]
- [114] I. Gustavsson, J. Zackrisson, L. Håkansson, I. Claesson, and T. Lagö, “The visir project – an open source software initiative for distributed online laboratories,” vol. 2, 01 2010. [Citado na página 35]
- [115] M. Tawfik, E. Sancristobal, S. Martín, C. Gil, A. Pesquera, P. Losada, G. Diaz, J. Peire, M. Castro, J. Garcia-Zubia, U. Hernandez, P. Orduña, I. Angulo, C. Costa Lobo, M. Marques, C. Viegas, and G. Alves, “Visir: experiences and challenges,” *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 8, pp. 25–32, 02 2012. [Citado nas páginas 35, 36 e 38]

- [116] “PXI-1033.” <https://www.ni.com/pt-pt/support/model.pxi-1033.html>, Nov. 2016. [Online; accessed 13. Jul. 2024]. [Citado nas páginas ix e 36]
- [117] “PXI-5114.” <https://www.ni.com/pt-pt/support/model.pxi-5114.html>, Nov. 2016. [Online; accessed 13. Jul. 2024]. [Citado nas páginas ix e 37]
- [118] “PXI-5402.” <https://www.ni.com/pt-pt/support/model.pxi-5402.html>, Nov. 2016. [Online; accessed 13. Jul. 2024]. [Citado nas páginas ix e 37]
- [119] “National instrument pxi-4072 | leasametric.” <https://www.leasametric.com/produit/national-instrument-pxi-4072/>. (Accessed on 07/13/2024). [Citado nas páginas ix e 37]
- [120] “Pxi-4110 - ni.” <https://www.ni.com/pt-pt/shop/model/pxi-4110.html>. (Accessed on 07/13/2024). [Citado nas páginas ix e 38]
- [121] Microchip, “Pic18f4550 | microchip technology.” [Online; accessed 2025-07-15]. [Citado na página 38]
- [122] Microchip, “Pic16f767 | microchip technology.” [Online; accessed 2025-07-15]. [Citado na página 38]
- [123] I. Gustavsson, K. Nilsson, W. Kulesza, F. Garcia, and M. Castro, “Evaluation of the pilar pilot phase v 2.1.” <https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/project-result-content/e8531ace-ded5-4103-bd7f-be12c7608f38/>. (Accessed on 07/14/2024). [Citado nas páginas ix e 38]
- [124] M. Tawfik, E. Sanchristobal, S. Martin, R. Gil, G. Diaz, A. Colmenar, J. Peire, M. Castro, K. Nilsson, J. Zackrisson, L. Håkansson, and I. Gustavsson, “Virtual instrument systems in reality (visir) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 6, pp. 60–72, Jan 2013. [Citado na página 38]
- [125] J. Pereira, I. Nardi da Silva, J. Schardosim Simão, L. Mellos Carlos, J. Silva, S. Bilessimo, and J. Alves, “Modelo de repositório de práticas didáticas de circuitos elétricos e eletrônicos utilizando o laboratório remoto visir,” 09 2017. [Citado na página 38]
- [126] F. Garcia-Loro, A. Macho, E. S. Cristobal, G. Diaz, M. Castro, W. Kulesza, I. Gustavsson, K. Nilsson, A. Fidalgo, G. Alves, A. Marques, U. Hernandez-Jayo, J. Garcia-Zubia, C. Kreiter, R. Oros, A. Pester, D. Garbi-Zutin, M. Auer, C. Garcia-Hernandez, R. Tavio, K. Valtonen, and E. Lehtikangas, “Experimenting in pilar federation: A common path for the future,” in *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pp. 1518–1523, 2018. [Citado na página 39]

- [127] “International association of online engineering (iaoe) & global online consortium (golc).” https://online-engineering.org/SIG_visir.php. (Accessed on 07/14/2024). [Citado na página 39]
- [128] “International association of online engineering (iaoe) & global online consortium (golc).” https://online-engineering.org/VISIR-Federation_about.php. (Accessed on 07/14/2024). [Citado na página 39]
- [129] C. Kreiter, R. Oros, A. Pester, I. Gustavsson, M. Castro, A. Fidalgo, and G. R. Alves, “Visir federation: Initial building steps: Pilar experience — work in progress,” in *2017 4th Experiment@International Conference (exp.at'17)*, pp. 24–27, June 2017. [Citado na página 39]
- [130] “labview test & measurement | farnell portugal.” <https://pt.farnell.com/c/test-measurement?st=labview>. (Accessed on 06/30/2024). [Citado na página 41]
- [131] “Arduino mega 2560 rev3 — arduino official store.” <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>. (Accessed on 07/01/2024). [Citado nas páginas ix e 42]
- [132] “Flask | the pallets projects.” <https://palletsprojects.com/p/flask/>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado nas páginas 42, 62 e 81]
- [133] R. Candido, “Arduino with python: How to get started – real python.” <https://realpython.com/arduino-python/>. (Accessed on 08/01/2024). [Citado na página 42]
- [134] “Micropython - python for microcontrollers.” <https://micropython.org/>. (Accessed on 08/01/2024). [Citado na página 42]
- [135] “A000067-datasheet.pdf.” <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>. (Accessed on 08/01/2024). [Citado na página 42]
- [136] “esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.” https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf. (Accessed on 06/30/2024). [Citado na página 43]
- [137] “Getting started with micropython on esp32 and esp8266 | random nerd tutorials.” <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-micropython-esp32-esp8266/>. (Accessed on 07/01/2024). [Citado na página 43]

- [138] “Esp devkits | espressif systems.” <https://www.espressif.com/en/products/devkits>. (Accessed on 07/01/2024). [Citado nas páginas ix e 43]
- [139] “Introducing: Raspberry pi 5! - raspberry pi.” <https://www.raspberrypi.com/news/introducing-raspberry-pi-5/>. (Accessed on 07/01/2024). [Citado nas páginas ix e 43]
- [140] NI, “Automating ni virtualbench using python - ni.” <https://knowledge.ni.com/>. (Accessed on 08/01/2024). [Citado na página 44]
- [141] armstrap, “Github - armstrap/armstrap-pyvirtualbench: Python wrappers to control ni virtualbench.” <https://github.com/armstrap/armstrap-pyvirtualbench/>. (Accessed on 07/17/2024). [Citado na página 44]
- [142] N. Jennings, “Socket programming in python (guide) – real python.” <https://realpython.com/python-sockets/>. (Accessed on 08/01/2024). [Citado nas páginas ix, 46 e 90]
- [143] W. H. H. Jr., J. E. Kemmerly, J. Phillips, and S. M. Durbin, *Engineering Circuit Analysis*. New York: McGraw-Hill Education, 10 ed., 2023. International Student Edition. [Citado nas páginas ix e 48]
- [144] A. S. Sedra, K. C. Smith, T. C. Carusone, and V. Gaudet, *Microelectronic Circuits*. The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering, Oxford University Press, 8th ed., 2015. [Citado nas páginas ix, x, 49, 50, 51, 107 e 108]
- [145] N. Instruments, “Virtualbench all-in-one instrument product flyer - national instruments.” <https://www.ni.com/pdf/product-flyers/virtualbench-all-in-one-instrument.pdf>. (Accessed on 07/21/2024). [Citado nas páginas x, 52 e 53]
- [146] “Pc104 consortium home - pc/104 consortiumpc/104 consortium.” <https://pc104.org/>. (Accessed on 08/01/2024). [Citado na página 52]
- [147] T. Instruments, “Lm317 data sheet, product information and support | ti.com.” <https://www.ti.com/product/LM317>. (Accessed on 07/25/2024). [Citado nas páginas 55, 73 e 74]
- [148] “Raspberry pi hardware - raspberry pi documentation.” <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>. (Accessed on 07/24/2024). [Citado nas páginas x, 55, 56 e 57]
- [149] “Raspberry pi documentation.” <https://www.raspberrypi.com/documentation/>. (Accessed on 07/24/2024). [Citado nas páginas xiii e 56]

- [150] “Dry relays | relays | comus group.” <https://comus-intl.com/product-category/relays/dry-relays/>. (Accessed on 07/24/2024). [Citado nas páginas x, 57 e 58]
- [151] T. Instruments, “Uln2003 data sheet, product information and support | ti.com.” <https://www.ti.com/product/ULN2003A>. (Accessed on 11/13/2024). [Citado nas páginas x, 58, 59 e 70]
- [152] “Sn54hc595 data sheet, product information and support | ti.com.” <https://www.ti.com/product/SN54HC595>. (Accessed on 07/25/2024). [Citado nas páginas x, xiii, 59, 61 e 117]
- [153] C. A. Team, “Front end vs. back end: Where should you start?” <https://www.codecademy.com/resources/blog/front-end-vs-back-end/>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado na página 61]
- [154] “Top 10 linguagens de back-end para 2024 | qual é a melhor?” <https://blog.back4app.com/pt/linguagens-de-programacao-para-back-end/>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado na página 62]
- [155] A. Joy, “5 main disadvantages of python programming language – pythonista planet.” <https://pythonistaplanet.com/disadvantages-of-python/>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado na página 62]
- [156] “The top programming languages 2023 - ieee spectrum.” <https://spectrum.ieee.org/the-top-programming-languages-2023>. (Accessed on 07/27/2024). [Citado na página 62]
- [157] “What is wsgi? — wsgi.org.” <https://wsgi.readthedocs.io/en/latest/what.html>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado na página 62]
- [158] P. Projects, “Jinja documentation (official),” 2024. Acedido em: 18 de maio de 2025. [Citado nas páginas 62, 63 e 64]
- [159] D. Mashutin, “Django vs flask: Which is the best python web framework? | the pycharm blog.” <https://blog.jetbrains.com/pycharm/2023/11/django-vs-flask-which-is-the-best-python-web-framework/>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado nas páginas 62 e 117]
- [160] R. Johns, “Flask vs django: Which python web framework to use in 2024?” <https://hackr.io/blog/flask-vs-django>. (Accessed on 07/26/2024). [Citado nas páginas 62 e 117]
- [161] “Html basics - learn web development | mdn.” <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/>

- Getting_started_with_the_web/HTML_basics. (Accessed on 07/26/2024). [Citado nas páginas x e 64]
- [162] “Html element - wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/HTML_element. (Accessed on 08/03/2024). [Citado na página 64]
- [163] “Introduction to html 4.” <https://www.w3.org/TR/html40/intro/intro.html>. (Accessed on 08/03/2024). [Citado na página 65]
- [164] “Starting with html + css.” <https://www.w3.org/Style/Examples/011/firstcss>. (Accessed on 08/03/2024). [Citado nas páginas xv, 65 e 66]
- [165] “Serviço de validação de css do w3c.” [Online; accessed 2025-05-29]. [Citado na página 66]
- [166] “The w3c markup validation service.” [Online; accessed 2025-05-29]. [Citado na página 66]
- [167] “Javascript reference - javascript | mdn.” <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Reference>. (Accessed on 08/03/2024). [Citado na página 66]
- [168] “Javascript tutorial.” <https://www.w3schools.com/js/default.asp>. (Accessed on 08/03/2024). [Citado na página 67]
- [169] “1N400x - axial-lead glass passivated standard recovery rectifiers.” <https://cdn.sparkfun.com/assets/2/c/2/d/6/1N400x-D.PDF>. (Accessed on 11/14/2024). [Citado nas páginas 74 e 108]
- [170] T. W. Tim, “(887) python website full tutorial - flask, authentication, databases & more - youtube.” [Online; accessed 2025-05-30]. [Citado na página 81]
- [171] DigitalOcean, “(887) getting started with flask | 1-hour tech talk - youtube.” [Online; accessed 2025-05-30]. [Citado na página 81]
- [172] “Numpy.” [Online; accessed 2025-04-15]. [Citado nas páginas 89 e 94]
- [173] N. Instruments, “Ni virtual bench — pymeasure 0.15.1.dev69+g6ab0fdb.d20250312 documentation.” [Online; accessed 2025-03-12]. [Citado na página 91]
- [174] “Matplotlib — visualization with python.” [Online; accessed 2025-04-30]. [Citado na página 94]
- [175] N. Instruments, “Ni virtual bench 8012 data sheet.” [Online; accessed 2025-04-25]. [Citado na página 104]

- [176] “Eca-2vhg100 panasonic | mouser europa.” [Online; accessed 2025-06-25]. [Citado na página 108]

Anexo A

Datasheet



Matriz de relés LaRE - Protótipo

1 Características

- Matriz com 3 placas baseadas nas dimensões PC/104;
- Fonte de alimentação-5 V/1 A, baseado no LM317^a;
- Experiências:
 - Lei de Ohm;
 - Rectificador de meia onda e onda completa;
 - Filtros passa-alto e passa-baixo.



^aDatasheet LM317

2 Descrição

A matriz de relés do LaRE é constituída por três placas: a placa de alimentação, a placa com o circuito da Lei de Ohm e a placa com os circuitos dos filtros e rectificadores. A matriz do LaRE é controlada pelo RaspberryPI. Há vários tipos de alimentação: 230 V AC que alimenta o rectificador de onda completa; o VirtualBench fornece alimentação de 12 V DC ao LM317 e aos registos de deslocamento, sn74hc595¹ e fornece tensão variável 0-5 V DC ao circuito da Lei de Ohm. Os ULN2003a², são alimentados pela fonte de alimentação, baseada no LM317, 5 V. Todas as medições são feitas pelo VirtualBench.

3 Aplicações

- Laboratórios Remotos;
- Experiências remotas;
- Estudo da Lei de Ohm;
- Estudo de rectificadores;
- Estudo de filtros.

¹Datasheet SN74HC595

²Datasheet ULN2003a

4 Especificações técnicas

Tabela 1: Especificações técnicas genéricas

| | Unidades | Valores |
|---------------------------|----------|---------|
| I_{Max} do VirtualBench | A | 0.5 |
| I_{Max} da fonte 5 V DC | A | 1.5 |
| Transformador | V | 220/8 |
| Dimensões placas | mm * mm | 96x90 |

Tabela 2: Especificações técnicas genéricas dos relés

| Relés | Bobine | | | Contactos | | |
|---------------|---------------|-----------|-----------|---------------------|-----------|-----------|
| | $V_{Nominal}$ | V_{Max} | P_{Max} | V_{Max} | I_{Max} | I_{Max} |
| 3570-1331-123 | 12 V | 16 V | 10 W | 150 V _{DC} | 0.5 A | 1 A |
| 3572-1220-123 | | | | | | |

Tabela 3: Ligações entre placas

| Tipo de ligações | |
|---|--|
| RaspberryPI-LaRE | Conector IDC, fêmea, 40 pinos, 2.54 mm |
| Placa Lei de Ohm-Rectificadores/Filtros | Conector de 6 pinos Arduino Stackable |
| Placa Fontes de tensão-Rectificadores/Filtros | Conector KK, 2.54 mm, M/F |

5 Conectores

Todas as ligações entre o VirtualBench e a matriz, incluindo alimentação DC, saída do gerador de sinal e canais do osciloscópio, bem como a alimentação do transformador, são efectuadas através de conectores tipo KK 2.54 mm, (macho/fêmea).

Para a interligação entre placas, foram utilizados conectores Arduino Stackable de 6 pinos e a ligação do RaspberryPI à placa é feita através de um conector IDC de 40 pinos. As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os conectores referidos, respectivamente³

³Imagens retiradas do site <https://www.botnroll.com/pt/>.

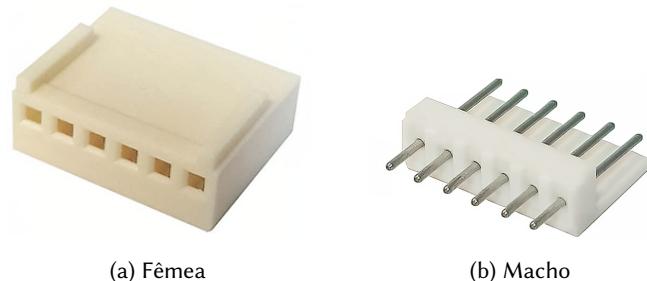
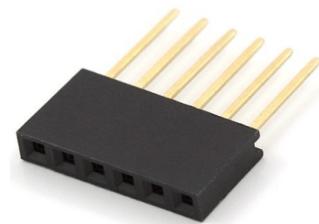
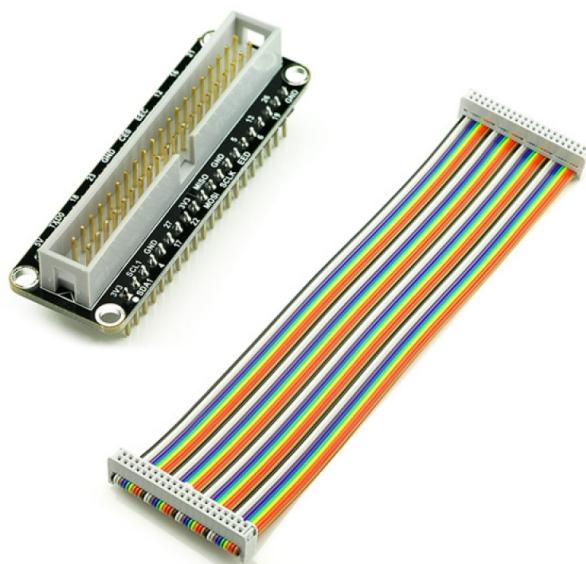
Figura 1: Conectores *KK*Figura 2: Conector *stackable* 6 pinos Arduino

Figura 3: Ligação IDC 40 pinos [Macho/Fêmea]

Conteúdo

| | | |
|----------|--------------------------------|-----------|
| 1 | Características | 1 |
| 2 | Descrição | 1 |
| 3 | Aplicações | 1 |
| 4 | Especificações técnicas | 2 |
| 5 | Conectores | 2 |
| 6 | Pinout | 5 |
| 7 | Dimensões mecânicas | 8 |
| 8 | Esquemas elétricos | 10 |
| 9 | Esquemas PCB | 13 |

Lista de Tabelas

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Especificações técnicas genéricas | 2 |
| 2 | Especificações técnicas genéricas dos relés | 2 |
| 3 | Ligações entre placas | 2 |

6 Pinout

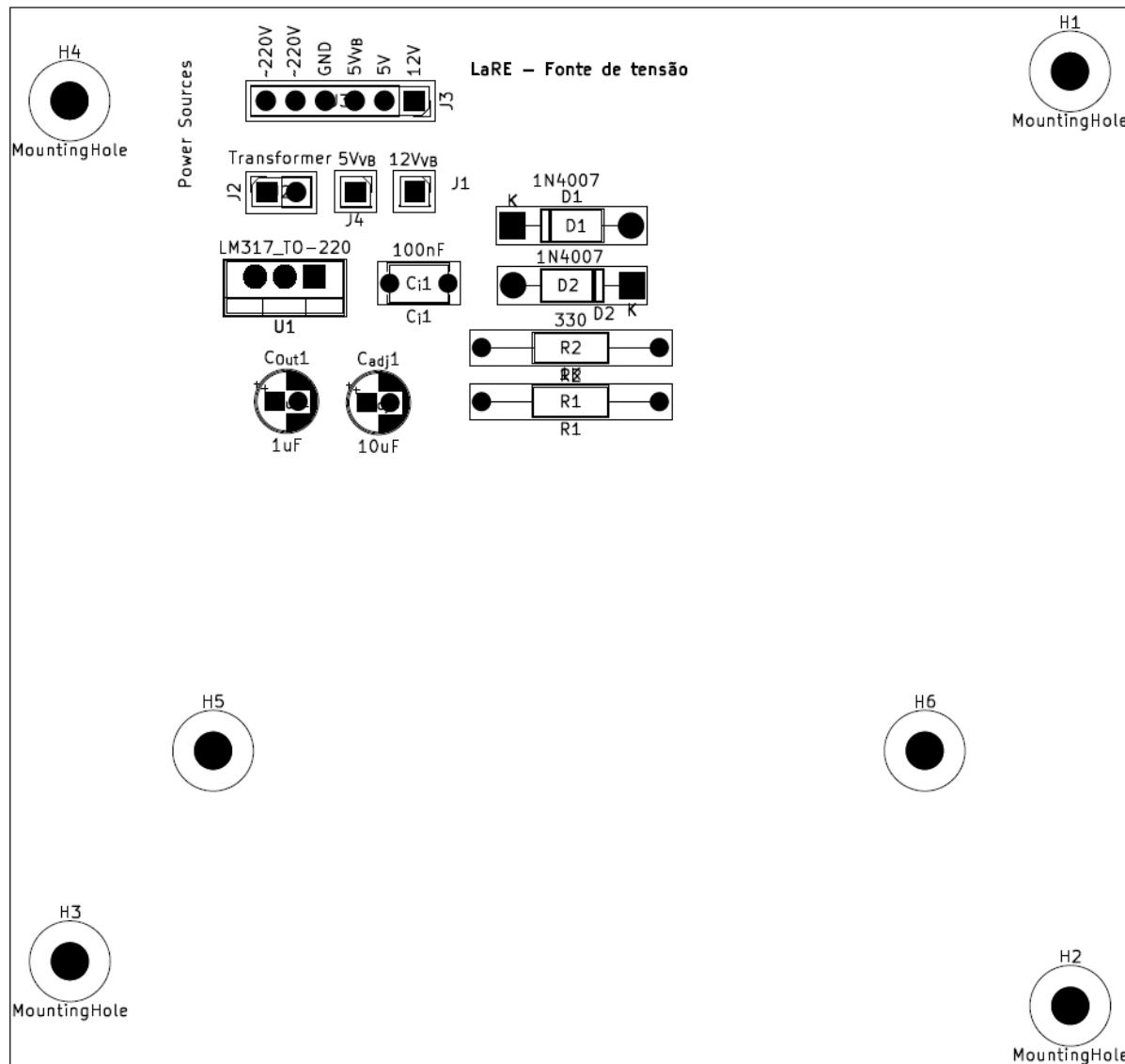


Figura 4: LaRE - Pinout [Fonte de tensão]

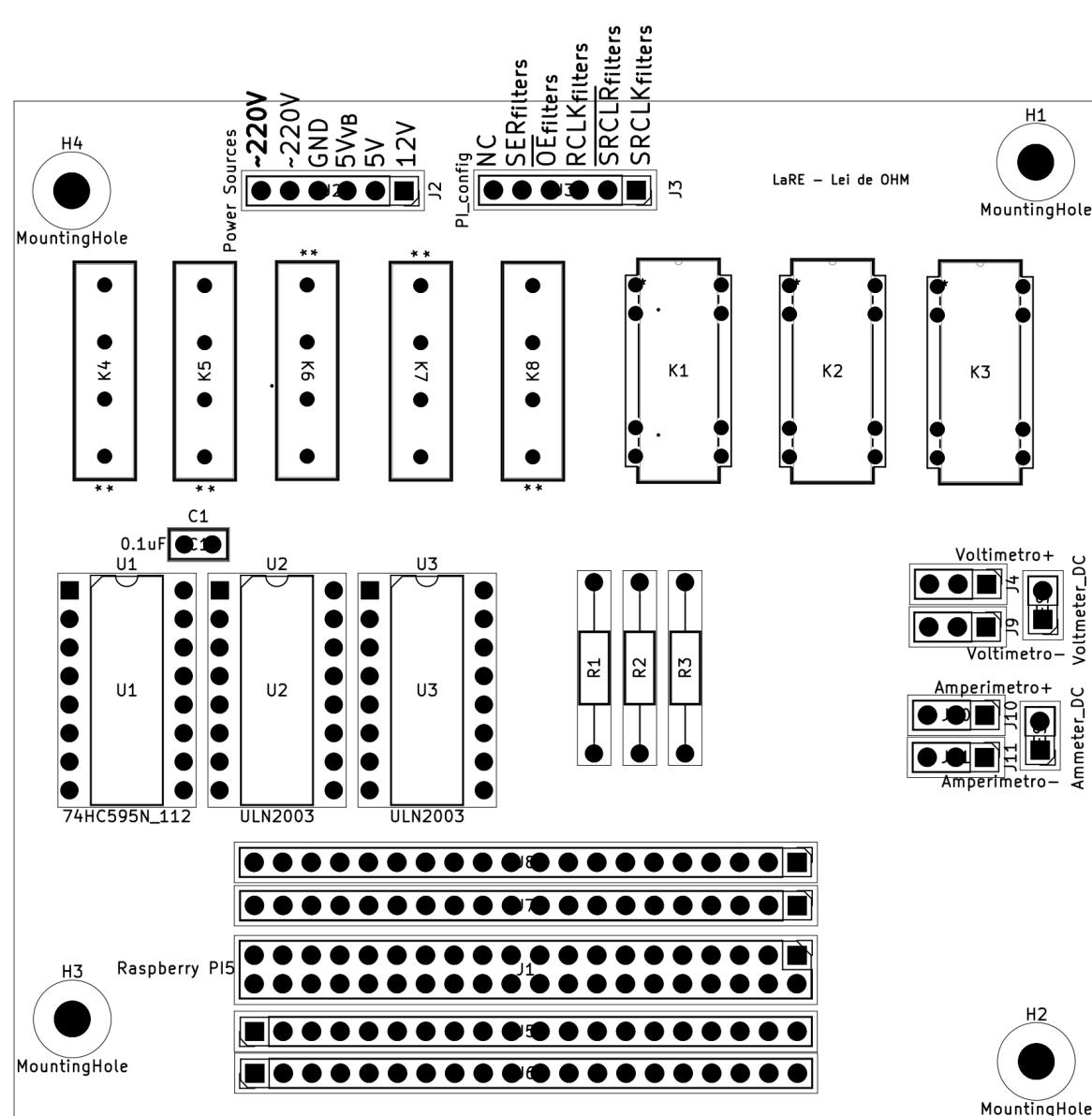


Figura 5: LaRE - Pinout [Lei de Ohm]
Os símbolos ** indicam o pino 1 dos relés

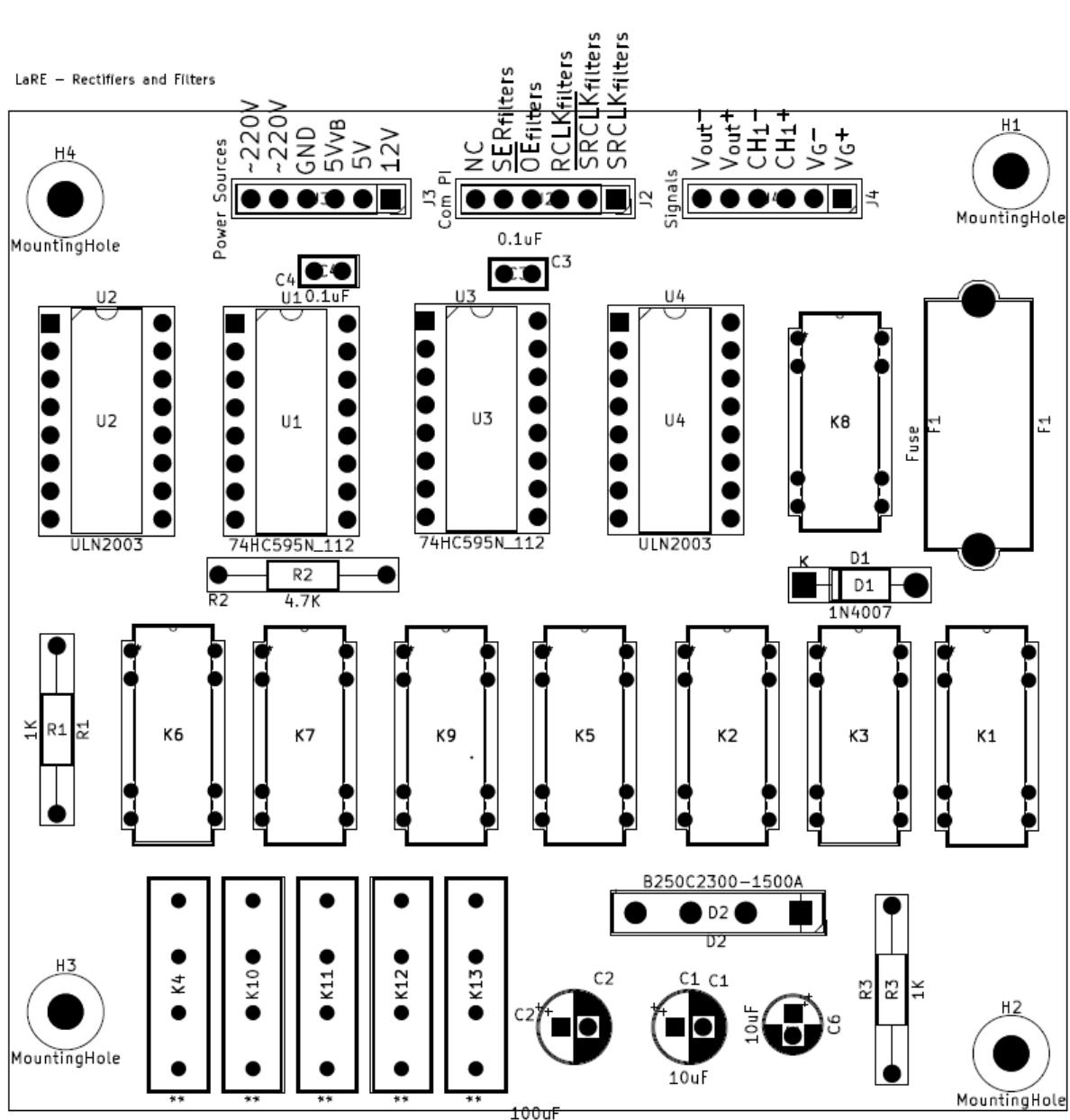
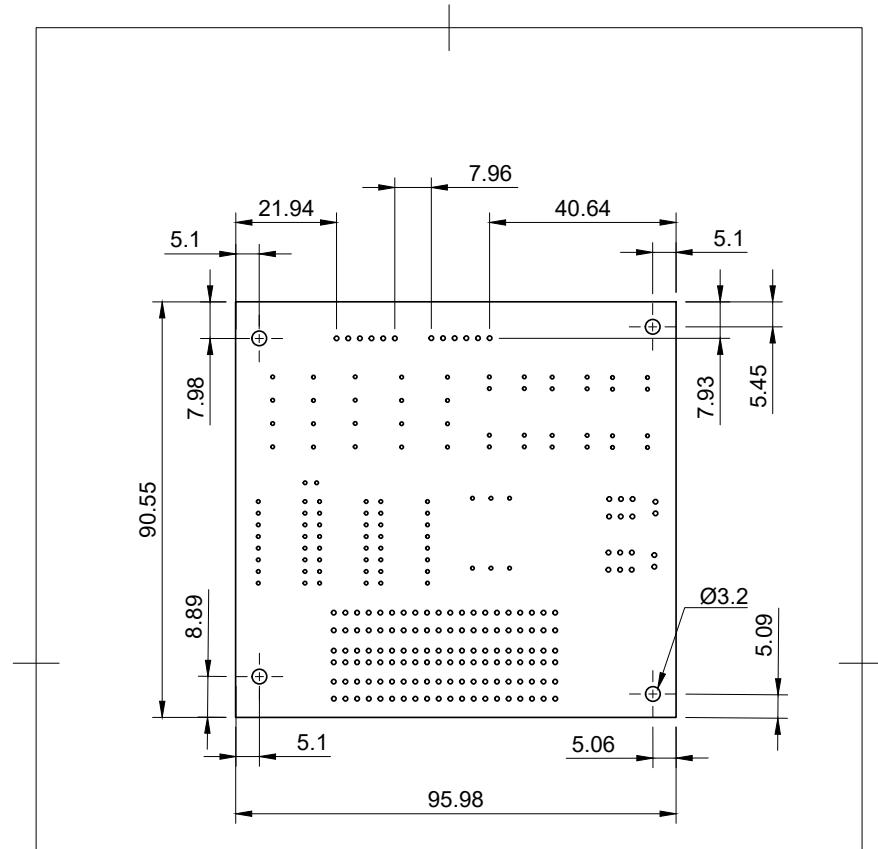


Figura 6: LaRE - Pinout [Rectificadores/Filtros]

7 Dimensões mecânicas



| | | | |
|----------------------|---|---|-------------------------------------|
| Dept. ISEP | Technical reference Dimensões | Created by Eduardo Ramalhadeiro 20/07/2024 | Approved by |
| | | Document type Datasheet Matriz | Document status Protótipo |
| | | Title LaRE - Matriz | DWG No. 1 |
| Rev. | Date of issue | Sheet | |
| 1 | 20/07/2024 | 1/1 | |

Figura 7: Dimensões mecânicas PC/104 - LaRE

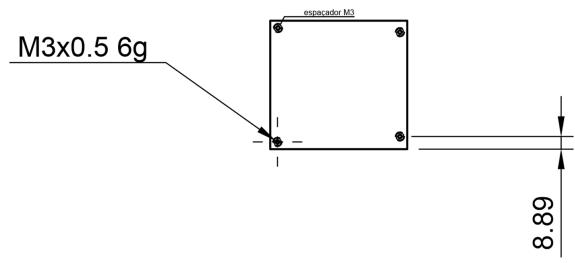
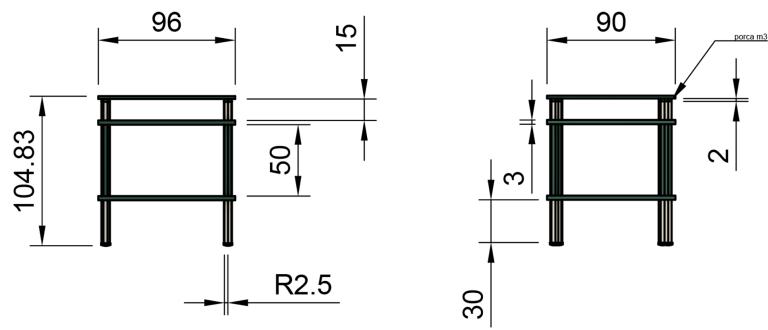


Figura 8: Dimensões mecânicas LaRE



Figura 9: Perspectiva LaRE

8 Esquemas elétricos

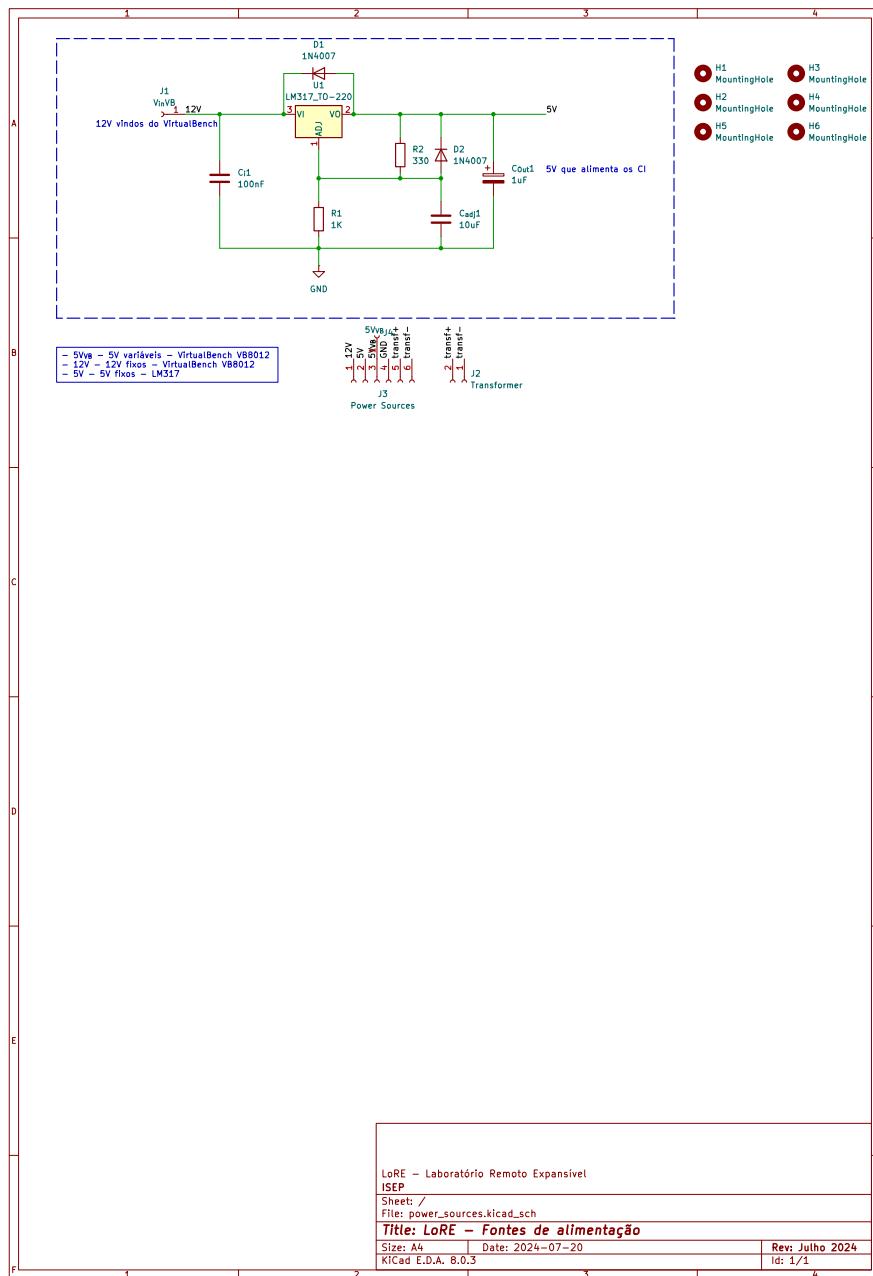


Figura 10: LaRE - Esquema [Fonte de tensão]

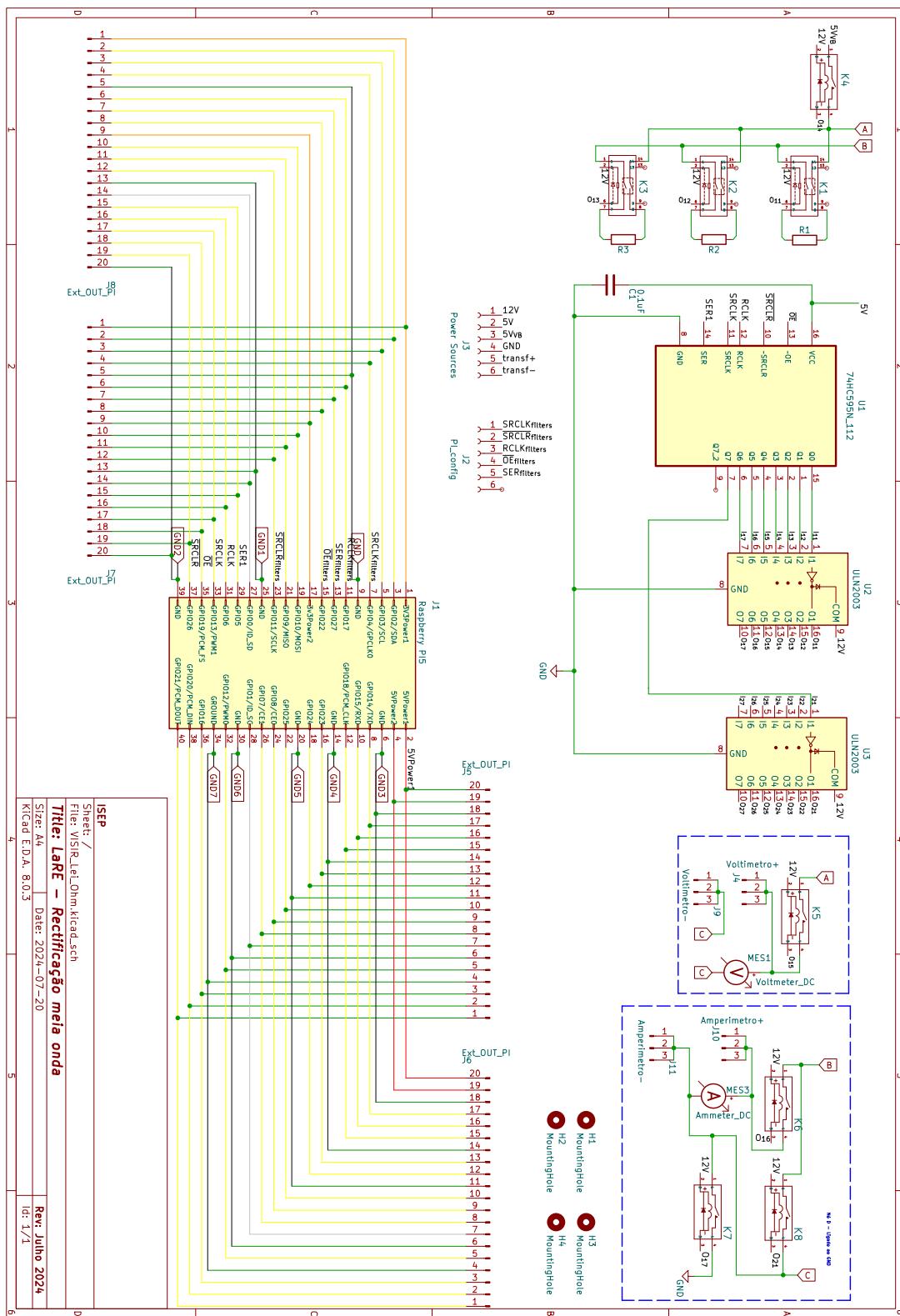


Figura 11: LaRE - Esquema [Lei de Ohm]

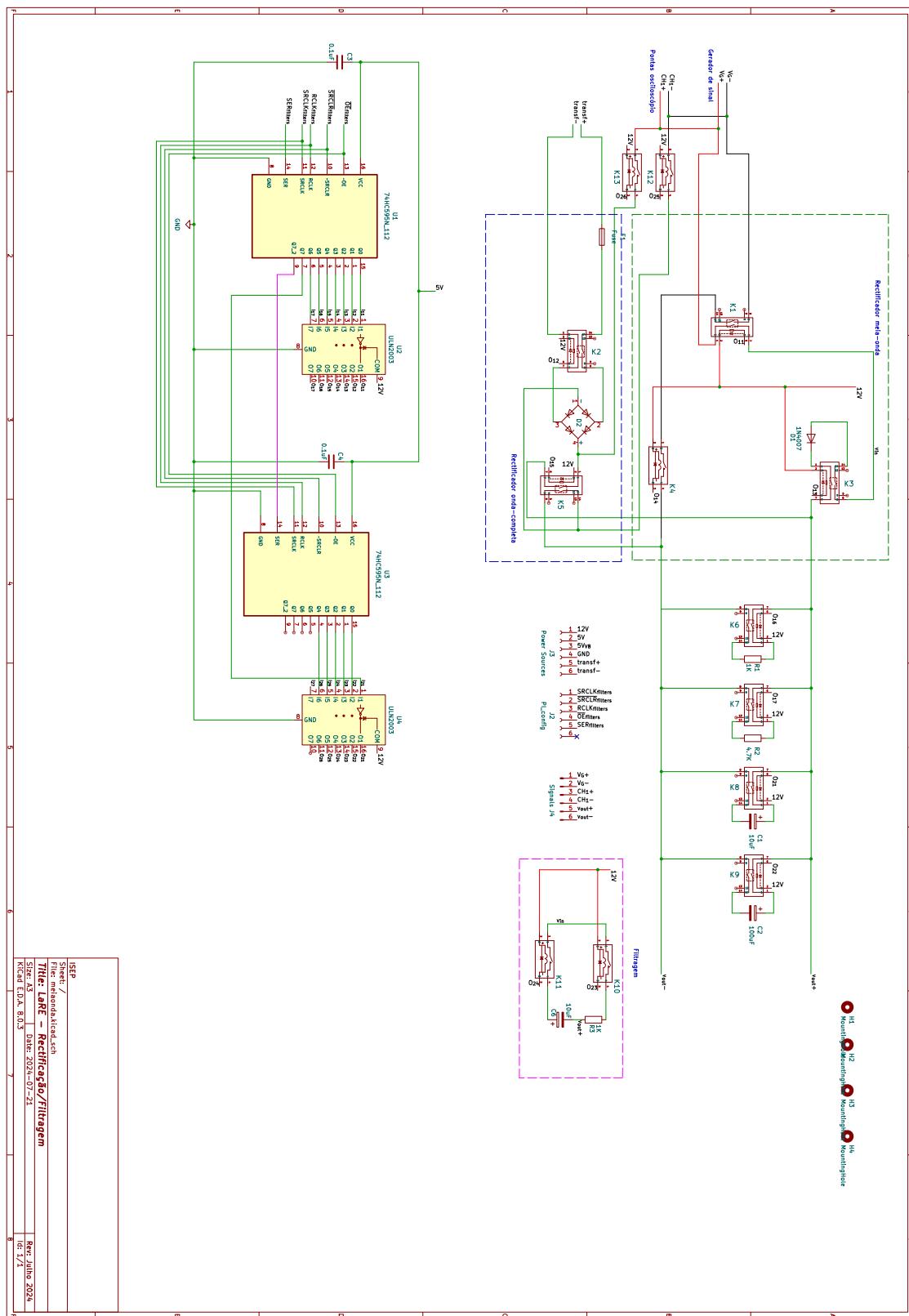


Figura 12: LaRE - Esquema [Recificadores/Filtros]

9 Esquemas PCB

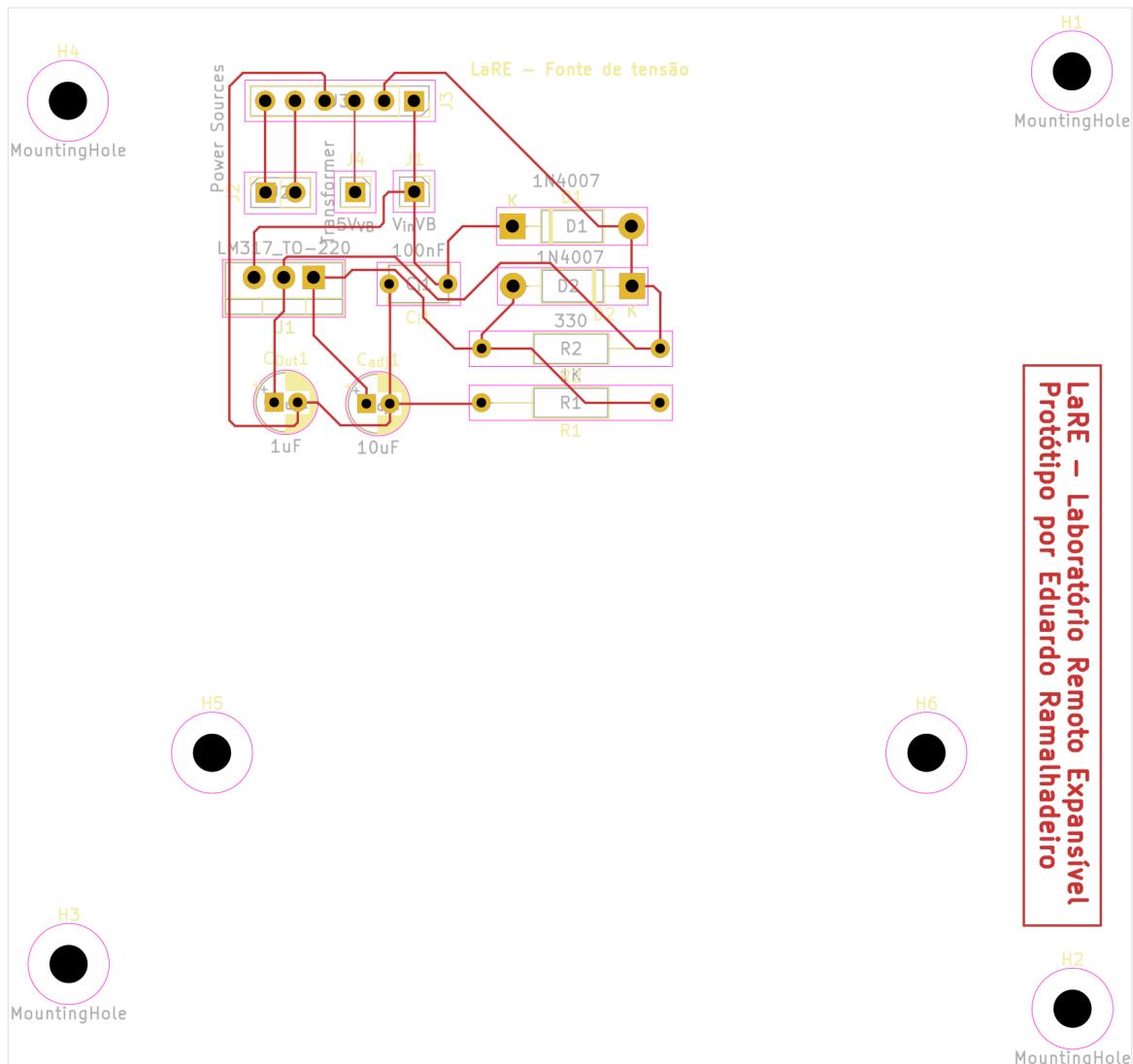
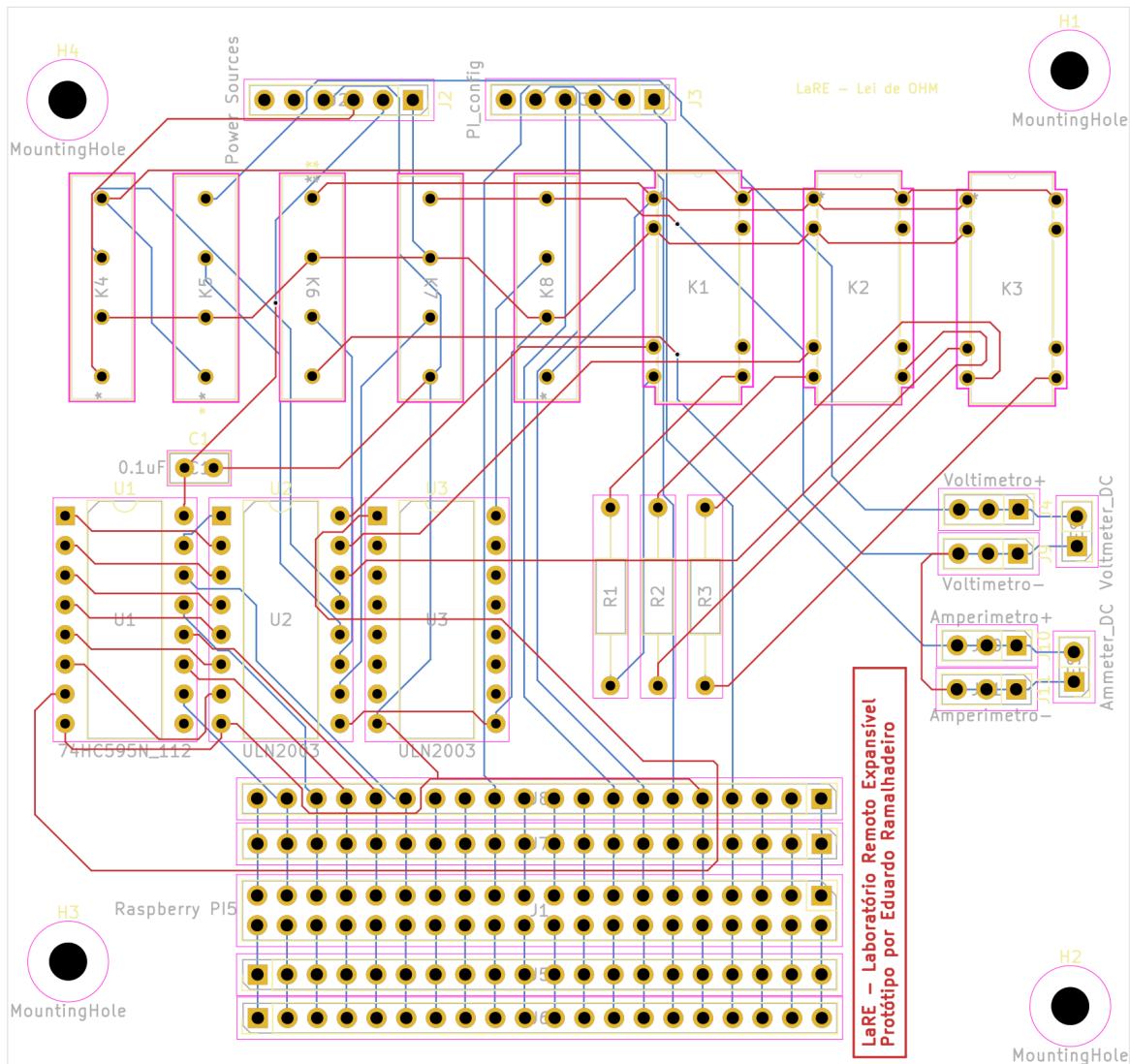


Figura 13: LaRE - PCB [Fonte de tensão]



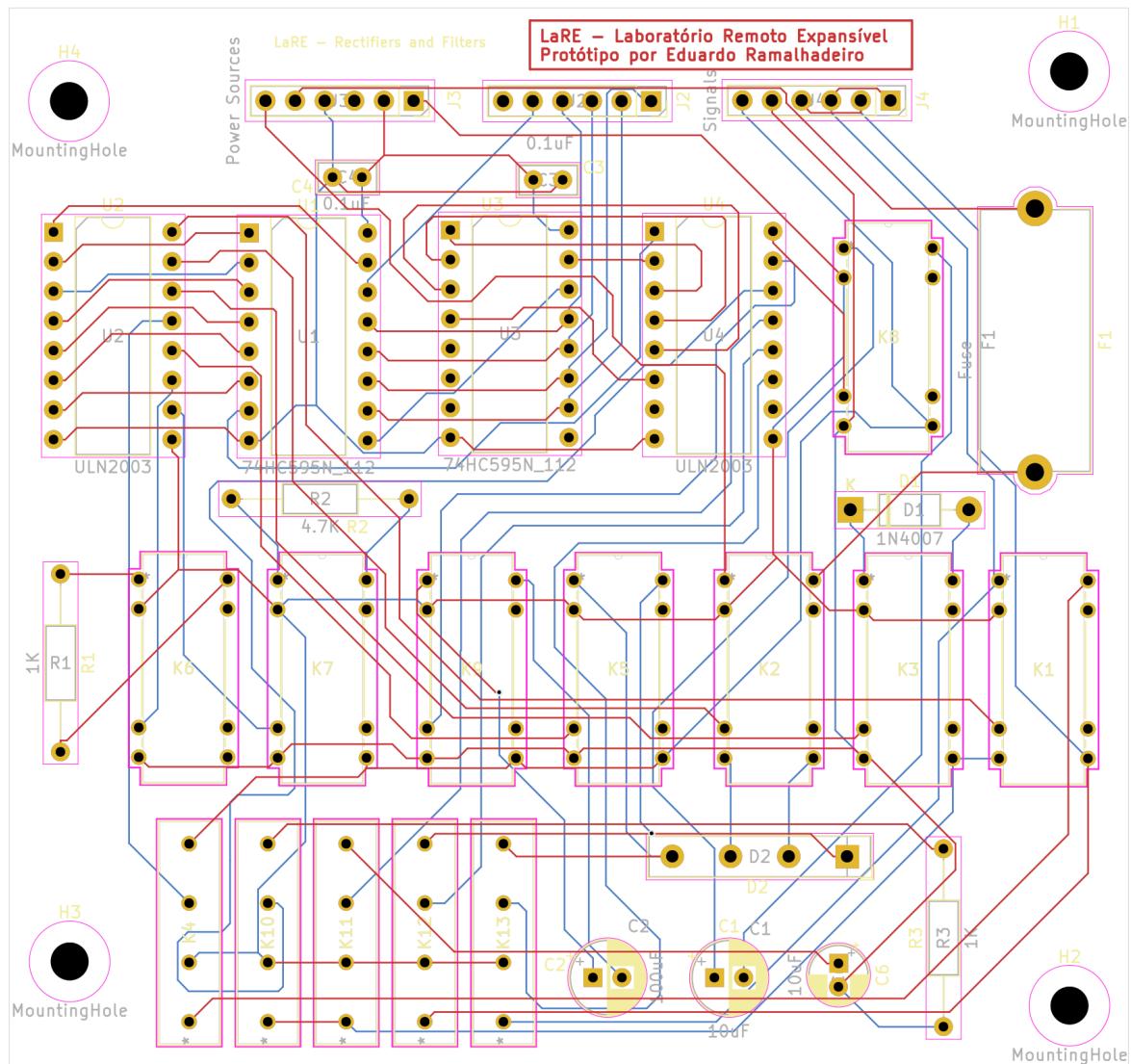


Figura 15: LaRE - PCB [Recificadores/Filtros]