



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Jorge Miguel Da Silva Alves

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
HARDWARE MODULAR PARA AMBIENTES
INDUSTRIAIS**

VOLUME 1

**Dissertação no âmbito do Mestrado de Engenharia Física,
orientada pelo Professor Doutor Jérôme Amaro Pires Mendes e
pelo Professor Doutor Lino Forte Marques e apresentada ao
Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia.**

Setembro de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

Desenvolvimento de um sistema de hardware modular para ambientes industriais

Jorge Miguel Da Silva Alves

VOLUME 1

Dissertação de Mestrado na área científica de Engenharia Física orientada pelo Professor Doutor Jérôme Amaro Pires Mendes e pelo Professor Doutor Lino Forte Marques e apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço ao projeto iProMo pela possibilidade do desenvolvimento deste trabalho, desenvolvido no âmbito do projeto iProMo - Sistemas Inteligente para Controlo de Processos de Moagem, com a referência CENTRO-01-0247-FEDER-069730, financiado através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional da Região Centro (CENTRO 2020) do Portugal 2020.

Agradeço ao ISR-UC e à Universidade de Coimbra pela oportunidade de desenvolver este projeto no âmbito da bolsa de investigação no Projeto iProMo. Em especial, ao orientador Professor Doutor Jérôme Mendes, por todo o acompanhamento e disponibilidade ao longo do desenvolvimento da dissertação. Apesar de todos os imprevistos, houve sempre uma grande cooperação da sua parte para atingir os objetivos definidos. Ao orientador Professor Doutor Lino Marques, pelas críticas e sugestões sempre construtivas. Aos professores, que contribuíram para o meu desenvolvimento e conhecimentos ao longo deste 5 anos de ensino. Em especial, aos do Departamento de Física, por toda a cooperação com os seus alunos.

De seguida, agradeço à Oncontrol Technologies, pela ajuda e todo o espírito de equipa desenvolvido. Também, por todo o suporte a nível técnico e material neste projeto, sem isso os resultados não seriam iguais. Ao Pedro Vicente, por toda a cultura em software e à resolução de problemas em máquinas virtuais. Ao Rui Gomes, pelas suas intervenções construtivas e ajuda nos processos de soldagem. Ao Manuel Mansilha, pela sua cultura em Latex e edições de imagem. Ao Gonçalo Gouveia, pela futura continuação deste trabalho. Em especial, ao Tiago Matias, por toda as críticas, sugestões e disponibilidade para todas as minhas dúvidas no desenvolvimento do projeto. Em especial, ao Pedro Sousa, pela aprendizagem ao longo deste ano, pelo meu desenvolvimento pessoal, pelas críticas, pelas oportunidades e confiança no meu trabalho. Por fim, à Bárbara Matos, colega e amiga, pelos 5 anos de curso e de trabalhos de grupo juntos. Obrigado, por toda a ajuda, disponibilidade e cooperação neste projeto, são poucas as palavras.

Um obrigado a todos os amigos e aos que ajudaram à sua maneira neste projeto, pelos momentos de convívio e de descontração que contribuíram para o meu bem estar. Aos amigos do secundário e básico, que estiveram sempre presentes. Aos parceiros de padel e de futebol, pela contribuição para a minha saúde física e mental. Aos parceiros de aventura, pelos momentos únicos. Aos Borgas, amigos e família, um grande obrigado por estes 5 anos académicos únicos de união. Em especial, aos skaters motards pelas voltas de motas, fins de semana e muito mais. Também um agradecimento especial ao NEDF/AAC e aos que fizeram parte dele, pela amizade e contributo que deram à casa. Sei que por vezes a disponibilidade não foi a maior para todos estes amigos, mas também sei que a amizade continua com o mesmo valor.

Um enorme agradecimento à família, em especial, à mãe, à irmã, ao pai e à avó pelo suporte ao longo destes anos. Sem vós, tudo era mais complicado.

Por fim, um agradecimento especial à Jéssica, minha menina, por toda a paciência,

pela ajuda na revisão deste documento e muito mais. É impossível agradecer-te, mas eu tentei.

Abstract

The industry has been marked by a constant change in environmental legislation, the need for efficient management of energy and resources, and the trend toward zero defects, among other factors. These factors led to the arising of Industry 4.0, characterized by efficiency, flexibility, and reliable control of production processes. The development of a modular hardware system designed for industry, allows the management simplification of systems in industry and improvement in the control of industrial processes through data acquisition and processing. This system reduces human intervention, with the plug & play concept, simplifying the addition and replacement of new modules.

In this project, a modular hardware system for the industry is developed in the scope of the iProMo project - intelligent systems for the control of milling processes. This modular system consists of a main processing module (mPP) and the following specific expansion modules (mEX): the electrical signals expansion module (mSE) and the vibration signals expansion module (mSV). In the development of the mPP, its peripherals and protection devices for the industrial environment are presented. The mEX are composed of sensors, their conditioning circuits, and an analog/digital converter, which are responsible for the acquisition of field signals and their transmission to the mPP.

The developed mEX were tested in an industrial environment. For the validation of the mSE and the mSV, two case studies were implemented using computational intelligence techniques. In the first case study, the module mSE was used to capture the voltage and current signals of an electrical switchboard, and the load disaggregation method was applied for monitoring the operation of motors in a laboratory. In the second case study, the module mSV was used to estimate the cement mill filling. The results obtained validate the developed modular hardware architecture and the industrial modules.

This project presents the developed study and the characteristics to be taken into account for the development and application of these modular systems in the industry, demonstrating their versatility for new applications.

Keywords: modular system, industry, hardware, expansion modules, electrical signals, vibrational signals.

Resumo

A indústria tem sido marcada por uma alteração constante das suas legislações ambientais, necessidade de uma gestão eficiente da energia e dos recursos, tendência de zero defeitos, entre outros fatores. Estes fatores levaram ao aparecimento da Indústria 4.0, caracterizada por um controlo eficiente, flexível e fiável dos processos de produção. O desenvolvimento de um sistema de hardware modular desenhado para a indústria, permite simplificar a gestão dos sistemas na indústria e um melhor controlo dos processos industriais, através da aquisição e tratamento de dados. Este sistema diminui a intervenção humana, com o conceito *plug & play*, facilitando a adição e substituição de novos módulos.

Neste projeto, é desenvolvido um sistema de hardware modular para a indústria no âmbito do projeto iProMo - sistemas inteligentes para o controlo de processos de moagem. Este sistema modular é constituído por um módulo principal de processamento (mPP) e os seguintes módulos específicos de expansão (mEX): o módulo de expansão de sinais elétricos (mSE) e o módulo de expansão de sinais de vibração (mSV). No desenvolvimento do mPP são apresentados os seus periféricos e meios de proteção para o meio industrial. Os mEX são constituídos pelos sensores, respetivos circuitos de condicionamento e pelo conversor analógico/digital, sendo estes responsáveis pela aquisição dos sinais de campo e a sua transmissão para o mPP.

Os mEX desenvolvidos foram testados em ambiente industrial. Para a validação do mSE e do mSV, dois casos de estudo foram implementados recorrendo à inteligência computacional. O primeiro caso de estudo, relativo ao mSE, foi utilizado na captura do sinal de tensão e corrente de um quadro elétrico e o método de desagregação de cargas foi aplicado para a monitorização do funcionamento de motores em laboratório. O segundo caso de estudo, relativo ao mSV, foi utilizado na estimação do enchimento do moinho de cimento. Os resultados obtidos validam a arquitetura de hardware modular e os módulos industriais desenvolvidos.

Este projeto apresenta o estudo desenvolvido e as características a ter em conta para o desenvolvimento e aplicação destes sistemas modulares na indústria, demonstrando a versatilidade dos mesmos para novas aplicações.

Palavras-chave: sistema modular, indústria, hardware, módulos de expansão, sinais elétricos, sinais de vibração.

Conteúdo

Lista de Acrónimos	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Formulação do Problema e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Principais contribuições e trabalho desenvolvido	3
1.4 Estrutura do projeto	3
2 Estudo de arquiteturas de hardware para ambientes industriais e de módulos específicos	5
2.1 Breve evolução histórica dos equipamentos de controlo industrial	5
2.2 Arquiteturas de hardware modular para ambientes industriais	7
2.2.1 “Raspberry Pi” e módulos de expansão	7
2.2.2 “MyPi Industrial” e “Revolution Pi”	8
2.2.3 “NI”	9
2.2.4 “Beckhoff”	10
2.2.5 Conclusões	11
2.3 Estudo de módulos específicos	11
2.3.1 Módulo principal de processamento (mPP)	12
2.3.2 Módulo de expansão de sinais elétricos (mSE)	16
2.3.2.1 Contadores eletrónicos	16
2.3.3 Módulo de expansão de sinais de vibração (mSV)	20
2.4 Análise final	23
3 Arquitetura de hardware modular para ambientes industriais	25
3.1 Análise de Requisitos	25
3.2 Visão global do sistema de hardware modular	26
3.3 Módulo principal de processamento (mPP)	28
3.3.1 Meios de proteção	29
3.4 Módulo de expansão de sinais elétricos (mSE)	32
3.5 Módulo de expansão de sinais de vibração (mSV)	38
4 Casos de estudo: inteligência computacional aplicada aos módulos de expansão	43
4.1 Módulo de expansão de sinais elétricos: Desagregação de cargas	43

4.1.1	Estado da arte	43
4.1.2	Metodologia para desagregação de cargas	46
4.1.2.1	Descrição geral do algoritmo	46
4.2	Módulo de expansão de sinais de vibração: Enchimento de moinhos	49
4.2.1	Estado da arte	50
4.2.2	Metodologia para determinação do nível de enchimento	51
5	Resultados e discussão	53
5.1	Resultados sistema de hardware modular	53
5.1.1	Visão global	53
5.1.2	Módulo de expansão de sinais elétricos	54
5.1.3	Módulo de expansão de sinais de vibração	59
5.2	Resultados dos casos de estudo: inteligência computacional nos módulos de expansão	63
5.2.1	Módulo de expansão de sinais elétricos	63
5.2.2	Módulo de expansão de sinais de vibração	65
6	Discussão e trabalho futuro	67
Apêndice A	Módulo principal de processamento	79
A.1	Arquitetura	79
A.2	Principais tipos de comunicação	80
Apêndice B	Arquiteturas IoT hardware/software	83
Apêndice C	Esquemático do módulo principal de processamento	87
Apêndice D	Placa de validação de circuitos de condicionamento	103
Apêndice E	Observação dos circuitos de condicionamento no osciloscópio	109
E.1	Circuito de condicionamento de Tensão	109
E.2	Circuito de condicionamento de corrente	111
Apêndice F	Módulo de expansão de sinais elétricos	113
Apêndice G	Módulo de expansão de sinais de vibração	121

Lista de Acrónimos

***k*-NN** *k*-Nearest Neighbors.

AC Alternating Current.

ADC Analog-to-Digital Converter.

ARM Advanced Risc Machine.

ASCII American Standard Code For Information Interchange.

BIOS Basic Input/Output System.

BJT Bipolar Junction Transistor.

CAN Controller Area Network.

CISC Complex Instruction Set Computer.

CPU Central Processing Unit.

CS Chip Select.

DC Direct Current.

DIN Deutsches Institut für Normung.

DSP Digital Signal Processors.

DT Decision Tree.

DWT Discrete Wavelet Transform.

E/S Entradas e Saídas.

EEPROM Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory.

EMC Electromagnetic Compatibility.

EMI Electromagnetic Interference.

ESD Eletro Static Discharge.

EtherCAT Ethernet for Control Automation Technology.

-
- FET** Field-Effect Transistor.
- FFT** Fast Fourier Transform.
- FPGA** Field Programmable Gate Array.
- FrFT** Fractional Fourier Transform.
- GPIO** General Purpose Input/Output.
- GPU** Graphics Processing Unit.
- HDD** Hard Disk Drive.
- HDMI** High Definition Multimedia Interface.
- I2C** Inter-Integrated Circuit.
- IoT** Internet of Things.
- JTAG** Joint Test Action Group.
- LAN** Local Area Network.
- LIN** Local Interconnect Network.
- LLC** Logic Link Control.
- LS** Least Residue.
- MAC** Media Access Control.
- MEMS** Micro Electronic Mechanical Systems.
- mEX** Módulos de Expansão.
- MISO** Master In Slave Out.
- MLP** Multi-layer Perceptron.
- MNIC** Monitorização Não Intrusiva de Cargas.
- MOSI** Master Out Slave In.
- mPP** Módulo Principal de Processamento.
- MQTT** Message Queuing Telemetry Transport.
- mSE** Módulo de Expansão de Sinais Elétricos.
- mSV** Módulo de Expansão de Sinais de Vibração.
- NILM** Non Intrusive Load Monitoring.
- NXP** Next eXPerience Company.

OPC UA Open Platform Communications United Architecture.

OSI Open Systems Interconnection.

PC Portable Computer.

PCB Printed Circuit Board.

PID Proportional–Integral–Derivative.

PLC Programmable Logic Controller.

PMIC Power Management Integrated Circuits.

PWM Pulse-Width Modulation.

RAM Random Access Memory.

RFI Radio Frequency Interference.

RISC Reduced Instruction Set Computer.

RMS Root-Mean-Square.

ROM Read Only Memory.

RTD Resistance Temperature Detector.

RTU Remote Terminal Unit.

SATA Serial Advanced Technology Attachment.

SCLK Serial Clock.

SD Secure Digital.

SDI Serial Data Input.

SDO Serial Data Output.

SMD Surface Mount Device.

SPI Serial Peripheral Interface.

SS/CS Slave Select/Chip Select.

SSD Solid State Drive.

STFT Short-time Fourier Transform.

SVM Support Vector Machine.

TCP Transmission Control Protocol.

TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

UART Universal asynchronous receiver/transmitter.

UEXT Universal EXTension.

USB Universal Synchronous Bus.

Lista de Figuras

2.1	Equipamentos de controlo industrial.	6
2.2	“Raspberry Pi” e <i>board</i> de expansão.	7
2.3	Soluções industriais baseadas no modelo “Raspberry Pi”.	8
2.4	Soluções de sistemas modulares industriais da NI.	9
2.5	PC industrial embebido com EtherCAT [28].	10
2.6	Arquitetura geral de contadores de energia.	16
2.7	Transformador de tensão [48].	17
2.8	Transformador de corrente [51].	18
2.9	Sensor de Rogowski [52].	19
2.10	Acelerómetro piezoelétrico/piezo-resistivo [58].	21
2.11	Acelerómetro capacitivo (MEMS) [59].	22
2.12	Medidor de deformações (strain gauges) [60].	22
2.13	Sensores de proximidade capacitivo e de velocidade.	23
3.1	Arquitetura geral do hardware modular para ambientes industriais.	26
3.2	Arquitetura do módulo principal de processamento.	28
3.3	Proteção de entrada da alimentação externa de 24 VDC	30
3.4	Proteção de entrada para sobretensões.	30
3.5	Isolamento galvânico dos sinais digitais SPI.	32
3.6	Arquitetura do módulo de expansão de sinais elétricos.	32
3.7	Circuito de condicionamento do sinal de tensão.	33
3.8	Circuito de condicionamento do sinal de corrente.	36
3.9	Arquitetura do módulo de expansão de sinais de vibração.	38
3.10	Circuito de condicionamento do sinal de vibração.	40
4.1	Ilustração de um exemplo de desagregação não intrusiva de cargas. M1, M2 e M3 são 3 equipamentos alimentados pela alimentação de entrada.	44
4.2	Exemplo ilustrativo de harmónicos ímpares.	46
4.3	Exemplo de aplicação do algoritmo <i>k-nearest neighbors</i> (<i>k</i> -NN).	46
4.4	Fluxograma da metodologia de desagregação de cargas.	47
4.5	Deteção do evento de ativação de equipamento.	48
4.6	Princípio de funcionamento de um moinho de bolas. 1 - esferas, 2 - cimento a moer, 3 - câmara cilíndrica [89].	50
4.7	Ilustração da obtenção da área <i>A</i> para uma banda de frequências principais $f_{inicial}$ e f_{final}	51
5.1	Sistema de hardware modular desenvolvido.	53
5.2	Placa de sinais elétricos para teste de circuitos de condicionamento de corrente e tensão.	55

5.3	Sinais de entrada e saída do circuito de condicionamento de tensão. . . .	55
5.4	Sinais de entrada e saída do circuito de condicionamento de corrente. . .	56
5.5	PCB do módulo de expansão de sinais elétricos.	57
5.6	<i>Casing</i> do mSE.	58
5.7	Leitura de sinais de tensão e corrente da alimentação trifásica no quadro elétrico.	58
5.8	Sinais de corrente e de tensão da fase 1 do equipamento 3.	59
5.9	Sensor de vibração desenvolvido.	59
5.10	PCB do mSV.	60
5.11	<i>Casing</i> do mSV.	61
5.12	Moinho de cimento na CIMPOR.	61
5.13	Posicionamento do sensor de vibração no moinho de cimento.	62
5.14	Dados obtidos pelo mSV.	62
5.15	Potência aparente ao longo do tempo para as 3 fases de alimentação elétrica. Verde: fase 1; laranja: fase 2; azul: fase 3.	64
5.16	Assinaturas dos equipamentos 3 (esquerda) e 5 (direita) da fase 1 (l=1). Vektor das amplitude dos harmônicos ímpares, associado à respectiva frequência (50 Hz).	64
5.17	Modelo obtido por regressão por mínimos quadrados, e intervalo de confiança para os parâmetros de ajuste obtidos, com um nível de confiança 95%.	66
A.1	Arquitetura do módulo principal de processamento	79
A.2	Arquitetura da comunicação em ambientes industriais [106].	80
A.3	Pacote de dados EtherCAT.	82
B.1	Arquitetura IoT de 3 camadas [111].	83
B.2	Arquitetura IoT de 5 camadas [113].	84
D.1	Modelo 3D da placa de validação dos circuitos de condicionamento. . . .	108
E.1	1º Estágio - Sinal de entrada de 325 VAC após o divisor de tensão. . . .	109
E.2	2º Estágio - Sinal de saída após o estágio amplificador de instrumentação.	110
E.3	3º Estágio - Sinal de saída do último estágio em que é feito um ajuste do ganho e <i>offset</i> ao sinal.	110
E.4	Sinal de entrada após divisor tensão (amarelo) e sinal de saída do 3º estágio (azul).	110
E.5	Sinal de entrada proveniente do gerador de sinal (equivalente a um sinal de uma corrente primária de 1kA).	111
E.6	1º Estágio - Sinal de saída após o estágio amplificador de instrumentação.	111
E.7	2º e 3º Estágio - Sinal após a integração do sinal (amplificador integrador) e filtro passa alto.	112
E.8	4º Estágio - Sinal após o último estágio de ajuste do ganho e <i>offset</i>	112
E.9	Sinal de entrada do sensor de Rogowski (amarelo) e sinal de saída do 4º estágio (azul).	112
F.1	Modelo 3D do mSE.	119
G.1	Modelo 3D do mSV.	126

Lista de Tabelas

2.1	Modelos “OLinuXino A64”	12
2.2	Modelos “BeagleBoard”	13
2.3	Modelos “OpenRex”	14
2.4	Modelos “Banana Pi”	14
2.5	Modelos “Cubieboard”	15
2.6	Modelos “HummingBoard”	15
2.7	Tabela de comparação dos sensores de corrente [45].	19
5.1	Resultados obtidos para a detecção de eventos.	65
5.2	Dados de treino e teste para a regressão linear.	65
5.3	Níveis de enchimento obtidos com o modelo linear para os dados de teste.	66

Capítulo 1

Introdução

O trabalho, apresentado neste documento, foi desenvolvido no âmbito do projeto iProMo¹ - Sistemas Inteligente para Controlo de Processos de Moagem. O projeto iProMo visa a investigação e o desenvolvimento de um sistema inteligente para moinhos horizontais, cujo objetivo principal é a criação de uma solução integrada de monitorização e controlo avançado. Uma das componentes do projeto tem por base uma solução de hardware modular, segundo um conceito *plug & play*, onde módulos de expansão podem ser adicionados ao módulo principal. Os módulos de expansão estão associados a uma tarefa específica, como a recolha de sinais de vibração ou a recolha de sinais de grandezas elétricas (tensão e corrente). A decisão de adicionar um módulo de expansão terá em conta o ambiente da aplicação e as restrições técnico-financeiras da mesma.

É objetivo do projeto iProMo ter processamento distribuído, sendo a responsabilidade dos módulos de expansão a aquisição e processamento das grandezas físicas. O processamento, dentro do módulo de expansão, garantir-nos-á otimização dos recursos necessários ao módulo principal, e conseqüente eficiência na utilização de recursos. No entanto, devido a restrições temporais e complexidade técnica formulou-se, para o presente projeto, a aquisição no módulo de expansão e transmissão direta dos dados “*raw*” para o módulo principal. O processamento dos dados adquiridos serão todos efetuados no módulo principal.

1.1 Formulação do Problema e Motivação

Recentemente tem-se verificado uma evolução da indústria marcada por: restrições de legislações ambientais; a necessidade de uma gestão eficiente da energia e dos recursos sustentáveis; tendência de zero defeitos, e outros fatores. Estes motivos levaram a um aumento significativo da complexidade dos processos industriais [1, 2, 3, 4]. Com a evolução da indústria é requerido cada vez mais um controlo eficiente, flexível, e fiável dos processos de produção [5, 6]. Esta tendência levou ao aparecimento do conceito da *indústria 4.0*, popularizada por Klaus Schwab [7].

O desenvolvimento de sistemas de *hardware* modulares capazes de adquirir sinais, transmiti-los e tratá-los, observam-se na indústria [1, 3]. Estes sistemas permitem ao utilizador um melhor controlo dos processos, através da aquisição e tratamento de dados

¹<https://ipromo-p2020.eu/>
referência CENTRO-01-0247-FEDER-069730, financiado através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional da Região Centro (CENTRO 2020) do Portugal 2020.

online. Sendo um sistema no conceito *plug & play*, este diminui a necessidade de intervenção humana e conseqüente redução do custo de mão-de-obra. Igualmente, facilita a adição ou substituição de novos módulos conforme as necessidades. Verifica-se que os sistemas modulares vêm simplificar a gestão dos sistemas na indústria e uma eficiência maior nos processos industriais [8].

Atualmente, a aplicação de metodologias inteligentes na indústria é cada vez mais frequente [9, 10, 11, 12, 13, 14, 4], com a necessidade de aumento da capacidade de processamento das soluções. Continua a ser evidente a necessidade de investigação e desenvolvimento de sistemas modulares especializados. Os desenvolvimentos recentes têm-se focado no aumento das capacidades de processamento, permitindo correr algoritmos em tempo-real, e na transmissão de informação. Algumas questões relativas à comunicação de forma distribuída são descritas em [15]. As vantagens deste tipo de sistemas são descritas em [1], nomeadamente: latência reduzida devido ao processamento local; escalabilidade; maior segurança devido à descentralização; uso reduzido da largura de banda; conectividade mais robusta, evitando transmissões interrompidas em caso de conectividade em redes limitadas ou intermitentes. Igualmente importante é o desenvolvimento de inteligência computacional, que seja incorporada em sistema embebidos e, que permita uma melhor análise de sinais provenientes dos sensores. As informações obtidas, pela inteligência computacional sobre os sinais de processo, podem ser utilizadas para um melhor controlo dos mesmos.

O ambiente industrial é sujeito a várias perturbações e fatores externos, como: sujidade; perturbações mecânicas; ruído elétrico; picos de sobrecorrente e sobretensão; más implementações por parte de utilizadores; entre outras. A aplicação do projeto iProMo é dedicada à indústria cimenteira, que possui uma forte presença de vibrações e poeiras dos moinhos de cimentos. Neste caso é relevante a construção de um sistema modular robusto, recorrendo a meios de proteção dos sinais e perturbações provenientes do meio externo.

1.2 Objetivos

Com o intuito de aplicação de soluções inteligentes para a indústria, num contexto *indústria 4.0*, pretende-se o desenvolvimento de uma solução de hardware modular num conceito *plug & play*, onde módulos de expansão podem ser adicionados ao módulo principal de processamento. A arquitetura de hardware, a ser desenvolvida, será baseada no conceito *edge analytics*. O processamento dos dados, frequentemente algoritmos complexos baseados em inteligência computacional, é feito localmente, podendo inclusivamente ser efetuado em tempo-real.

O objetivo principal neste projeto é o desenvolvimento de um sistema modular cujo os módulos estejam interligados por um bus de comunicação, dando suporte à recolha dos sinais de campo, e a toda a análise e processamento de sinais elétricos e de sinais de vibração. Aplicam-se um conjunto de técnicas para o processamento de sinais e inteligência computacional. De uma forma mais detalhada, os objetivos foram:

- Desenvolvimento de um módulo principal de processamento (mPP) com capacidade de expansibilidade de novos módulos de expansão e de comunicação com sistemas externos;
- Desenvolvimento de módulos de expansão (mEX) com capacidade de aquisição de sinais diversos de campo e transmissão dos mesmos para o mPP para o processamento e extração de *features*;

- Desenvolvimento, como caso de estudo, de inteligência computacional para o processamento dos sinais provenientes dos mEX desenvolvidos, nomeadamente do módulo de expansão de sinais elétricos (mSE) e do módulo de expansão de sinais de vibração (mSV).

1.3 Principais contribuições e trabalho desenvolvido

Por forma a alcançar os objetivos do desenvolvimento de um sistema de hardware modular para ambientes industriais, esta tese consistiu em:

- Desenvolvimento do módulo principal (mPP) com processamento local para algoritmos de inteligência computacional e com capacidade de expansibilidade de novos módulos;
- Comunicação entre módulos (utilizando SPI - Serial Peripheral Interface) e com o meio exterior (Ethernet TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol);
- Desenvolvimento do módulo de expansão de sinais elétricos (mSE);
- Desenvolvimento de uma metodologia para processamento de sinais elétricos adquiridos pelo mSE para desagregação de cargas industriais;
- Desenvolvimento do sensor de vibração;
- Desenvolvimento do módulo de expansão para recolha de valores do sensor de vibração (mSV);
- Desenvolvimento de uma metodologia para processamento de sinais de vibração adquiridos pelo mSV para inferir o nível de enchimento de um moinho.

1.4 Estrutura do projeto

A estrutura do documento encontra-se dividida em 6 capítulos. A organização da informação dos restantes capítulos terá a seguinte estrutura:

- O Capítulo 2 apresenta um estudo relativo a arquiteturas de hardware modulares na indústria e a módulos constituintes do sistema modular, nomeadamente, o mPP, mSE e mSV.
- O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do hardware modular industrial deste projeto e os conceitos aplicados no seu desenvolvimento.
- O Capítulo 4 apresenta a inteligência computacional relativa aos módulos de expansão (mSE e mSV).
- O Capítulo 5 apresenta os resultados e sua análise relativa aos trabalhos apresentados nos Capítulos 3 e 4.
- Por fim, no Capítulo 6 é feita uma apreciação final deste projeto e são apresentadas futuras melhorias do sistema modular desenvolvido.

Capítulo 2

Estudo de arquiteturas de hardware para ambientes industriais e de módulos específicos

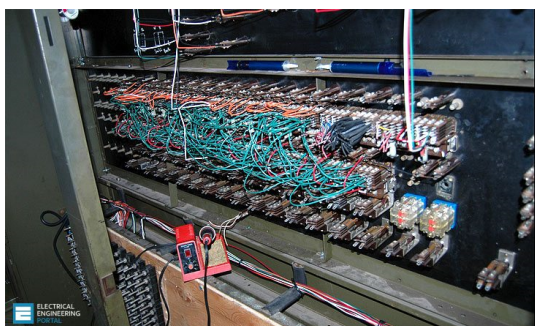
Este capítulo começa por apresentar uma breve descrição da evolução de equipamentos de controlo industrial na Secção 2.1. A Secção 2.2 apresenta algumas soluções de hardware modular existentes atualmente no mercado para ambientes industriais. De seguida, na Secção 2.3 é apresentado o estudo particular dos módulos constituintes da arquitetura modular proposta para projeto, nomeadamente: módulo principal de processamento (Subsecção 2.3.1), módulo de expansão de sinais elétricos (Subsecção 2.3.2) e módulo de expansão de sinais de vibração (Subsecção 2.3.3). Para o módulo principal de processamento (Subsecção 2.3.1) é apresentado o estudo das arquiteturas modulares e respetivos módulos *Open Source* de hardware que vão ao encontro da arquitetura e objetivos deste projeto. Para os módulos de expansão de sinais elétricos (Subsecção 2.3.2) e de vibração (Subsecção 2.3.3), é feito o estudo da arquitetura de processamento de sinal e os sensores para a aquisição dos respetivos sinais. Os sensores estudados foram de grandezas elétricas (tensão e corrente) para o mSE, e vibração para o mSV.

2.1 Breve evolução histórica dos equipamentos de controlo industrial

Inicialmente, o controlo de máquinas de automação [16, 17] era feito através de relés e temporizadores (ver Figura 2.1a) que eram utilizados para ligar e desligar equipamentos na indústria. Este sistema de controlo era constituído por dezenas de relés, que teriam de ser conectados numa ordem específica para que uma máquina funcionasse e se um relé falhasse, o sistema como um todo não funcionava. A dimensão ocupada por este sistema era elevada, tendo muitos fios para a conexão de relés, temporizadores, contadores e terminais, o que aumentava a complexidade do sistema. A resolução de problemas como o desgaste dos contactos e falhas da bobina levavam horas e tinham custos elevados.

Os primeiros dispositivos de controlo lógico programável na indústria foram os PLCs (*Programmable Logic Controller*), sendo atualmente os mais utilizados no controlo de equipamentos e processos industriais. A evolução histórica dos PLCs e suas características, até aos dias de hoje, é descrita nos seguintes trabalhos [16, 18, 19, 20]. Surgiram, em 1968, os primeiros PLCs [20, 17] com o objetivo de diminuir a complexidade dos sistemas de

controlo e facilitar a implementação e manutenção dos mesmos. Os primeiros PLCs tinham a capacidade de trabalhar com sinais de entrada e saída, e possibilitavam a utilização de lógica interna, temporizadores e contadores, mas tinham uma dimensão considerável.



(a) Máquina de automação feita de relés e temporizadores [19].



(b) Controlador Lógico Programável (PLC) [19].

Figura 2.1: Equipamentos de controlo industrial.

Com o início do conceito de controlo por computador, os PLCs começaram em constante evolução aprimorando os seus componentes, incorporando a funcionalidade PID (*Proportional-Integral-Derivative*) e dispositivos de programação portáteis. Surgiram assim, os PLCs (ver Figura 2.1b) baseados em microprocessadores que permitiam a comunicação com computadores, podendo ser modificados por programação. Começou-se por usar comunicação serial, como o ModBus RS232, estando também em constante evolução para novos protocolos de comunicação, como Ethernet TCP/IP e USB (*Universal Synchronous Bus*). Este sistema de controlo tem estado em constante evolução até aos dias de hoje, sendo cada vez mais otimizado e eficiente para as suas diferentes aplicações. Existem atualmente diferentes arquiteturas de PLCs, como a embebida e a modular, em que esta última é expandida com módulos de E/S (entradas e saídas).

Os PLCs não necessitam de uma capacidade de processamento tão alta como os computadores atuais, mas espera-se que tenham desempenho suficiente para a implementação de algoritmos de controlo sofisticados [17]. Nos dias hoje, têm existido controladores com processadores baseados na arquitetura ARM (*Advanced Risc Machine*), que é eficiente na execução de instruções, e com sistemas operativos mais abertos, como o Linux. Com a configuração descrita é dada maior liberdade ao utilizador no controlo dos sistemas. A análise das características destes tipos de controladores, com melhor eficiência de processamento, é elaborada na Subsecção 2.3.1, onde é evidente a evolução destes sistemas.

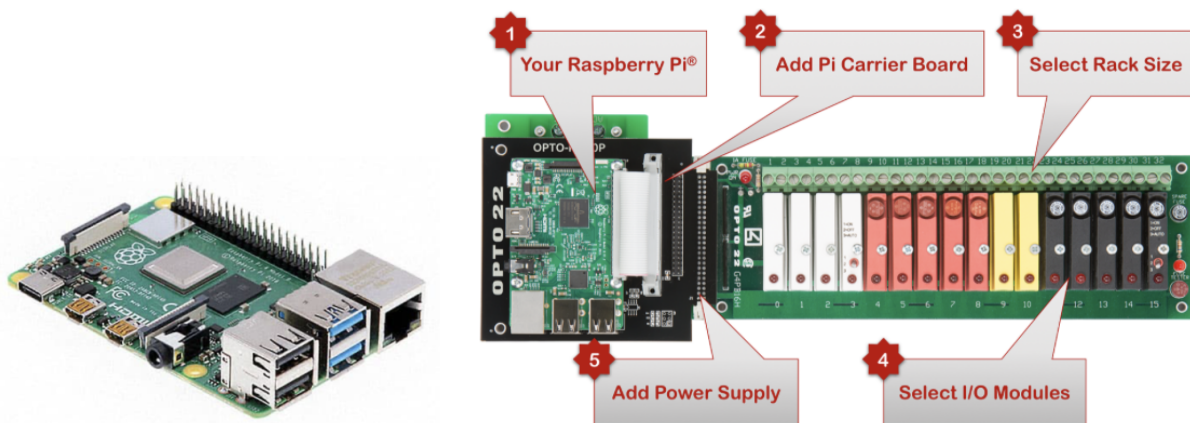
Os sistemas desenhados para funcionamento em ambientes industriais requerem: um *casing* robusto para a proteção de vibrações e poeiras; um *hardware* com proteção de ruído eletromagnético para a proteção de picos de sobrecorrente, sobretensão e más implementações por parte de utilizadores; e uma forte confiabilidade do sistema, pois estes exigem a necessidade de trabalhar 24 horas por dia sobre 365 dias por ano. Deste modo, no desenvolvimento de um sistema para aplicações industriais, as características de robustez e confiabilidade são fundamentais durante a análise de requisitos.

2.2 Arquiteturas de hardware modular para ambientes industriais

Nesta secção é apresentado um estudo de arquiteturas de hardware modulares, que se enquadram no objetivo do sistema modular a desenvolver.

2.2.1 “Raspberry Pi” e módulos de expansão

O “Raspberry Pi” [21] (ver Figura 2.2a) é uma “*single-board computer*” que se destaca pelo baixo custo e pela elevada capacidade de processamento. As suas características principais são um chip Broadcom com processador ARM de 4 *core*, memória RAM (*Random Access Memory*), GPU (*Graphics Processing Unit*) e entrada para cartão SD (*Secure Digital*). Este sistema tem vários meios de comunicação, que é efetuada através dos seus periféricos, como a ligação USB, Ethernet, 40 pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*), Bluetooth e Wireless.



(a) “Raspberry Pi” de 4ª geração (b) “Raspberry Pi” e *board* de expansão com Módulos [23]. [22].

Figura 2.2: “Raspberry Pi” e *board* de expansão.

O projeto “Raspberry Pi” disponibiliza uma *board* de extensão para conectar a um GPIO de 40 pinos que poderá ter diversos tamanhos [23], como apresentado na Figura 2.2b. De forma a reduzir o custo, poder-se-á adquirir apenas o número de módulos necessário na aplicação, tendo um limite de 16 módulos. O GPIO de 40 pinos consiste em entradas e saídas digitais, que podem ser configuradas. Alguns dos pinos têm capacidade de comunicação SPI, I2C (*Inter-Integrated Circuit*), UART (*Universal asynchronous receiver/transmitter*), bem como gerar sinais PWM (*Pulse-Width Modulation*). Para a incorporação de módulos de entradas analógicas é necessário o desenvolvimento de um módulo pelo utilizador, isto é, uma placa que contenha um conversor analógico-digital e que comunique através dos pinos GPIO com diferentes possibilidades de comunicação (SPI, I2C e UART).

O “Raspberry Pi” tem uma grande capacidade de processamento, capaz de correr sistemas operativos, como o Linux. Tem uma elevada utilidade no desenvolvimento rápido de aplicações, como por exemplo para tratamento de dados. Consequentemente é utilizado em aplicações que vão ao encontro do conceito *Edge Analytics*, isto é, computação distribuída onde esta é feita junto das fontes de dados [1].

Dado a sua forte versatilidade, cada vez mais o “Raspberry Pi” é utilizado e aprimorado para diferentes aplicações no mercado. No entanto, este requer conhecimento ao montar os módulos de sinais digitais ou analógicos, como no desenvolvimento dos protocolos de comunicação, como também experiência no desenvolvimento dos módulos adequados de expansão por parte do utilizador. A instalação destes módulos requer uma grande quantidade de tempo de engenharia, uma vez que a sua utilização implica a programação através de ferramentas de baixo nível. Para além disso, a aplicação em ambiente industrial requer uma adaptação do *casing* para uma maior robustez da placa e proteção do ambiente exterior.

Na Subsecção 2.2.2 são apresentadas algumas soluções baseadas em “Raspberry Pi” com um *casing* adequado para aplicações industriais. Para além do *casing*, na indústria são requeridos também meios de proteção para ruídos eletromagnéticos que não se encontram incorporados no “Raspberry Pi”. É difícil a implementação dos meios de proteção, pois estamos sobre a presença de um modelo fechado. A alteração do mesmo requeria a alteração do fabricante no desenvolvimento do modelo.

2.2.2 “MyPi Industrial” e “Revolution Pi”



(a) “MyPi IoT Integrator Board” [24].

(b) “Revolution Pi” [25].

Figura 2.3: Soluções industriais baseadas no modelo “Raspberry Pi”.

O “MyPi IoT Integrator Board” [24], apresentado na Figura 2.3a, é um módulo baseado em “Raspberry Pi” adequado para aplicações de IoT (*Internet of Things*) em ambiente industrial, uma vez que apresenta um *casing* mais adequado. A “MyPi IoT Integrator Board” apresenta um sistema modular com uma diversidade de módulos de expansão. Existe a possibilidade de incorporação de módulos de E/S tal como a incorporação de módulos customizados pelo utilizador. A implementação deste sistema modular requer também o desenvolvimento dos módulos de expansão específicos e o conhecimento do utilizador de técnicas de implementação desta solução, como protocolos de comunicação (Modbus, Ethernet).

O “Revolution Pi” [25] também é um computador industrial modular que tem como base o “Raspberry Pi”. Este é capaz de incorporar uma variedade de módulos de expansão neste módulo base, módulos de entradas e saídas e *gateways/fieldbus*. O módulo base, “RevPiCore”, possui características idênticas ao “Raspberry Pi” mas com uma robustez adequada ao uso industrial, isto é, a sua estrutura/*casing* permite uma melhor instalação

na indústria. O equipamento possui um sistema operacional Raspbian, que é utilizado na maioria dos aplicativos desenvolvidos para o “Raspberry Pi”, dando ainda liberdade ao utilizador de criar as suas aplicações em linguagens como Python ou C. Possui diferentes módulos de comunicação, em que o módulo “RevPi Connect”, que através das suas portas Ethernet, Micro-USB e RS485, tem a capacidade de implementação de protocolos de comunicação tais como Modbus RTU (Remote Terminal Unit), Modbus TCP, e OPC UA (*Open Platform Communications United Architecture*).

Os módulos de expansão de E/S analógicas e digitais do “Revolution Pi” permitem a inclusão de sensores e atuadores no sistema modular “Revolution Pi”, tendo como entradas e saídas analógicas diferentes intervalos de tensão e corrente. É possível a ligação de sensores RTD (*Resistance Temperature Detector*) a canais incorporados em módulos específicos. Para conexão entre módulos de expansão é necessário o conector “PiBridge”, no qual pode usar a troca de sinais através de 4 pinos por sinais RS485 ou por Ethernet em 8 pinos diferentes.

Apesar de toda a versatilidade do “Revolution Pi”, a programação do mesmo requer um forte conhecimento e tempo por parte do utilizador. A programação e a construção de todas as tecnologias de comunicação com o exterior e com os módulos de expansão requer um grande custo de engenharia. Os módulos de expansão existentes não permitem a aquisição dos sinais que nos propomos adquirir neste projeto, sendo que a incorporação de novos módulos não está documentada.

2.2.3 “NI”

A empresa “National Instruments Corp” (“NI”) disponibiliza um sistema robusto de hardware de aquisição e controlo de dados que permite ser personalizado pelo utilizador. O sistema pode incluir dois tipos de controladores “CompactRio” [26] (ver Figura 2.4a) ou “CompactDAQ” [27] (ver Figura 2.4b) com robustez para a indústria, existindo também uma ampla oferta de módulos de expansão.

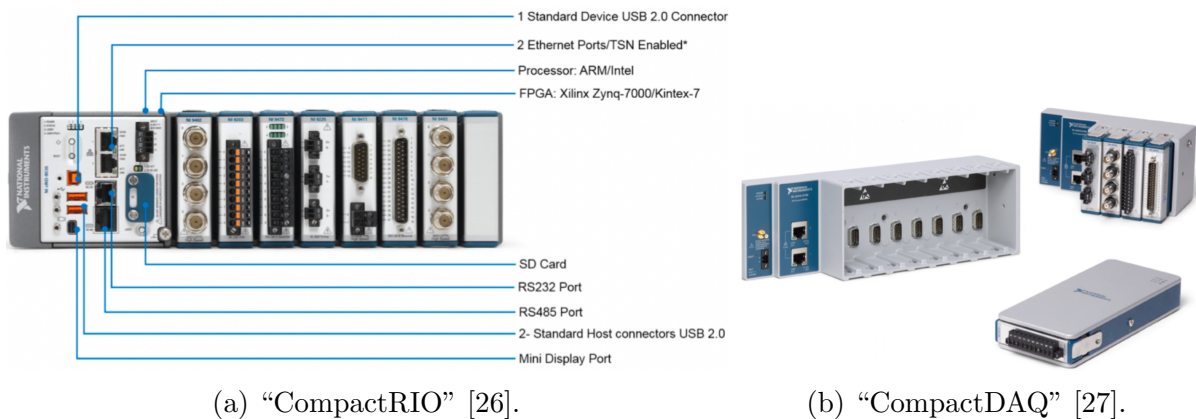


Figura 2.4: Soluções de sistemas modulares industriais da NI.

O “compactRIO” é um controlador integrado de alto desempenho, certificado para a indústria e que apresenta recursos de interface homem-máquina. O processador ARM Cortex-A9 ou Intel Atom, escolhido pelo utilizador, é capaz de executar o sistema operacional Linux Real-Time, com conseqüente liberdade de desenvolvimento de aplicações com restrições temporais, e comunicação com periféricos através de FPGA. O FPGA é

programável pelo utilizador, no entanto também é disponibilizada propriedade intelectual (IP) para reduzir tempo de desenvolvimento nas tarefas de aquisição de dados e processamento.

O “compactDAQ” é um controlador com um processador multi-core Intel Atom de alto desempenho com certificações padrão para a indústria, tendo suporte para correr Linux e Windows embedded 7. Admite desenvolvimento em diferentes linguagens de programação, tal como C#, C, Python e Lab Views, de forma idêntica ao “CompactRIO”. A solução possui memória interna SD e oferece uma ampla gama de opções de conectividade e expansão padrão, como USB, Ethernet, Canbus \ LIN e serial RS232.

O “compactDAQ” e o “compactRIO” possibilitam incorporar, no chassi, diversos módulos de expansão, nomeadamente módulos E/S analógicos e digitais de tensão e corrente, módulos de entrada de temperatura, entre outros. Os módulos de expansão podem ser conectados diretamente ao FPGA em vez da comunicação por um barramento, reduzindo a latência na resposta do sistema.

Ambos os sistemas “compactRIO” como “compactDAQ”, são caracterizados por serem bastante versáteis e modulares. Os ambientes de processamento são compostos por software livre que permite a incorporação de aplicações em diferentes linguagens de programação, contribuindo para IoT e para o conceito *Edge Analytics*. No entanto, os produtos requerem forte componente técnica por parte do utilizador tanto a nível de configuração e programação, como principalmente no estabelecimento de toda a comunicação. Nos módulos de entradas e saídas, é por vezes necessário a adição de um pré-processamento de sinal, conforme a utilidade requerida.

2.2.4 “Beckhoff”

A “Beckhof” [28] disponibiliza sistemas de automação industrial possuindo PCs (Portable Computer) industriais e componentes/módulos de E/S, integrados por *software* proprietário de automação.

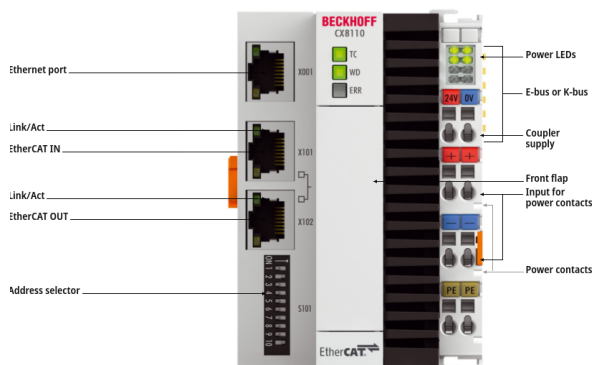


Figura 2.5: PC industrial embebedo com EtherCAT [28].

Existe na “Beckhof” uma elevada gama de PCs industriais embebedos, com uma variedade forte de processadores tais como, ARM Cortex, Intel Atom/Xeon/Pentium/-Celeron/Core i7 e AMD Ryzen. A “Beckhof” possui um diverso portfólio de módulos de E/S, com módulos para adquirir e gerar sinais binários e digitais, sinais analógicos de corrente e tensão [29]. O acoplamento entre módulos é feito por terminais laterais nos dispositivos, levando a uma economia no espaço e uma aplicação mais facilitada.

Estes são mecanicamente robustos, resistindo a ambientes agressivos com altas vibrações, choques e variações de temperatura. Estão igualmente disponíveis um largo número de módulos de comunicação, podendo escolher diferentes protocolos: Modbus, Ethernet, com destaque para o EtherCAT (*Ethernet for Control Automation Technology*). O protocolo EtherCAT é um protocolo de comunicação Ethernet com um desempenho e eficiência elevada, suportando restrições de tempo-real.

Embora apenas se consiga programar estes equipamentos através de ferramentas proprietárias da marca, estes sistemas permitem ao utilizador uma forte versatilidade nos modos de comunicação e na incorporação de diferentes módulos de E/S. Este produto destaca-se por ter um melhor *casing*, como os terminais de conexão entre módulos laterais, melhores características de desempenho com CPUs (*Central Processing Unit*) mais rápidos e pelo bom desempenho da comunicação entre módulos utilizando EtherCAT. Contudo a utilização desta solução, assim como as soluções apresentadas anteriormente, não seria possível uma vez que não existem módulos de expansão preparados para adquirir os sinais que pretendemos e com as taxas de aquisição necessárias.

2.2.5 Conclusões

A Secção 2.2 evidência a importância da capacidade modular do hardware para a indústria, observando-se a entrada de novos produtos cada vez mais expansíveis e abertos à integração de outros componentes. Este aumento da modularidade acompanha um contínuo desenvolvimento em termos de tecnologias de transmissão de dados, que garantem maior velocidade e confiabilidade na transmissão dos dados. A distribuição de equipamento de aquisição e processamento têm permitido o processamento local dos dados, combatendo os problemas no conceito *Edge Analytics*. No Apêndice B é possível observar um estudo das arquiteturas IoT, onde é explícito os diferentes métodos de gestão dos dados no hardware e software até ao utilizador.

No entanto, todas as soluções identificadas requerem, ainda, um forte conhecimento do utilizador na sua implementação. Para além disso, nenhuma das soluções encontradas compatíveis com a utilização industrial permitiria a aquisição dos sinais que nos propomos a adquirir (tensão, corrente e vibração) com as taxas de aquisição pretendidas. Poder-se-ia utilizar o módulo principal de processamento, mas teria-se sempre que desenvolver um módulo de expansão específico para estas aplicações. Tal facto não é possível porque não é dada informação necessária, como por exemplo o protocolo de comunicação que é utilizado na comunicação entre o módulo principal e os módulos de expansão. Para além disso, a solução a desenvolver ficaria dependente das decisões que pudessem no futuro ser tomadas por terceiros sobre os produtos que estaríamos a adquirir.

É assim objetivo do presente projeto desenvolver uma solução mais simples e direta para o utilizador, com capacidade de incorporar módulos de expansão, cujos condicionamento de sinal e sistema de comunicação intra-componentes estejam definidos. Ou seja, um sistema modular que cumpra as necessidades do projeto e que tenha uma aplicação em campo facilitada, indo ao encontro do conceito *plug & play*.

2.3 Estudo de módulos específicos

Após a pesquisa de sistemas modulares e arquiteturas que fossem ao encontro das expectativas do projeto iProMo, fez-se um estudo onde se inclui o módulo de processamento

(mPP) e os módulos de expansão para a aquisição de variáveis de campo específicas (mSE e mSV). No âmbito do projeto iProMo pretende-se adquirir sinais elétricos (tensão e corrente) e sinais de vibração, pelo que se efetuou o estudo do hardware correspondente isoladamente.

2.3.1 Módulo principal de processamento (mPP)

Definiu-se o mPP como um sistema embebido com um processador de elevado desempenho e os necessários componentes de suporte (memória, armazenamento, comunicação, etc). Pretende-se também que a solução tenha um *hardware* protegido contra interferências eletromagnéticas e baixa necessidade de arrefecimento.

Analisando soluções similares ao mPP, verificamos uma constante evolução nas suas arquiteturas, cuja tendência tem sido a melhoria dos sistemas de interação homem-máquina. Encontram-se soluções amplamente utilizadas, tanto em ambiente industrial, como doméstico, devendo ser adaptados conforme a necessidade de cada ambiente. Em termos de aplicação, estes equipamentos trazem melhores capacidades de computação e comunicação. Consequentemente melhoram a eficiência dos sistemas de controlo inteligente associados. Os dados apresentados podem ser consultados nos trabalhos [30] e [31].

Em muitos casos o módulo de processamento executa um sistema operativo, como o Linux, que permite a instalação e desenvolvimento de software específico por parte do utilizador. O desenvolvimento de software é efetuado em linguagens de alto nível, como as linguagens C++/Python. A descrição do estudo da arquitetura do módulo principal encontra-se no Apêndice A Secção A.1. Este módulo possui periféricos de comunicação com outros módulos e sistemas exteriores ao sistema modular, sendo os principais meios de comunicação (descritos em Apêndice A Secção A.2) USB, Ethernet, Comunicação Serial RS485, SPI e I2C.

De seguida são apresentados módulos *Open Source* de alto processamento.

“OLinuXino A64”

“A64 OlinuXino” é a gama mais recente da “OLinuXino” [32, 33, 34], projetado pela “OLIMEX LTD”. “OLinuxino” foi produzido para ter um baixo custo, sendo disponível em *Open source software* e *hardware*, o que significa que todo o seu código aberto e projeto são disponibilizados em arquivos completos.

	1G0G	1G4GW	2G16G-IND
CPU	1,2 GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 64-bit	1,2 GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 64-bit	ALLWINNER 1,2 GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 64-bit
RAM	1 GB	1 GB	2 GB
Comunicações	UART, Ethernet, Modbus, UEXT (SPI, I2C)	UART, Ethernet, Wireless e Bluetooth, UEXT (SPI, I2C)	UART, Ethernet, Modbus, UEXT (SPI, I2C)
Conectores	GPIO (40 pinos), HDMI, USB, Micro USB, Micro SD, Ethernet	GPIO (40 pinos), HDMI, USB, Micro USB, Micro SD, Ethernet	GPIO (40 pinos), HDMI, USB, Micro USB, Micro SD, Ethernet
Sistemas Operativos	Android, Linux	Android, Linux	Android, Linux

Tabela 2.1: Modelos “OLinuXino A64”.

Observando as características dos modelos “OLinuXino A64” presentes na Tabela 2.1, verifica-se que possui um CPU recente, com 4 núcleos de processamento, uma velocidade

de relógio de 1,2 GHz e uma arquitetura ARM, caracterizado por um tamanho reduzido e um menor consumo de energia. O microcontrolador possui portas para ligação a periféricos, Ethernet, GPIO, HDMI (*High Definition Multimedia Interface*), USB e UEXT (*Universal EXTension*). Permite estabelecer protocolos de comunicação por I2C, SPI, UART e ModBus (RS232 e RS485). Tem a capacidade de correr sistemas operativos como Android e Linux. O “OLinuXino A64 2G16G-IND” destaca-se por possuir 2 GB de RAM e maior robustez industrial, sendo capaz de operar entre os -40 a 85 °C.

“Beagleboard”

	BeagleBone Black/Rev C	BeagleBoard X15
CPU	Texas Instruments Sitara AM3359AZCZ100 Cortex A8 @ 1 GHz	Sitara AM5728 Dual Core 1,5 GHz ARM Cortex A15 Processor
RAM	512 MB	2 GB
Comunicações	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus	UART, Gigabit Ethernet, Modbus, SPI, I2C
Conectores	Micro HDMI, USB, GPIO 2x 46 pinos, Ethernet	4×60-pin headers, Micro HDMI, USB 3.0, eSATA, Micro SD
Sistemas Operativos	Android, GNU/Linux	Android, GNU/Linux

Tabela 2.2: Modelos “BeagleBoard”.

São apresentadas as placas mais recentes da “Beagleboard” na Tabela 2.2 [35], desenvolvidas em 2013 e 2015 que se apresentam desatualizadas. Podemos observar que o “BeagleBoard X15” apresenta duas vantagens significativas relativamente ao “BeagleBone”: 1) processador ARM Cortex da Texas Instruments com velocidade de relógio de 1,5 GHz e 2) memória RAM superior, 2 GB. Ambos os módulos apresentam portas para ligação a periféricos idênticos, possuindo os mesmos protocolos de comunicação como I2C, SPI, Modbus e Ethernet. O “BeagleBoard X15” possui ainda uma porta SATA (*Serial Advanced Technology Attachment*), permitindo a ligação de um disco HDD (*Hard Disk Drive*) ou SSD (*Solid State Drive*) ao módulo, permitindo aumentar o armazenamento.

“OpenRex”

O projeto “iMX6Rex” foi desenvolvido por Robert Feranec e Martin Murin, onde todos os documentos a nível de hardware e software são públicos. Este módulo tem por base o “Raspberry Pi” e o “Arduino”, sendo uma junção de ambos. As características referentes aos modelos “OpenRex” são apresentadas na Tabela 2.3 [36, 37, 38].

Ambos os modelos têm as seguintes ligações disponíveis para periféricos: Micro-USB, USB, HDMI, GPIO, Ethernet, SATA, entre outros. Disponibiliza uma forte versatilidade nos protocolos de comunicação (I2C, SPI, Ethernet e Modbus), com o HDMI que permite a ligação de periféricos de escrita e imagem para a sua programação, e SATA para a ligação de discos HDD e SSD. Estes microcontroladores têm compatibilidade com vários sistemas operativos como Windows embedded, Linux e Android. Possuem uma família de processadores ARM da NXP, com 4 núcleos de processamento e velocidade de 1 GHz, exceto o módulo “UltraPlus” que tem uma velocidade de 1,2 GHz. Estes processadores de 32 bits, ao serem da mesma família NXP (i.MX6) permitem uma passagem mais facilitada para um processador de 64 bits. Destaque nas versões “Plus” e “Ultra plus” o uso de 4 GB de memória RAM, o que poderá permitir aplicações mais exigentes no módulo principal.

	iMX6 OpenRex SBC	iMX6 OpenRex SBC Ultra	iMX6 OpenRex SBC UltraPlus
CPU	NXP i.MX6 ARM Cortex A9 QuadPlus CPU, 1 GHz	NXP i.MX6 ARM Cortex A9 QuadPlus CPU, 1 GHz	NXP i.MX6 ARM Cortex A9 QuadPlus CPU, 1,2 GHz
RAM	2 GB	4 GB	4 GB
Comunicações	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus, SATA	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus, SATA	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus, SATA
Conectores	HDMI, USB, Micro USB, GPIO, Ethernet, SATA, Micro SD, Touch Screen	HDMI, USB, Micro USB, GPIO, Ethernet, SATA, Micro SD, Touch screen	HDMI, USB, Micro USB, GPIO, Ethernet, SATA, Micro SD, Touch Screen
Sistemas Operativos	Windows Embedded, Linux, Android	Windows Embedded, Linux, Android	Windows Embedded, Linux, Android

Tabela 2.3: Modelos “OpenRex”.

“Banana Pi”

Os módulos “Banana Pi” [39, 40] foram desenvolvidos com uma base no “Raspberry Pi”, mas seguindo a filosofia de *Open Source Software* e *Open Hardware*. Apesar da fraca documentação para o estudo dos módulos, estes apresentam uma gama vasta de modelos com dois e quatro núcleos, com arquitetura ARM, MediaTek e Allwinner.

	BPI-M2+	BPI-M4
CPU	Allwinner H3 Quad-core 1,2 GHz Cortex-A7	Realtek RTD1395 ARM Cortex-A53 Quad-Core 64 Bit
RAM	1 GB	1 GB/2 GB
Comunicações	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus	UART, Ethernet, Modbus, SPI, I2C
Conectores	Micro HDMI, USB, GPIO 65 pinos, Ethernet	Micro HDMI, USB, GPIO, Ethernet, USB type-c
Sistemas Operativos	Android, GNU/Linux	Android, GNU/Linux

Tabela 2.4: Modelos “Banana Pi”.

Na Tabela 2.4 são apresentadas as características de dois modelos “Banana PI” com portas de ligação a periféricos idênticos ao “OpenRex”, tirando o modelo “BPI-M4” que possui ligação *Type C*. Estes apresentam CPU, com 4 núcleos, e elevada velocidade de processamento. O modelo “BPI M4” já apresenta um processador com 64 bits. São executados sistemas operativos, como Android e Linux.

“Cubieboard”

A “Cubieboard” possui uma grande variedade de versões desde o “Cubieboard 1” ao “Cubieboard 9”, de 512 MB a 3 GB de RAM, com processadores ARM de 1 a 8 núcleos.

Na Tabela 2.5 são apresentados 3 modelos [41] com características idênticas ao pretendido neste projeto. Os “cubieboard 5”, “cubieboard 6” e “cubieboard 7” possuem 2 GB de RAM e a sua principal diferença reside nos processadores, onde o “cubieboard 5” possui um processador de 8 núcleos com uma velocidade de 2 GHz. Estes modelos possuem portas de ligação a vários periféricos e utilização de diferentes protocolos de comunicação, como I2C, SPI, UART, ModBUS e Ethernet.

	Cubieboard 5	Cubieboard 6	Cubieboard 7
CPU	ALLwinner H8 Octa core Cortex-A7 - 2,0 GHz	Actions S500 Cortex-A9 Quad-core	Actions S700 Cortex-A53 Quad-core
RAM	2 GB	2 GB	2 GB
Comunicações	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus	UART, Ethernet, Modbus, SPI, I2C
Conectores	HDMI, USB, Micro USB, GPIO, Ethernet, SATA	HDMI, USB, Micro USB, GPIO, Ethernet, SATA	GPIO, HDMI, USB, Micro SD
Sistemas Operativos	Android, GNU/Linux	Android, GNU/Linux	Android, GNU/Linux

Tabela 2.5: Modelos “Cubieboard”.

“HummingBoard”

	HummingBoardBase	HummingBoardPro
CPU	NXP’s i.MX6 Single to Dual Core ARM Cortex A9 processor (up to 1 GHz)	NXP’s i.MX6 Single to Dual Core ARM Cortex A9 processor (up to 1 GHz)
RAM	1 GB	2 GB
Comunicações	UART, Ethernet, SPI, I2C, Canbus/modbus	UART, Ethernet, Modbus, SPI, I2C
Conectores	HDMI, Micro USB, USB, GPIO 65 pinos, SATA	HDMI, USB, GPIO, Ethernet, USB type-c, SATA
Sistemas Operativos	Linux	GNU/Linux, Android

Tabela 2.6: Modelos “HummingBoard”.

Os modelos “HummingBoard” [42, 43] são apresentados na Tabela 2.6. Os seus processadores são idênticos ao módulo “OpenRex”, com a arquitetura ARM, velocidade de 1 GHz e dois núcleos de processamento, fazendo parte da mesma família de processadores NXP i.MX6. Existe a possibilidade destes módulos possuírem um processador com 4 núcleos (*QuadCore*). O módulo “HummingBoard Pro” destaca-se em relação ao módulo “HummingBoard Base”, pela capacidade de memória RAM 1 GB superior, ligação por Type-c e porta Ethernet. Este último tem uma maior compatibilidade com sistemas operativos, Linux e Android.

Conclusões

Após a análise dos módulos, podemos observar uma vantagem no uso de módulos *Open Source* em relação ao “Raspberry Pi”, uma vez que não existem restrições no uso pessoal ou comercial, e possuem documentação de apoio ao desenvolvimento.

São evidenciadas características comuns nos diferentes módulos apresentados, possuindo diversas portas de entrada e de saída que permitem o estabelecimento dos protocolos de comunicação I2C, SPI, UART, ModBus e Ethernet. Repara-se uma vantagem clara no uso da arquitetura ARM em processadores: trata-se de uma arquitetura mais simples, com menor consumo de energia, mais eficiente e com diversidade de aplicações científicas crescente [44]. O uso desta arquitetura de microprocessador permitirá ter um uso mais eficiente do módulo principal, no processamento de dados para processamento de algoritmos de complexidade elevada. A maioria dos módulos correm o sistema Android e Linux. É observada uma forte variedade de módulos com diferentes características, adaptáveis para diferentes aplicações.

É objetivo final o desenvolvimento do módulo principal de processamento de encontro aos módulos apresentados nesta secção, com uma arquitetura e desempenho idêntico. O módulo principal deverá ser adaptado à nossa aplicação e desenhado com a robustez e meios de proteção para a aplicação em ambiente industrial.

2.3.2 Módulo de expansão de sinais elétricos (mSE)

Pretende-se desenvolver um módulo de expansão para aquisição de sinais elétricos (mSE), tendo como aplicação inicial um contador de energia com capacidade de desagregação de cargas de equipamentos. Pretende-se adquirir os sinais de corrente e tensão com uma boa precisão, e calcular o consumo de energia de cada equipamento ao longo do tempo. Após aquisição e respetivo processamento dos sinais elétricos, procede-se à transmissão da informação para o mPP.

Existem dois tipos bem conhecidos de contadores: os contadores eletromecânicos e os contadores eletrónicos [45]. Os contadores eletromecânicos baseiam-se num pequeno motor elétrico, em que a tensão e a corrente em fase, faz girar o motor com uma velocidade proporcional à potência, logo o número de voltas será proporcional à energia consumida [45]. Apesar deste contador permitir o cálculo de energia consumida, este não permite a verificação da boa funcionalidade e o processamento dos sinais recebidos, isto é, a observação do sinal real de corrente e tensão obtido. Assim, o estudo concentra-se nos contadores eletrónicos.

2.3.2.1 Contadores eletrónicos

Os contadores eletrónicos têm uma maior aplicação na indústria, devido a sua construção permitir um fornecimento de informações mais versátil. Estes dispositivos têm integração de circuitos de condicionamento dos sinais e o processamento digital dos mesmos. Os dados são disponibilizados através de protocolos de comunicação, o que torna os contadores eletrónicos mais adaptáveis para aplicações industriais.

Arquitetura

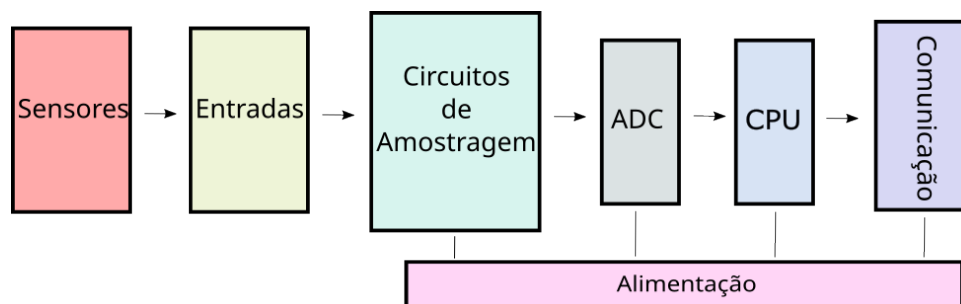


Figura 2.6: Arquitetura geral de contadores de energia.

A Figura 2.6 apresenta uma arquitetura geral dos contadores de energia. Os sensores respondem a um estímulo físico, que neste caso serão tensões e correntes elétricas, e transmitem a informação para os circuitos de condicionamento e amostragem. No caso específico dos contadores eletrónicos as grandezas físicas geradas pelos sensores são, normalmente, proporcionais com as grandezas físicas lidas pelos mesmos (tensão e corrente). No entanto é de evidenciar que as gamas de leitura são normalmente diferentes. Os

circuitos de condicionamento de sinal têm como principal função receber o sinal e tratá-lo de forma a ficar na faixa adequada para permitir a conversão do sinal analógico para digital. Para a conversão do sinal são usados ADCs, que transmitem o sinal para a unidade de processamento, e um microcontrolador/microprocessador/DSP (*Digital Signal Processors*)/ FPGA (*Field Programmable Gate Array*), que executa um processamento local dos dados. Nos contadores eletrônicos está incluído um circuito de alimentação que permite converter o sinal AC (*Alternating Current*) num sinal DC (*Direct Current*). Normalmente, a conversão é feita por um transformador para uma tensão alternada mais reduzida e depois é usada a ponte retificadora com um condensador que permite obter o sinal DC. A alimentação deste módulo poderá ser através de uma fonte DC de 24 V e usado um circuito de conversão para os 5 VDC, para a alimentação dos componentes constituintes do módulo. Neste tipo de equipamentos incluem-se periféricos que permitem a comunicação com o módulo principal de processamento ou com um computador externo através de, por exemplo, Modbus (RS-485/RS-232). Esta arquitetura e suas características são descritas com mais detalhe em [46, 47].

Sensores e circuito de Amostragem de tensão

Na indústria, os sinais de tensão são frequentemente trifásicos, com uma leitura de tensão de aproximadamente 230 VAC RMS em cada fase em relação ao neutro. Para o processamento dos valores desta faixa de valores de tensão, a mesma precisa de ser condicionada à faixa de tensão admissível pelo ADC, e para isso necessita-se de reduzir este valor para um proporcional numa faixa mais baixa.

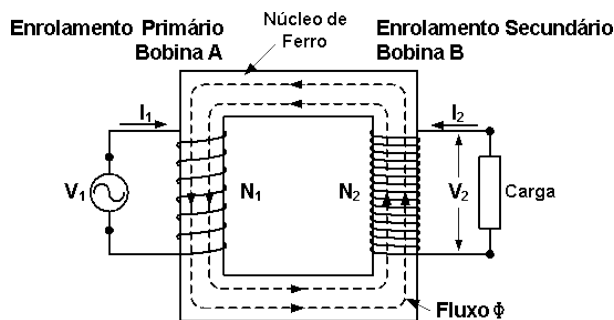


Figura 2.7: Transformador de tensão [48].

Pode-se reduzir a tensão através do **transformador de tensão** (ver Figura 2.7), em que a primeira bobina que recebe o sinal de tensão irá gerar um campo magnético, que irá influenciar a segunda bobina e gerar um sinal de tensão reduzido proporcional à primeira. Esta relação de proporcionalidade pode ser obtida pela relação do número de espiras da primeira e segunda bobina. Usar o transformador de tensão permite a vantagem do isolamento do sinal, não estando este diretamente a ser medido e permitindo melhores proteções contra picos de tensão. O uso do transformador de tensão como sensor de tensão tem um custo elevado e é um sensor volumoso.

Outro método de redução do sinal de tensão é através do uso do **divisor de tensão**, que terá um custo mais baixo e menor dimensão em relação ao transformador de tensão, onde já existem resistências SMD que aguentam elevadas tensões. Este permite o tratamento real do sinal, não estando isolado do sistema de rede, o que poderá ser uma desvantagem ao termos picos de tensão, pois requer um dimensionamento do circuito de forma a reduzir estes picos de tensão, como por exemplo ao introduzir uma resistência na entrada do

ADC. Apesar disso, o uso do divisor de tensão tem a vantagem de uma melhor precisão de medição nos contadores de energia, pois o erro de medição nos contadores que usam transformadores de tensão provém maioritariamente dos transformadores. Pode ser observado nos seguintes trabalhos [49, 47, 46] exemplos da implementação descrita.

O sinal de tensão recebido pode requerer algum tratamento como, por exemplo: (a) o uso de um divisor de tensão; (b) tratamento do sinal para a compatibilização com o sinal de entrada do ADC e (c) o uso de condensadores e resistências para a construção de um filtro do sinal proveniente da rede (neste trabalho não foi aplicado este filtro porque queremos adquirir um sinal com o menor processamento possível uma vez que pretendemos fazer uma análise espectral do mesmo). No trabalho [49] pode ser observado um exemplo da aplicação destes tratamentos de sinal.

Sensores e circuito de Amostragem de Corrente

Os sensores de corrente lidam com altos valores de corrente, sendo necessário converter a corrente medida num valor de tensão proporcional. Podem ser usados diferentes sensores de corrente, como por exemplo, a resistência de *shunt*, o transformador de corrente, sensor de efeito de Hall e sensor de Rogowski:

- A **resistência de *shunt*** [50], consiste no uso de uma resistência em que o seu valor é conhecido. Recorrendo ao princípio da Lei de Ohm, a corrente irá passar por esta resistência, provocando uma tensão nos terminais da resistência proporcional à corrente a ler. Este é um método simples de medição da corrente e de baixo custo. O problema desta medição está no uso de correntes altas, pois a potência de dissipação leva a um aumento significativo da temperatura, tornando-se inadequado na medição de altas correntes.

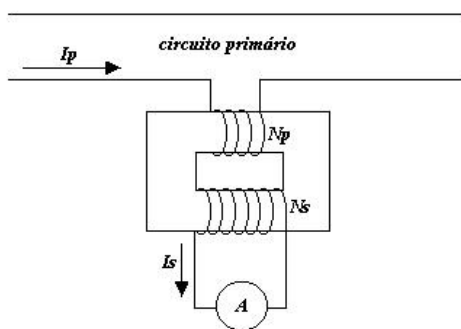


Figura 2.8: Transformador de corrente [51].

- O **transformador de corrente** [46, 50], apresentado na Figura 2.8, usa a mesma tipologia que o transformador de tensão. Ao ser uma corrente na bobina primária, irá gerar um campo magnético, induzindo um campo na segunda bobina e produzir uma corrente proporcional à corrente da primeira bobina. Este sensor tem também uma dimensão considerável e uma proteção a correntes elevadas por permitir o isolamento do sistema de rede.
- O **sensor de rogowski** [53], apresentado na Figura 2.9, consiste numa bobina de indutância mútua. Ao se colocar um fio percorrido por uma corrente no centro do sensor, gera-se um campo magnético que irá influenciar a bobina do sensor e gerar uma tensão nos seus terminais. Este sensor é facilmente influenciado por

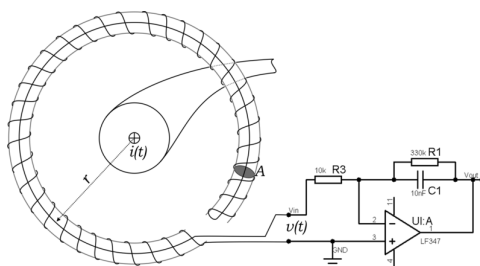


Figura 2.9: Sensor de Rogowski [52].

campos externos, mas permite obter o sinal de corrente através da integração do sinal tensão, utilizando um circuito de integração (amplificador com condensador entre a entrada inversora e saída). Este é adequado para a medição de corrente em ambiente industrial, uma vez que permite a leitura de elevadas correntes, uma gama de frequências de leitura grande e é de fácil aplicação (permite que a bobina seja aberta para colocação nos condutores). Este também permite o isolamento do sinal do sistema de rede.

- O **sensor de efeito de Hall** [50] usa o mesmo princípio que o sensor de Rogowski, mas apresenta uma má linearidade (relação entre o sinal gerado e a grande física medida) e um custo elevado.

Pode observar na Tabela 2.7 a comparação de características destes sensores anteriormente descritos.

Sensores de Corrente	Resistência de shunt	Transformador de corrente	Bobina de Rogowski	Sensor de efeito Hall
Custo	Muito baixo	Baixo	Baixo	Elevado
Linearidade	Boa	Média	Boa	Má
Medição de correntes elevadas	Má	Boa	Boa	Boa
Consumo	Elevado	Baixo	Baixo	Médio
Saturação de Correntes	Não	Sim	Não	Sim
Variação com a temperatura	Média	Baixa	Muito Baixa	Alta
Saturação e histerese	Não	Sim	Não	Sim
Isolamento	Não	Sim	Sim	Sim

Tabela 2.7: Tabela de comparação dos sensores de corrente [45].

Dependendo dos métodos, os sinais de saídas destes sensores podem requerer algum tratamento. Os tratamentos típicos que podem ser necessários são: aumento do seu ganho através de um amplificador, ajuste do *offset*, integração do sinal (no caso do sensor de Rogowski), filtros para eliminação de ruído, entre outros. Como exemplo, para a conversão do sinal de analógico para digital é preciso um ajuste do sinal para uma gama admissível pelo ADC.

Conclusões

Para adquirir os sinais de tensão e de corrente, foram feitas as análises de circuitos e sensores de amostragem. Nos sensores e circuitos de amostragem de tensão, verifica-se vantagem no uso de divisor de tensão, pois iremos tratar diretamente o sinal real apesar de lidarmos com elevadas tensões. Este irá também ter um menor erro de medição

devido à não utilização de transformadores. Nos sensores e circuitos de amostragem de corrente, verificamos uma melhor adequação do sensor de Rogowski para o uso em ambiente industrial devido à sua capacidade de medição de elevadas correntes, fácil aplicação, e por ser pouco influenciado por mudanças de temperaturas. O sensor de Rogowski tem uma gama de frequências de leitura extensa e uma boa linearidade, permitindo uma melhor análise dos sinais de correntes. Observando a tabela na Figura 2.7 verificamos um baixo custo e consumo, que são características importantes na aplicação industrial.

2.3.3 Módulo de expansão de sinais de vibração (mSV)

No projeto iProMo pretende-se desenvolver um módulo de expansão de sinais de vibração (mSV), com o objetivo de monitorizar o enchimento do moinho de cimento no processo de fabricação do mesmo. Os sinais são adquiridos através de um sensor de vibração localizado junto à câmara do moinho de cimento. Após a aquisição dos sinais de vibração, e conseqüente processamento, é possível obter informação relativa ao enchimento de moinho. A monitorização do enchimento do moinho permite aumentar a eficiência no processo industrial de fabrico de cimento. Se conseguir fiávelmente monitorizar o enchimento do moinho, pode-se otimizar o controlo do enchimento e permitir uma boa moagem e estabilidade no fabrico. A otimização da operação do moinho conduz também a poupanças energéticas. Para além da aplicação demonstrada do projeto iProMo, a análise da vibração permite outras aplicações como motores, turbinas eólicas, ventiladores, rolamentos, entre outros [54].

Arquitetura

A arquitetura do módulo de sinais de vibração, de modo a fazer a medição de sinais de vibração e recolher *features* dos mesmos, requer uma arquitetura idêntica ao módulo de sinais elétricos (ver Figura 3.6). A principal diferença encontra-se na recolha dos sinais provenientes de campo, que neste caso são através de um sensor de vibração com uma saída em tensão. Após a recolha destes sinais é necessário um circuito de condicionamento de sinal de modo a ficar numa faixa admissível para o ADC. Após a conversão do sinal analógico para digital, é requerida uma unidade local de processamento (CPU) para o processamento local dos dados de forma *online*. Uma melhor descrição desta arquitetura pode ser vista na Subsecção 2.3.2. De notar que nesta dissertação, e conforme anteriormente referido, não se fará o processamento local dos dados, sendo que os mesmos serão enviados em “*raw*” para o módulo principal de processamento.

Sensores de vibração

Os sensores de vibração permitem medir as acelerações que o afetam em campo e gerar um sinal de tensão proporcional. É apresentado o estudo dos diferentes tipos de sensores de vibração atuais no mercado:

- **Acelerómetros** [55, 54, 56] é um tipo de sensor analógico que mede as mudanças de velocidade (acelerações). Este componente, o acelerómetro, é fixo no local que se pretende a medição de vibrações. A medição é feita para uma gama de acelerações de -g a +g, produzindo um sinal elétrico de saída proporcional a este. Existem 3 tipos de acelerómetros:

- **Acelerómetro piezoelétrico** [55, 57] (ver Figura 2.10) é constituído por um cristal ou material, por exemplo o quartzo, no qual ao ser aplicada uma tensão mecânica (vibração) gera uma tensão positiva ou negativa. Estes são caracterizados como eficazes e confiáveis, tendo uma alta precisão em altas frequências. A aplicação destes sensores é flexível pois não são sensíveis a campos magnéticos, o que possibilita a acoplação com íman junto da superfície pretendida para a leitura de vibração. A sua desvantagem é o preço elevado e o maior consumo de energia relativamente a outros sensores. Estes sensores são os mais comuns atualmente para a medição de vibrações, existindo sensores de medição nos três eixos de vibração (X, Y e Z), dois eixos ou apenas em um eixo (X ou Y ou Z).
- **Acelerómetro piezoresistivo** [55, 56] (ver Figura 2.10) é um sensor que tem o mesmo princípio que o acelerómetro piezoelétrico mas utiliza um material resistivo, como o silício, em que muda a sua resistividade com a tensão mecânica (vibrações). Estes são mais caros que os acelerómetros piezoelétrico, medem numa gama de frequências maior, têm menos amortecimentos internos e não ampliam ressonâncias.

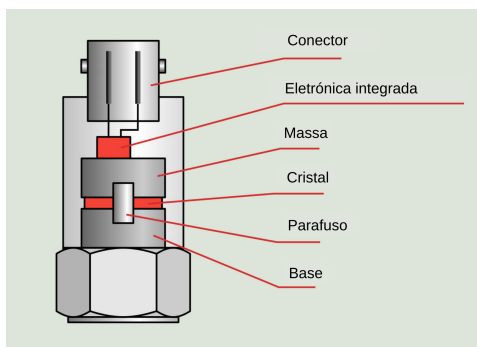


Figura 2.10: Acelerómetro piezoelétrico/piezoresistivo [58].

- **Acelerómetro capacitivo (MEMS)** [55, 56] (ver Figura 2.11) consiste no funcionamento de um condensador que com as vibrações faz com que se altere a capacidade do mesmo. O acelerómetro capacitivo é menos preciso e tem uma banda de frequência mais estreita, proporcionando assim uma menor qualidade dos dados. Para algumas aplicações é boa o suficiente, como por exemplo telemóveis, estando a sua qualidade a aumentar na precisão e estabilidade. Estes são os acelerómetros mais económicos.
- **Medidor de deformações (*strain gauges*)** [54, 56] (ver Figura 2.12) é um sensor que consiste numa folha com um circuito elétrico condutor que estica e encolhe, e conseqüentemente aumenta e diminui a resistência elétrica proporcionalmente. Este tem uma aplicação complicada, precisando de uma boa aderência no meio em que são aplicados, ou seja tem de estar perfeitamente colado na superfície, de forma a medir a deformação/esforço do material quando vibra. Estes sensores são baratos, precisos e melhor aplicáveis em superfícies curvas.
- **Sensores de proximidade** [54] é um tipo de sensor de vibração sem contacto com o local de vibração. Estes sensores pretendem medir a distância entre o objeto e a sonda de medição, conforme a sua variação. Este captará os movimentos de um

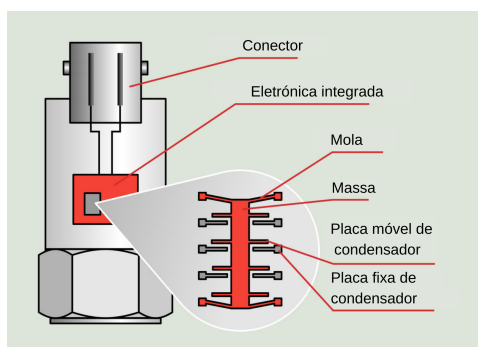


Figura 2.11: Acelerômetro capacitivo (MEMS) [59].

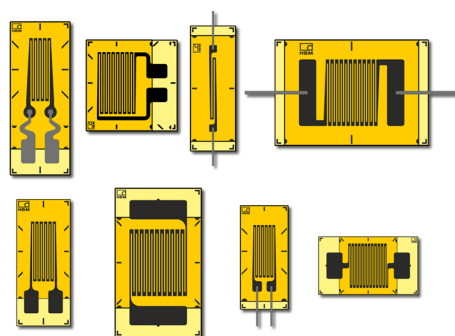
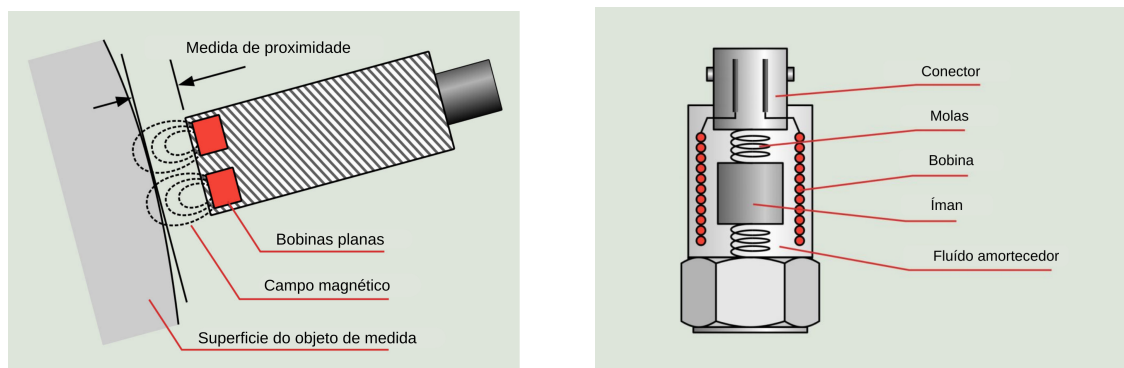


Figura 2.12: Medidor de deformações (strain gauges) [60].

objeto em relação a outro, necessitando que um deles esteja fixo. A medição dos movimentos relativos pode ser feito de diferentes formas:

- **Laser** [54, 56, 57] usa a triangulação de um feixe laser para observar as variações relativas do objeto, sendo este bastante preciso. Estes funcionam em ambientes limpos que não requerem grande intervenção. Não são aconselhados para ambientes com maiores distúrbios, pois é necessária a posição fixa de um dos objetos do sensor.
- **Microfone ou sensor de pressão acústica** [54, 56] mede a vibração relativa através da acústica presente no ar transmitida pelo movimento vibratório. Este não é aconselhado para medição de dados absolutos de choque e vibração. São económicos apesar da sua informação limitada, uma vez que não se consegue identificar a fonte exata das vibrações.
- **Capacitivo e correntes de Foucault** [54, 57] (ver Figura 2.13a), este baseia-se em sensores que produzem campos magnéticos para medir o movimento relativo de um objeto. O capacitivo tem o mesmo princípio mas gera campos magnéticos fortes entre duas placas condutoras, em que o movimento de uma das placas irá alterar a capacidade entre as placas. Estes sensores são caros, têm uma alta precisão e normalmente são usados em laboratórios por serem sensíveis.
- **Sensores de velocidade** [56, 57] (ver Figura 2.13b), têm o objetivo de medir a velocidade oscilatória, por exemplo um íman dentro de um enrolamento da bobina a sua oscilação irá gerar uma força eletromotriz proporcional à velocidade de oscilação. Este não necessita de entradas elétricas para a medição da vibração/oscilação. Os



(a) Sensor de proximidade capacitivo [58].

(b) Sensor de velocidade [58].

Figura 2.13: Sensores de proximidade capacitivo e de velocidade.

sensores têm uma faixa de temperatura alta, são usados para medir baixas e médias frequências e têm um custo elevado.

Conclusões

É observada uma variedade de sensores de vibração com diferentes capacidades e aplicações. Podemos agrupar estes sensores em 4 grandes grupos: acelerômetros, medidores de deformações, sensores de proximidade e sensores de velocidade. Os sensores de proximidade, apesar de terem vários métodos de medição e serem precisos, não são os mais adequados para o objetivo do projeto. O nosso objetivo requer a medição das vibrações numa câmara de cimento, sujeita a um ambiente não limpo. Por vezes, pode requerer a calibração do sensor e a alteração da posição do mesmo para obter melhores sinais de campo. Este tipo de ambiente e a possibilidade de um sensor flexível, torna os sensores de proximidade desadequados uma vez que medem o deslocamento entre duas estruturas. Os medidores de deformações também têm uma aplicação complicada no nosso ambiente, devido a requererem uma aplicação perfeita do mesmo, conforme explicado anteriormente. O sensor de velocidade, neste caso de aplicação, não se torna adequado, uma vez que é importante este sensor trabalhar em taxas de frequência altas (ordem 10 kHz). O acelerómetro adequa-se melhor à nossa aplicação, pois não é influenciado por campos magnéticos, permitindo a fácil e flexível aplicação do sensor no moinho através do uso de um íman. Neste tipo de sensores (acelerómetros), destaca-se o uso de acelerómetros piezoelétricos que têm uma alta precisão para altas frequências. São atualmente os sensores mais comuns, apesar do maior consumo de energia e o custo mais elevado.

2.4 Análise final

A Secção 2.2 realça a importância no uso de arquiteturas modulares e as suas capacidades de processamento. O desenvolvimento do módulo principal, com uma comunicação comum a todos os módulos (SPI), permitirá a incorporação de módulos de expansão com a devida transmissão dos sinais recolhidos pelos módulos de expansão ao módulo principal. No módulo principal efetua-se o processamento dos dados recolhidos. O uso de comunicação para meios externos (Ethernet) permitirá monitorizar o funcionamento global do sistema.

Pretende-se desenvolver o mPP com meios de comunicação robustos para o meio interno e externo do sistema modular. O mPP terá meios de proteção adequados para a aplicação industrial e um bom desempenho. É fulcral a escolha do processador e das taxas de transmissão dos dados.

Para o desenvolvimento dos módulos de expansão de sinais elétricos e de vibração (mSE e mSV) é importante a escolha de sensores com as características mais adequadas para o uso em ambiente industrial. Destaca-se neste caso o uso de divisor de tensão e sensor de Rogowski, conforme apresentado. Neste projeto para além da implementação dos sensores, é importante definir este módulo com um circuito de condicionamento que permita a conversão do sinal analógico para digital, e posteriormente a transmissão dos dados para o módulo principal para o seu tratamento.

Capítulo 3

Arquitetura de hardware modular para ambientes industriais

Neste capítulo é apresentada a arquitetura de hardware modular desenvolvida neste projeto para ambientes industriais. Em primeiro, é elaborada a análise de requisitos do sistema modular (Secção 3.1), seguindo-se a apresentação da visão global da arquitetura de hardware modular desenvolvida (Secção 3.2) para um melhor entendimento da sua constituição e interligação entre os módulos. Por fim, são apresentados três módulos constituintes/desenvolvidos: (a) mPP - módulo principal de processamento (Secção 3.3); (b) mSE - módulo de expansão de sinais de elétricos (Secção 3.4); (c) mSV - módulo de expansão de sinais de vibração (Secção 3.5). Na apresentação dos módulos é explícita a sua arquitetura, a sua aplicação em campo e os conceitos a ter em conta para o seu desenvolvimento.

3.1 Análise de Requisitos

De encontro ao objetivo principal deste projeto, os seguintes requisitos funcionais são definidos para a arquitetura de hardware modular:

- Desenvolver um sistema modular industrial que seja constituído por um módulo principal de processamento (mPP) local para processamento de inteligência computacional, capaz de comunicar com o meio externo e com os módulos de expansão.
- Desenvolver um módulo de expansão com capacidade de adquirir sinais para a monitorização da tensão e corrente de instalações industriais trifásicas (mSE) e transmiti-los para o mPP.
- Desenvolver um módulo de expansão com capacidade de adquirir sinais para a monitorização da vibração de um moinho de bolas ou cimento (mSV) e transmiti-los para o mPP.

Após o estudo desenvolvido no Capítulo 2 e com os objetivos estruturados, foram definidos os seguintes requisitos não funcionais para a arquitetura de hardware modular:

- Características do mPP:
 - Processador RISC ARM, Disco SSD, HDMI, *Fieldbus*, USB, Linux, Cartão de memória, Memória RAM e Memória EEPROM & Flash;

- Comunicação externa:
 - Ethernet;
- Comunicação interna:
 - SPI;
- Características dos mEX:
 - Sensores (mSE - sensor tensão e corrente; mSV - sensor vibração), conversores isoladores DC/DC (24 VDC para $\pm X$ VDC e 0 V), ADC, comunicação SPI e circuitos de condicionamento dos sinais de campo;
- Componentes de proteção:
 - Isolamento galvânico, filtros EMC (*Electromagnetic Compatibility*), EMI (*Electromagnetic Interference*), RFI (*Radio Frequency Interference*), circuitos de sobretensão e *casing* para a aplicação em ambiente industrial;
- Capacidade de funcionamento para altas frequências na aquisição e transmissão de dados (ordem kHz).

3.2 Visão global do sistema de hardware modular

A visão global do sistema de hardware modular desenvolvida é apresentada na Figura 3.1, na qual consta a sua arquitetura com o módulo principal de processamento (mPP) e módulos de expansão (mEX). Na Figura 3.1 consta o módulo de expansão de sinais elétricos (mSE) e o módulo de expansão de sinais de vibração (mSV), como módulos de expansão desenvolvidos neste projeto. Adicionalmente também consta a possibilidade de adicionar outros mEX.

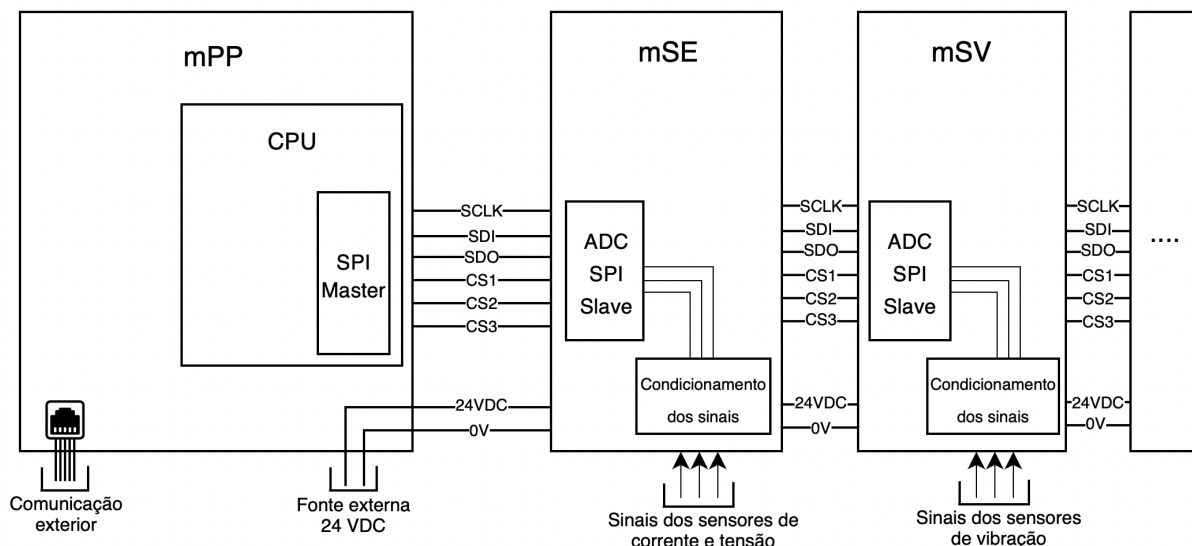


Figura 3.1: Arquitetura geral do hardware modular para ambientes industriais.

O mPP é responsável pela gestão da rede de comunicação interna da arquitetura modular e pelo processamento dos dados proveniente dos mEX. De modo a permitir este

processamento através de métodos de inteligência computacional, o mPP possui um microprocessador (CPU) com grandes capacidades de processamento. Este microprocessador permite: execução de um sistema operativo (por exemplo, Linux); controlo remoto da arquitetura de hardware modular; comunicação com o exterior; outras características mencionadas na Secção 3.3. O controlo remoto externo da arquitetura e a transmissão de dados para o exterior será executada através do protocolo de comunicação Ethernet TCP/IP.

Neste projeto são desenvolvidos dois mEX: mSE e mSV. O mSE é responsável pela recolha de sinais elétricos de tensão e corrente, de forma simultânea, de uma alimentação trifásica na indústria. Ou seja, a recolha no mesmo instante de tempo da tensão e de corrente em cada fase da alimentação. O mSV é responsável por recolher os sinais de vibração proveniente de um moinho de cimento. Ambos os módulos fazem uso de ADC com comunicação por SPI de forma a converter o sinal analógico para digital e transmiti-los para o mPP. O mPP, conforme referido anteriormente, como gestor da rede, recolhe os dados provenientes do mSE e mSV e executa inteligência computacional pré-definida. O mSE irá recolher informações que permitem monitorização da energia utilizada pelos equipamentos (exemplo motores) em sistemas trifásicos (ver Capítulo 4 Secção 4.1), enquanto que o mSV irá permitir a previsão do enchimento do moinho, otimizando o controlo do mesmo e a poupança de energia nos processos de moagem (ver Capítulo 4 Secção 4.2). A arquitetura modular permite também a adição de outros mEX, possibilitando uma melhor adaptação da arquitetura modular a novos problemas ou necessidades requeridas na otimização dos processos industriais.

A comunicação dos módulos de expansão com o módulo principal de processamento é feita através do protocolo de comunicação SPI, com os sinais digitais SDI (*Serial Data Input*), SDO (*Serial Data Output*), CS (*Chip Select*) e SCLK (*Serial Clock*) (descrição mais detalhada na Secção A.2 do Apêndice A). O mPP é o mestre (*master*) na comunicação visto ser o gestor da rede de comunicação. É responsável pela aquisição dos dados provenientes dos mEX, sendo estes os escravos (*slaves*). Optou-se pelo protocolo de comunicação SPI por este ser um protocolo simples, de fácil aplicação, e mais rápido comparado com o protocolo I2C, conforme mostrado no estudo na Secção A.2 do Apêndice A. A comunicação SPI tem uma desvantagem evidente, pois exige um sinal digital (CS) por módulo de expansão que leva a uma limitação no número de módulos utilizados na arquitetura de hardware modular. O número de módulos pode ser expansível através do uso de um *multiplexer*/multiplicador nos mEX, isto é, se no barramento tivermos 3 sinais digitais CS conseguimos ter na nossa arquitetura $2^3 = 8$ mEX. Pensou-se também que uma boa solução para a comunicação entre módulo seria o protocolo EtherCAT. Apesar de bastante mais complexo, este tem grandes vantagens, nomeadamente a velocidade, restrições em tempo real e o número elevado de módulos que poderiam ser adicionados ao barramento de comunicação. Contudo, devido à impossibilidade do seu desenvolvimento a tempo útil deste projeto, optou-se por utilizar a comunicação SPI. Esta comunicação satisfaz as necessidades e permite testar a integridade do nosso sistema, sendo o desenvolvimento mais simples.

O barramento apresentado, e desenvolvido nesta arquitetura, é constituído por 8 sinais paralelos. Os primeiros 6 sinais são sinais digitais constituintes do protocolo comunicação SPI: SDI, SDO, SCLK, CS1, CS2, CS3. Os últimos 2 sinais são canais de alimentação (24 VDC e O VDC) dos módulos de expansão. A alimentação 24 VDC é proveniente de uma fonte externa e alimenta o módulo principal de processamento, que por sua vez alimenta os módulos de expansão através do barramento.

3.3 Módulo principal de processamento (mPP)

De modo a que este módulo tenha capacidade de cumprir os requisitos anteriormente mencionados, este necessita de um microprocessador (CPU) com boa capacidade de processamento. Para facilitar o desenvolvimento o processador terá de dar suporte a um sistema operativo. Estas características vão de encontro aos microcontroladores existentes, como “Raspberry Pi” e outros apresentados na Subsecção 2.3.1. Estes microcontroladores possuem uma grande versatilidade de aplicações, mas não são indicados para aplicações industriais devido à falta de proteção de ruídos exteriores, picos de tensão e más ligações do utilizador presentes na indústria. A falta de meios de proteção para ambientes industriais, neste módulo, pode ser prejudicial no desempenho devido à sua alta componente digital. Assim, é desenvolvido um módulo otimizado com os requisitos e meios de proteção de perturbações exteriores ao módulo, tais como filtros EMC, EMI, RFI, circuitos de sobretensão, isoladores digitais e outros meios de proteção no desenvolvimento do módulo. Para além disso, não é providenciada documentação suficiente que permita o desenvolvimento dos módulos de expansão necessários a estas aplicações específicas e como seria possível integrar os mesmos com estas unidades de processamento. Tendo em conta estes factos, e como anteriormente referido, optou-se por desenvolver um módulo de processamento de raiz. O desenvolvimento do mPP tem por base a informação disponibilizada em algumas soluções *Open Source* (ver Subsecção 2.3.1).

De seguida, é apresentada a arquitetura geral do mPP e, por fim, são apresentados os meios de proteção implementados neste módulo para a aplicação em ambiente industrial.

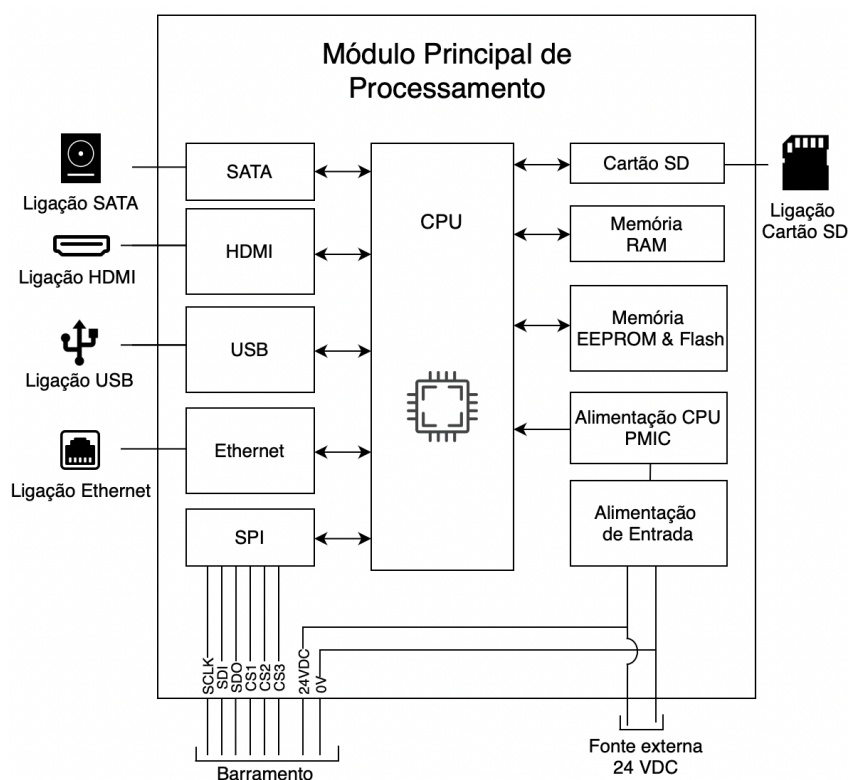


Figura 3.2: Arquitetura do módulo principal de processamento.

Na Figura 3.2 é apresentada a arquitetura geral do mPP que vai de encontro à arquitetura estudada na Subsecção A.1 no Apêndice A. Assim, o módulo é composto por

um CPU ou microprocessador que suporta os seguintes periféricos: ligação SATA, Cartão SD, HDMI, USB, comunicação Ethernet, comunicação SPI e memória RAM.

A ligação SATA permite a ligação de um disco SATA SSD ao módulo, permitindo guardar dados recolhidos e servindo de *backup* para o sistema modular. O cartão SD permite incorporar o sistema operativo e inicializá-lo. A ligação HDMI é primordialmente necessária para que a configuração do microprocessador e respetivo sistema operativo (Linux) seja facilitada permitindo visualizações gráficas. A ligação USB facilita ligações a computadores para configurações do sistema operativo, bem como a troca de informação com discos externos. A porta USB é uma porta comum nos atuais sistemas embebidos. A ligação Ethernet também permite a configuração do sistema, assim como a ligação do módulo para controlo remoto e a transmissão dos dados para a nuvem. A comunicação SPI é ligada ao barramento do sistema modular, o que permite gerir a recolha de informações dos mEX. Na memória RAM foi estipulado o uso de um 1 GB de RAM, em que são usadas 4 memórias de 2 Gbits (128Mbits x 16) dando um total de 8 Gbits, o que corresponde a 1 GB. O uso de 1 GB de RAM foi dimensionado como suficiente tendo em conta os processamentos utilizados, o sistema operativo Linux e as aplicações usadas. A memória ROM de 2 kbits e a memória Flash 32 Mbits, são ambas memórias não voláteis, sendo que na memória ROM a informação contida não pode ser atualizada, enquanto na memória Flash existe essa possibilidade. As memórias ROM e Flash são usadas para o armazenamento da BIOS (*Basic Input/Output System*) ou *firmware*. Este módulo tem o uso de *timers* internos e osciladores aconselhados na ficha técnica do microprocessador em uso.

Tendo em conta estes requisitos de periféricos, considerando a necessidade de uma boa capacidade de processamento e tendo em conta as análises feitas na Subsecção 2.3.1 foi escolhido o microprocessador. Optou-se pelo microprocessador MCIMX6D5EYM10AE da série i.MX6 da NXP. A NXP apresenta uma grande variedade de microprocessadores permitindo uma fácil evolução deste módulo para um microprocessador com diferente capacidade, se no futuro for necessário. O microprocessador MCIMX6D5EYM10AE possui dois núcleos, um ARM Cortex A9, um bus de dados de 32 bits e uma frequência máxima de 1 GHz.

A alimentação do módulo é feita através de 24 VDC, sendo esta uma tensão proveniente de uma fonte externa presente no quadro elétrico. Como tal, requer a proteção contra sobretensões e a conversão do sinal para uma tensão admissível pelo PMIC - regulador de tensão responsável pelo estabelecimento das tensões para todos os componentes presentes no mPP. Utilizou-se o PMIC MPF01000 aconselhado na ficha técnica do microprocessador em uso.

Foi desenvolvido o esquemático completo do mPP (Apêndice C), com base no uso das fichas técnicas do microprocessador (guias de projeto, manuais de referência, entre outros). Também se procedeu à consulta dos módulos de *open source hardware* (Subsecção 2.3.1) e respetivas fichas técnicas dos componentes utilizados.

3.3.1 Meios de proteção

A indústria tem presente vários ruídos de campo e perturbações exteriores. Como tal, é importante a proteção e isolamento do módulo de possíveis perturbações vindas de campo. Assim, foram adicionados os seguintes circuitos de proteção de entrada: proteção e filtragem de alimentação externa, proteção de entrada para sobretensões, isolamento galvânico e outros meios de proteção. Estes são sobretudo constituídos por

filtros EMC/EMI, RFI e sistemas de isolamento galvânico.

Proteção e filtragem de alimentação externa

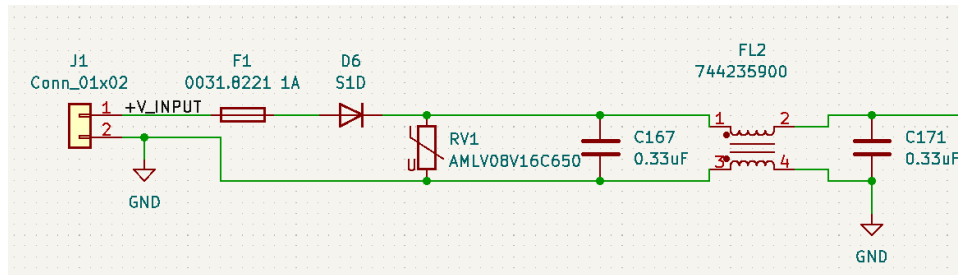


Figura 3.3: Proteção de entrada da alimentação externa de 24 VDC

Na Figura 3.3 é apresentado o circuito de entrada dos 24 VDC proveniente de uma fonte de alimentação externa, para o regulador de tensão de entrada para 5 VDC. A figura foi retirada do esquemático do Apêndice C. O circuito consiste em diferentes meios de proteção: inicialmente possui um fusível (F1) para a proteção da alimentação para correntes elevadas, sendo dimensionado o fusível para que suporte uma corrente tendo em conta o estudo da potencia máxima consumida pelos componentes constituintes do mPP; um diodo (D6) para manter a polaridade de entrada; um varistor (RV1), que é uma resistência variável com a tensão, permitindo a proteção para picos de tensão; e a aplicação de um filtro *choke* de modo comum [61, 62] (FL2), sendo um filtro EMI e RFI. O filtro *choke* consiste em duas bobinas enroladas, com o mesmo número de espiras em torno de um núcleo magnético, que aumenta a impedância de entrada no circuito para altas frequências em modo comum, ou seja, oferece resistência à passagem de ruído em modo comum. A impedância aumenta no modo comum através dos campos magnéticos que fluem na mesma direção no núcleo magnético o que aumenta a indutância. Este, para sinais no modo de corrente diferencial, vai ter campos magnéticos opostos tendo assim uma atenuação menor. Este tipo de filtro também é utilizado na ligação USB proveniente do exterior, nos sinais diferenciais. Os condensadores apresentados são usados para a supressão de ruído de corrente no modo diferencial, oferecendo uma grande impedância á componente DC e uma impedância menor à componente AC (ruído).

Proteção de entrada para sobretensões

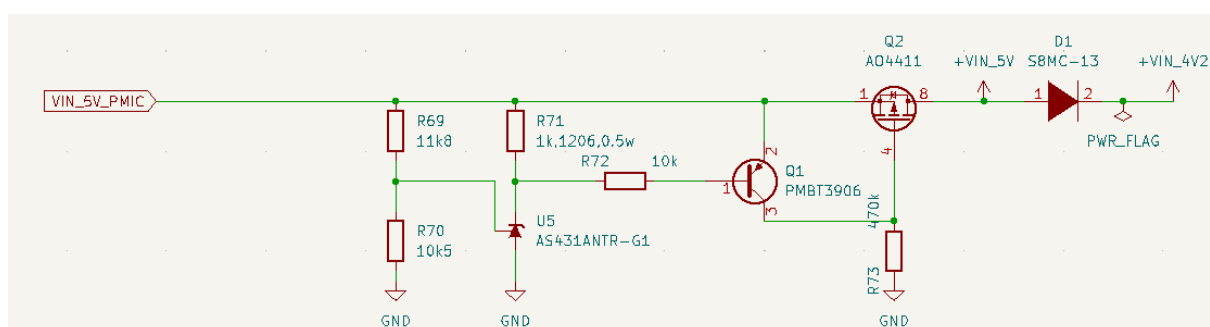


Figura 3.4: Proteção de entrada para sobretensões.

Na Figura 3.4, pode-se observar o circuito de proteção para sobretensões provenientes do regulador de tensão de 5 VDC, que servirá de entrada para o PMIC. O PMIC regula as tensões utilizadas nos componentes e no microprocessador presentes no mPP. O componente U5 consiste num diodo de referência, ou seja, é ativo através de uma tensão de entrada na *Gate*. Neste caso o diodo é ativo quando temos uma tensão de referência entre R69 e R70 superior a 2,495 V, que corresponde a uma tensão de entrada superior a 5,3 V, $V_{in} = (1 + R69/R70)V_{ref} = 5,299V$. Em que Q1, o transistor BJT PNP, irá transmitir quando ocorre uma queda do emissor para a base do transistor superior a 0,7 V, o que acontece quando o diodo Zener é ativo. A corrente flui através de R71 e há uma queda de tensão aos terminais de R71 idêntica à tensão de entrada proveniente do regulador de tensão (superior a 5,3 VDC) menos a tensão do diodo Zener (2,495 VDC). Ao fluir corrente através do transistor BJT PNP Q1, irá fluir corrente através de R73, que por conseguinte irá aplicar uma tensão na base do transistor FET Q2 de canal P e este deixará de conduzir. Assim, a placa irá proteger a alimentação do PMIC e os restantes componentes para tensões superiores a 5,3 V. No modo de funcionamento normal, isto é, para uma tensão inferior a 5,3 V, o transistor Q1 não irá conduzir porque o diodo Zener não é ativo. Logo, não conduz e a queda de tensão aos terminais de R71 é aproximadamente 0 V, o que não supera a tensão limiar de 0,7 V típica entre o emissor e a base do transistor Q1. Desta forma, o transistor Q1 ao não conduzir, irá ser aplicada uma tensão de 0 V na porta do transistor FET Q2, o que irá superar a tensão da fonte de cerca de 5 V em V_{Th} (*voltage threshold*). Assim, o transistor FET Q2 irá conduzir quando Q1 estiver ao corte e não conduzirá quando transistor Q1 estiver ativo. No primeiro transistor é utilizado um transistor BJT, uma vez que este vai ser ativado pelo meio de passagem de corrente, enquanto no segundo caso de transistor FET, este será através da aplicação de uma tensão. O transistor FET tem melhores características em relação ao transistor BJT [62], por ter uma maior impedância de entrada e ter um ganho menor na passagem de correntes. O transistor FET também é mais estável com a temperatura, gerando menos ruído de entrada na alimentação do PMIC do microprocessador (CPU). Devido às razões apresentadas, o transistor FET foi escolhido como o transistor para a passagem ou corte da alimentação do módulo principal, sendo também o mais utilizado no mercado, substituindo o transistor BJT.

Isolamento galvânico

Na Figura 3.5 é implementado um isolamento galvânico para permitir o isolamento dos sinais digitais internos e externos provenientes da comunicação SPI. Foram utilizados circuitos integrados existentes (ADUM4153BRIZ e ADUM1300BRWZ) para o isolamento dos sinais digitais SPI e um DC/DC isolador para a separação da alimentação no lado interno e externo.

Outros meios de proteção

Outros meios de proteção são utilizados ao longo do desenvolvimento, aconselhados pelas fichas técnicas dos componentes, como condensadores de desacoplamentos e ferrites nas alimentações. Estas proteções são utilizadas, como por exemplo, na alimentação do chip Ethernet e USB, onde são utilizados para a supressão de ruído eletrónico em altas frequências. No HDMI é utilizado também um chip integrado (TPD12S521DBTRG4) com circuitos de proteção ESD (*Eletro static discharge*) para a transmissão dos sinais.

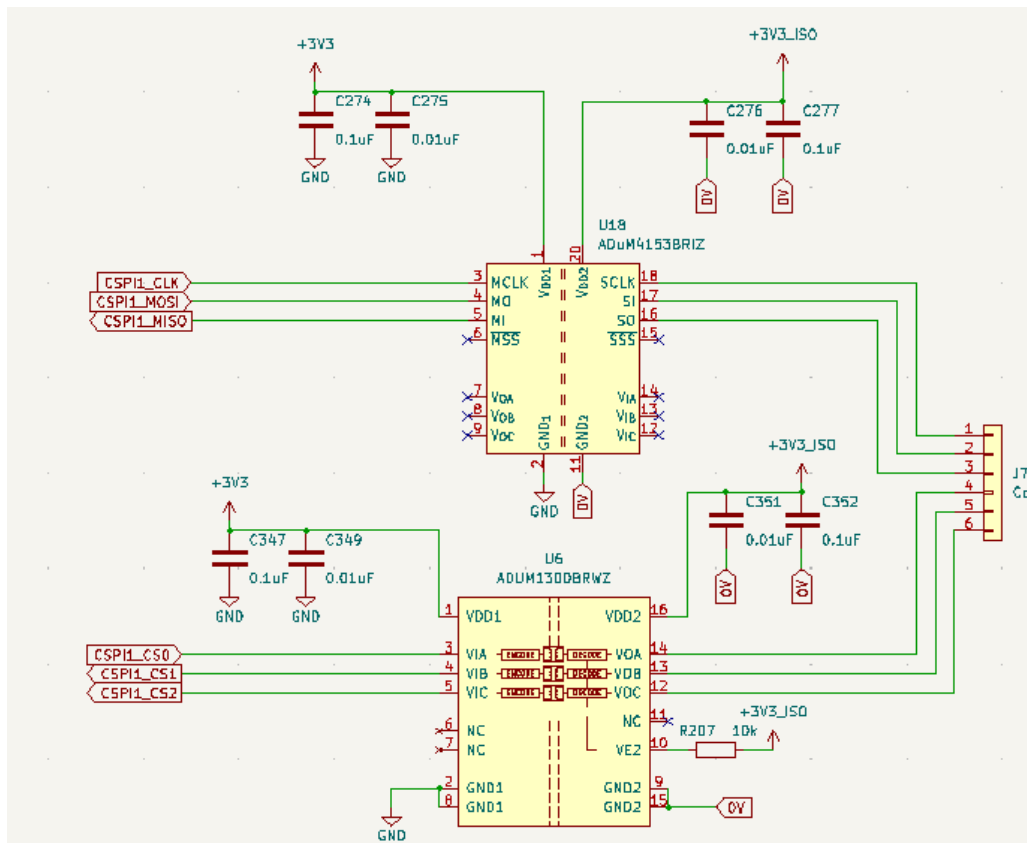


Figura 3.5: Isolamento galvânico dos sinais digitais SPI.

3.4 Módulo de expansão de sinais elétricos (mSE)

O mSE tem como objetivo a recolha de sinais elétricos (tensão e corrente) provenientes de um sistema de alimentação trifásico.

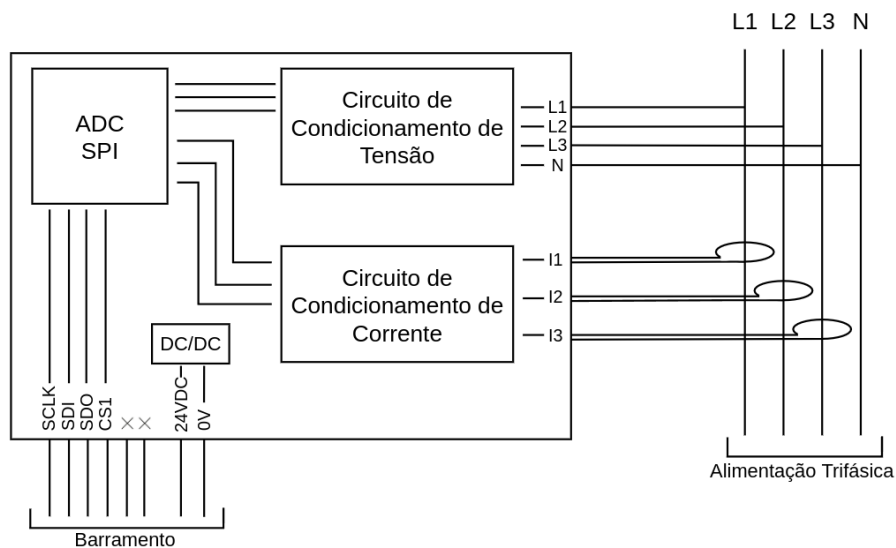


Figura 3.6: Arquitetura do módulo de expansão de sinais elétricos.

Na Figura 3.6 é apresentada a arquitetura de hardware do mSE. A leitura de tensão é feita diretamente através da leitura de cada fase em paralelo em relação ao neutro. A

leitura de corrente é feita através do sensor de Rogowski, explícito na Subsecção 2.3.2. Os sinais das leituras de campo referidos anteriormente, necessitam de um circuito de condicionamento integrado no módulo, de modo a obter o sinal de elétrico compatível com o ADC. O conversor analógico digital (ADC) irá executar a recolha simultânea dos sinais de tensão e corrente e permitir a comunicação SPI com o módulo principal de processamento. O mPP será responsável pela análise dos sinais provenientes deste mSE, através de inteligência computacional (desagregação de cargas - Secção 4.1) para a obtenção do consumo energético individual por identificação dos equipamentos em funcionamento.

Os resultados e a construção desta placa podem ser observados no Capítulo 5 na Subsecção 5.1.2. De seguida, são apresentados os circuitos de condicionamento para a obtenção dos sinais de entrada do ADC de 0 a 5 V, assim como as características relevantes na escolha do ADC e alimentação da placa.

Circuito de condicionamento de tensão

Os sinais de tensão provenientes de campo de cada uma das fases em relação ao neutro, terão uma tensão a rondar os 230 V RMS (valor eficaz - 325 V). Tendo em conta este valor eficaz, optou-se por dimensionar o módulo para uma tensão de entrada de 350 V de forma a obter o sinal proveniente de campo que poderá incluir algum ruído da rede, como picos de tensão, evitando saturações no condicionamento do sinal. Assim, foi desenhado um circuito de condicionamento do sinal com a entrada de 350 V para obter uma saída de 0 a 5 V. É importante obter o sinal mais natural possível proveniente da rede de alimentação, para uma melhor análise na obtenção de características pela inteligência computacional. O circuito de condicionamento de sinal de tensão é apresentado na Figura 3.7.

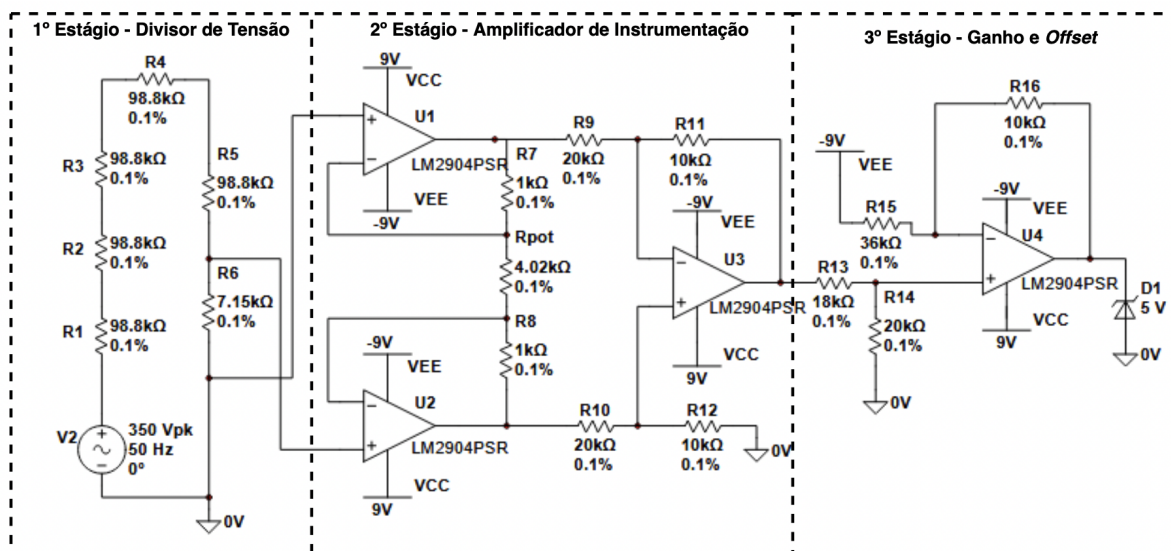


Figura 3.7: Circuito de condicionamento do sinal de tensão.

O circuito de condicionamento do sinal de tensão apresentado é composto por 3 estágios. O primeiro estágio é composto por um divisor de tensão de forma a reduzi-la, para que esta seja admissível pelas entradas dos amplificadores sem existir saturação. Nesta implementação optou-se pelo uso dos amplificadores do circuito integrado LM2904PSR, alimentados com +9 V e -9 V sendo a tensão de saturação cerca de 7,5 V e -7,5 V.

$$\frac{R6}{R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6} \cdot 350 = 4,994VAC \quad (3.1)$$

O divisor de tensão apresentado tem uma redução para 5 VAC, em que os cálculos são apresentados na Equação (3.1). Na implementação do divisor de tensão são usadas várias resistências em série para garantir uma queda de tensão entre cada resistência mais baixa. O uso de valores elevados nas resistências, na ordem dos 100 kΩ, condiciona a passagem de corrente e conseqüentemente a potência dissipada por cada resistência é menor. Os cálculos relativos à potência dissipada por cada resistência são apresentados nas Equações (3.2).

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{69,001^2}{98,8K} = 48,190mW \quad P = \frac{4,994^2}{7,15K} = 3,488mW \quad (3.2)$$

V é a queda de potencial aos terminais da resistência. A Equação (3.2) apresenta a potencia dissipada por cada resistência de 98,8 KΩ (R1, R2, R3, R4, R5) e para a resistência R6 de 7,15 KΩ. Na escolha de resistências existentes no mercado é necessário ter em conta os parâmetros anteriormente indicados e a respetiva queda de potencial nos seus terminais.

O segundo estágio apresentado (Figura 3.7), é constituído por um amplificador de instrumentação que tem como principal objetivo estabelecer uma alta impedância de entrada no circuito. Este estágio tem um dado ganho G aproximadamente igual a 1 que não é relevante no circuito de condicionamento, o G é apresentado na Equação (3.3). Para este ganho as restrições $R7 = R8$, $R9 = R10$ e $R11 = R12$, têm de ser respeitadas.

$$G = \frac{R11}{R9} \left(1 + \frac{2R7}{Rpot}\right) = 0,749 \quad V_{out} = 4,994G = 3,741VAC \quad (3.3)$$

O ganho deste estágio é facilmente parametrizado através da substituição das resistências R9 e R10 ou R11 e R12, mantendo as condições de igualdade referidas, ou através de Rpot. A saída de tensão do estágio de instrumentação, tendo em conta o sinal de entrada do divisor de tensão, é 3,741 VAC, conforme indicado na Equação (3.3).

No último e terceiro estágio, temos o ajuste para os 2,5 VAC e o *offset*/deslocamento DC de +2,5 V para obter a saída do sinal de 0 a 5 V. Dimensionou-se o *offset* (Equação (3.4)) e o ganho para 2,5 VAC (Equação (3.5)), com resistências existentes no mercado.

$$offset = -\frac{R16}{R15}(-9) = 2,5VDC \quad (3.4)$$

$$G = \frac{R16 + R15}{R15} \frac{R14}{R14 + R13} = 0,673 \quad V = 3,741G = 2,518VAC \quad (3.5)$$

Somando o respetivo valor DC de *offset* (2,5 V) com o valor AC (2,518 V), obtém-se uma saída mínima de -0,018 V e máxima de 5,018 V, indo ao encontro do pretendido para uma saída de 0 a 5 V. O ganho pode ser ajustável através de R13 e o *offset* DC através de R15. É aconselhado primeiro o ajuste do *offset* necessário através de R15 e depois o ajuste do ganho AC através de R13, pois o ganho desta tipologia depende de R15 mas o *offset* DC é independente de R13. Neste estágio, utilizando um amplificador com entrada inversora ter-se-ia uma aplicação facilitada, isto é, com uma parametrização do ganho mais simples. No entanto, de forma a não existir um desfasamento de 180 graus do sinal, foi implementado um amplificador com a entrada não inversora. De igual forma, o amplificador de instrumentação também não induz nenhum desfasamento do sinal.

Por fim, no circuito encontra-se na saída um diodo de Zener de 5 V que irá conduzir tensões superiores a 5 V, evitando sobretensões superiores a 5 V e sendo um meio de proteção de entrada para o ADC.

Circuito de condicionamento de corrente

No circuito de condicionamento de corrente, é necessário a medição da corrente em cada fase da alimentação trifásica. Como tal, é necessária a escolha de um sensor de corrente e um circuito que condicione o sinal obtido do sensor para uma tensão de entrada no ADC de 0 a 5 V. A aplicação industrial requer um sensor de corrente que permita medir elevadas correntes sem saturações, uma gama alargada de frequências de leitura, boa linearidade, que não perturbe o processo industrial ao fazer medições (isolado), fácil aplicação e com uma boa capacidade de resposta. Na Subsecção 2.3.2 pode-se observar o estudo sobre os sensores de corrente existentes, sendo que neste projeto se optou pela escolha do sensor de Rogowski, indo ao encontro das características anteriormente mencionadas. Este sensor possui uma resposta de alta frequência, conseguindo detetar mudanças nas cargas elétricas em frações de segundo, tendo um desempenho superior aos restantes com correntes altas e com componentes de alta frequência. Na Subsecção 2.3.2 é descrito o princípio de funcionamento deste sensor. A saída do sensor de Rogowski [63], V_{Rog} , é dada pela Equação (3.6), em que este deriva o sinal de corrente dado por $I = I_P \sin(\omega t)$. Em que I_P é a corrente primária presente na alimentação trifásica, f a frequência da alimentação trifásica e M é a indutância do sensor.

$$V_{Rog} = M \frac{dI}{dT} = MI_P 2\pi f \cos(\omega t) \quad (3.6)$$

O sensor ARTB22-D75, da LEM, foi o sensor escolhido no mercado para este projeto. Utilizando a Equação (3.6), a tensão de saída do Sensor de Rogowski, para a medição máxima de corrente primária de 1 kA (I_P), frequência da rede trifásica 50 Hz (f) e a indutância do sensor de 71,98 nH (M) (retirado da Datasheet ARTB22-D75 [64]), é de 22,613 mVAC.

Após o recebimento do sinal proveniente do sensor de Rogowski, é feito o condicionamento do sinal através de 4 estágios que estão explícitos na Figura 3.8. O primeiro estágio, consiste num amplificador de instrumentação que tem como objetivo estabelecer uma impedância alta de entrada e amplificar o sinal de forma a este entrar na ordem de grandeza do sinal de entrada do ADC. Assim, foi dimensionado o amplificador de instrumentação para um ganho próximo de 100. O cálculo do ganho G é apresentado em (3.7), em que o amplificador de instrumentação respeita as seguintes restrições $R1 = R2$, $R3 = R4$ e $R5 = R6$.

$$G = \frac{R5}{R3} \left(1 + \frac{2R1}{R_{pot}}\right) = 104,442 \quad V_{out} = 22,613G \text{ mV} = 2,362\text{VAC} \quad (3.7)$$

Consequentemente, a saída do amplificador de instrumentação será 2,362 VAC, tendo em conta o sinal de entrada de 22,613 mV, proveniente do sensor de Rogowski. O ganho deste estágio é facilmente parametrizado através da substituição das resistências R3 e R4 ou R5 e R6, mantendo as condições de igualdade referidas, ou através de Rpot.

No estágio seguinte, para obter o sinal original de corrente, é feita a integração do sinal de tensão proveniente do sensor de Rogowski e amplificado pelo amplificador de instrumentação. A integração é feita através da tipologia de amplificador integrador com ganho estático. Para garantir que este estágio funciona como integrador para a

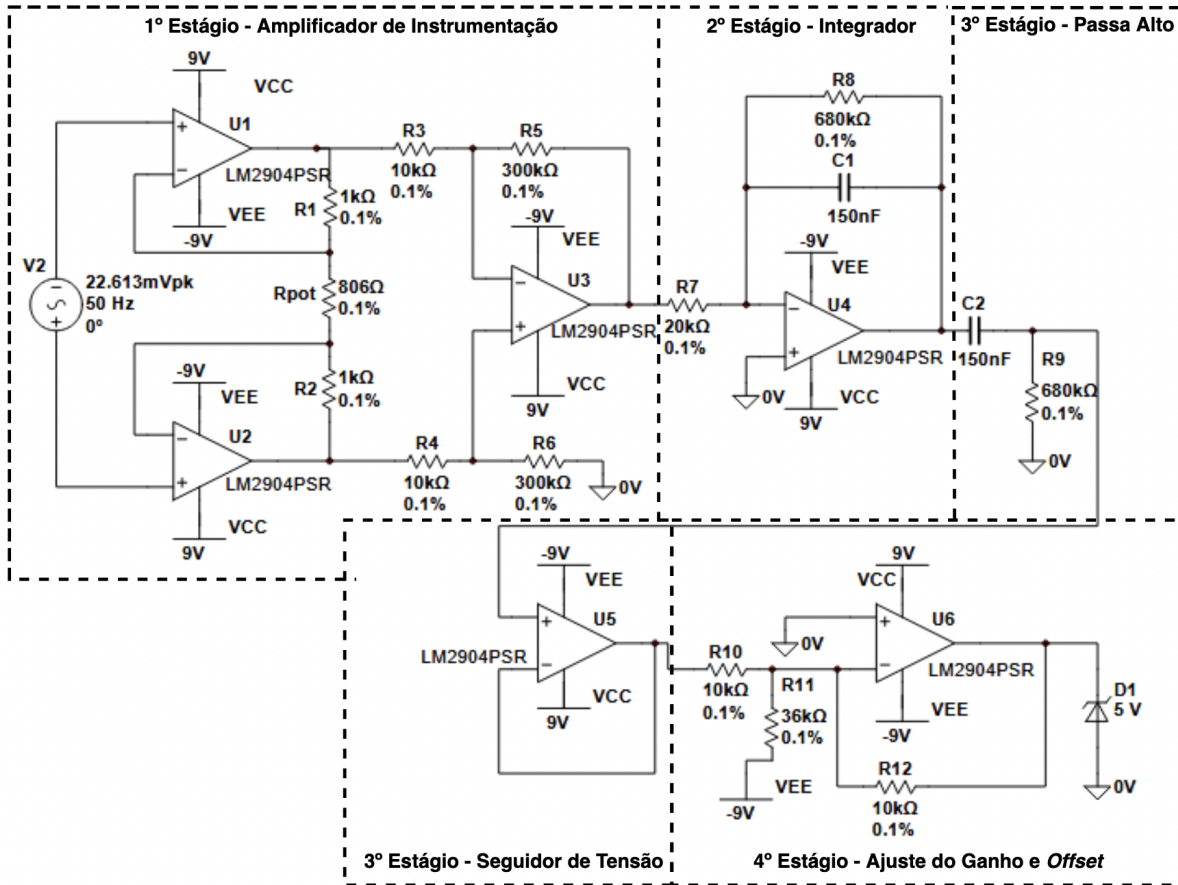


Figura 3.8: Circuito de condicionamento do sinal de corrente.

nossa frequência de 50 Hz da rede elétrica, é estipulada uma frequência de corte f_c suficientemente baixa, próxima dos 1 Hz. A frequência de corte é definida na Equação (3.8).

$$f_c = \frac{1}{2\pi R8C1} = 1,560Hz \tag{3.8}$$

$$G = \frac{-R8/R7}{1 + (2\pi f R8C1)} = -1,029 \quad V_{out} = 2,362G = 2,430VAC \tag{3.9}$$

O ganho no funcionamento como integrador, G (Equação (3.9)) foi projetado para ser aproximadamente igual a 1, visto que não se trata de um estágio de amplificação. A saída do integrador será de 2,430 VAC, tendo em conta a entrada do sinal do estágio anterior de 2,362 VAC.

No ganho estático do integrador, isto é, para sinais com frequência igual a zero (sinais DC), o ganho é definido como um amplificador inversor dado por $-\frac{R8}{R7}$. O ganho estático é elevado, o que leva a uma grande amplificação de sinais DC, como tensões e correntes de offset provenientes dos amplificadores. De modo a eliminar esta componente DC, foi adicionado um estágio de passa alto e um seguidor de tensão para o isolamento deste sinal, para o último estágio. O estágio de passa alto tem a mesma frequência de corte que o estágio integrador definido em (3.8) ($R9 = R8$ e $C2 = C1$). A saída deste estágio mantém a saída do estágio integrador, eliminando apenas a componente DC (0 Hz) do sinal e passando a componente AC (2,430 VAC).

Por fim, o ultimo estágio é um estágio de offset através do uso de um amplificador inversor. Contrariamente ao circuito de condicionamento de sinal de tensão, este é feito com o uso de um amplificador inversor, dado que foi projetada uma inversão do sinal ou um desfasamento de 180 graus no estágio integrador. O estágio integrador também induz um desfasamento de 90 graus, mas este não é devido à inversão do sinal, mas sim devido à integração do sinal. Assim, obtemos um desfasamento total no sinal ao longo do circuito de condicionamento de 90 graus, correspondendo a duas inversões do sinal (360/0 graus) e à integração do sinal (90 graus), ou seja, possuímos o sinal original apenas com um desfasamento de 90 graus devido à integração como esperado. A amplificação do sinal proveniente do seguidor de tensão é igual a 1, não sofrendo qualquer amplificação, apenas uma inversão do sinal conforme mencionado anteriormente. Este ganho é dado pela Equação (3.10). Como objetivo final deste estágio é feito o offset (Equação (3.10)) DC do sinal em 2,5 V ao sinal AC.

$$G = -\frac{R_{12}}{R_{10}} = -1 \quad offset = -\frac{R_{12}}{R_{11}}(-9) = 2,500VAC \quad (3.10)$$

O sinal de saída do último estágio é igual à soma da componente AC, proveniente do seguidor de tensão, com o *offset* DC. O valor máximo do nosso sinal será $V_{max_{out}} = 2,443 + 2,5 = 4,943V$ e o valor mínimo $V_{min_{out}} = -2,443 + 2,5 = 0,057V$. O sinal de saída entre 0 a 5 V vai de encontro ao pretendido. De igual forma ao circuito de condicionamento de tensão, este possui um diodo Zener de 5 V para a proteção de sobretensões.

Assim, concluímos os circuitos de condicionamento de corrente e de tensão, onde podemos observar a importância de cada estágio e dos componentes no condicionamento dos sinais, com o objetivo de obter o sinal de saída pretendido. A fácil parametrização das resistências, permite um ajuste facilitado do sinal de saída conforme o ADC em uso para a aplicação requerida.

ADC SPI

Após a parametrização dos sinais de corrente e tensão, é feita a conversão do sinal analógico para digital através do ADC. A escolha de um ADC com comunicação por SPI permite a comunicação com o mPP. Na escolha do ADC para o módulo de sinais elétricos é importante este possuir as seguintes características: uma amostragem simultânea de tensão e corrente e uma amostragem mínima de 10000 amostras por segundo. Esta frequência mínima é necessária porque a análise de assinatura dos motores (objetivo futuro deste projeto) é típica nas frequências 0 a 5 kHz. Segundo o teorema de Nyquist [65], é necessário a amostragem superior a 10 kHz, o dobro do máximo da frequência típica. A recolha simultânea dos sinais de tensão e corrente é importante para obter *features* em cada instante provenientes da leitura dos sinais de tensão e corrente da alimentação trifásica. A recolha dessas *features* é importante para utilização de diversos métodos de inteligência computacional, incluindo os métodos usados neste projeto no Capítulo 4 Secção 4.1.

Alimentação - Conversor DC/DC

A alimentação do módulo é feita através de 24 VDC proveniente do módulo principal de processamento, que é alimentado por uma fonte externa. A alimentação 24 VDC é convertida para as tensões usadas na alimentação dos componentes referidos nas Figuras

3.7 e 3.8, através de um conversor DC/DC isolador com as saídas de +9 V, 0 V e -9 V. O conversor DC/DC isolador permite o isolamento galvânico do módulo, ou seja que esteja isolado da alimentação externa e fornecendo uma segurança acrescida. O conversor permite o isolamento entre o neutro da leitura trifásica e a terra proveniente da alimentação externa (24 VDC e 0 V), evitando a conexão entre ambos, o que faria perder o neutro de entrada para a medição da tensão nas 3 fases e a passagem de corrente no mesmo. O conversor permite também obter alimentações positivas e negativas para a alimentação dos amplificadores em relação aos 0 V de saída do conversor. É importante o funcionamento dos amplificadores com tensões negativas e positivas simétricas, visto que possuímos sinais AC de entrada centrados em 0 V evitando saturações no condicionamento do sinal. Na alimentação de outros componentes presentes no módulo, como reguladores de tensão, é aconselhado o uso destes sinais de alimentação interna (+9 V, 0 V e -9 V) devido ao referido anteriormente. Por fim, para manter o maior isolamento possível entre os sinais analógicos provenientes de campo e os sinais digitais para a comunicação com o módulo principal, são usados no mSE diferentes reguladores de tensão (PMIC) para a alimentação analógica e digital.

3.5 Módulo de expansão de sinais de vibração (mSV)

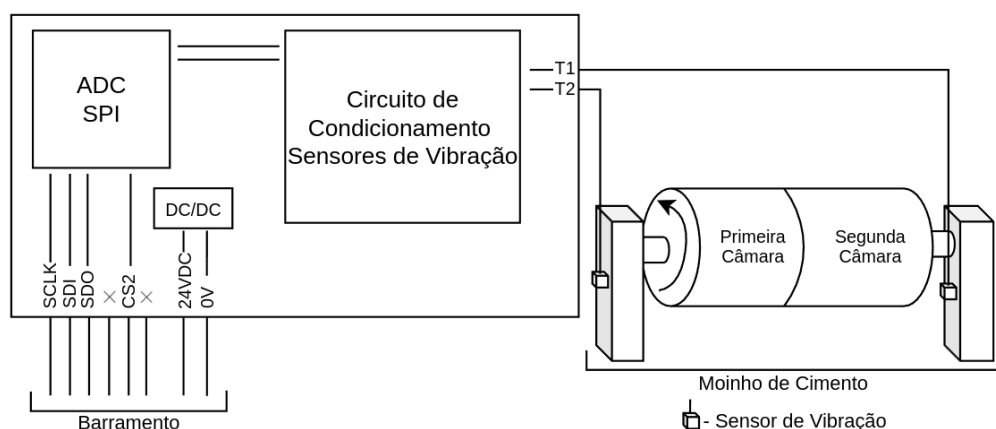


Figura 3.9: Arquitetura do módulo de expansão de sinais de vibração.

Na Figura 3.9 observa-se a arquitetura geral do mSV e a constituição do moinho de cimento de onde provêm, neste projeto, os sinais de vibração. O moinho de cimento ou moinho de bolas é composto por duas câmaras: (a) a primeira câmara, composta por bolas de metal de maior dimensão, corresponde à câmara de entrada da matéria-prima para a uma moagem grossa do material; e (b) a segunda câmara, com bolas de menor dimensão, corresponde à câmara de saída onde é feito o processo de moagem fina. O moinho de cimento de duas câmaras é o mais comum na indústria. Como tal, são usados dois sensores de vibração, um na entrada e outro na saída do moinho, para a estimação do enchimento da primeira e segunda câmara, respetivamente.

Os sinais provenientes dos sensores de vibração são dados em tensão. Após a recolha destes sinais, o mSV condiciona os sinais de tensão provenientes dos sensores de forma a terem um sinal de tensão compatível com a entrada do ADC. Este com a comunicação por SPI permite a comunicação com o mPP e a respetiva transmissão dos sinais para o mesmo. O mPP será responsável pelo processamento destes sinais através da inteligência

computacional, para a estimação do enchimento do moinho. O método analítico encontra-se na Secção 4.2. Na Subsecção 5.1.3 é apresentado o sensor de vibração e o mSV desenvolvidos.

De seguida, é explicado de forma detalhada as características e parâmetros relativos ao módulo de sinais de vibração composto por: sensor de vibração, circuito de condicionamento do sinal, ADC com comunicação SPI e a alimentação deste módulo.

Sensor de vibração

Segundo o estudo na Subsecção 2.3.3, optou-se por um acelerómetro piezoelétrico para a constituição do sensor de vibração desenvolvido. Assim, é apresentado o estudo do sinal de saída deste sensor de vibração, para o posterior condicionamento do sinal, e o *casing* do sensor de vibração para a aplicação industrial.

O sensor de vibração com o acelerómetro piezoelétrico têm as seguintes características principais: gama de medição de vibrações de $-x[g]$ a $+x[g]$, uma sensibilidade dada por x [mV/g] e uma gama de frequências de aquisição. A alimentação do sensor e, conseqüentemente, do acelerómetro é realizada através do módulo de sinais de vibração apenas com uma tensão de alimentação (V_{cc}) e a 0 V (GND), fazendo com que ele tenha uma tensão de polarização de $V_{cc}/2$. O sensor irá ter uma gama de saída em tensão conforme a leitura dos valores de vibração de campo. Devido a questões de confidencialidade não podem ser apresentadas as características necessárias do sensor de vibração para aplicação na indústria do moinho de cimento pelo projeto iProMo, sendo apenas indicado a saída de tensão do sensor: a saída do sensor irá ser entre os 0,5 V e 4,5 V, tendo uma alimentação de 5 V. Posteriormente será feito o condicionamento de sinal para uma tensão admissível pelo ADC (0 a 5 V). Apesar de neste caso a tensão de saída do sensor de vibração ser idêntica à tensão admissível do ADC, optou-se pela construção de um circuito de condicionamento de sinal com um ganho e um *offset*, uma vez que caso alteremos o sensor ou o ADC queremos ter uma forma de adequar as tensões entre ambos. Como exemplo, um sensor com uma gama de vibração de -5g a +5g e sensibilidade de 200 mV/g irá ter uma variação do sinal de -1 V a 1 V adicionado a metade do valor da alimentação (tensão de polarização). Assim, tendo em conta a alimentação de 5 V o sensor irá ter uma saída de +1,5 V (2,5 V-1 V) a +3,5 V (2,5 V + 1 V).

O sensor de vibração requer um *casing* que permita a sua fácil fixação no moinho, caso sejam necessárias calibrações do sensor e a alteração da localização do sensor para um local com amplitudes de vibração diferentes. É também importante um bom isolamento e proteção do acelerómetro do meio externo, visto este estar disposto a altas perturbações e poeiras. Neste caso, foi feita a proteção do acelerómetro através de uma caixa em alumínio com normas de proteção (IP66), fixando-a ao moinho através de um íman com uma força magnética alta. O Sensor de vibração desenvolvido é apresentado na Subsecção 5.1.3.

Circuito de condicionamento do sinal de vibração

Após o recebimento do sinal proveniente do sensor de vibração (+0,5 V a +4,5 V), é efetuado o condicionamento do sinal para uma tensão de 0 a 5 V. Este sinal será convertido pelo ADC e transmitido para o mPP pelo protocolo de comunicação SPI.

Na Figura 3.10 é apresentado o circuito de condicionamento do sinal de vibração com 2 estágios, sendo ilustrado o sinal proveniente do sensor de vibração de 0,5 V a 4,5 V. O primeiro estágio é responsável pela amplificação do sinal de forma a se obter uma tensão

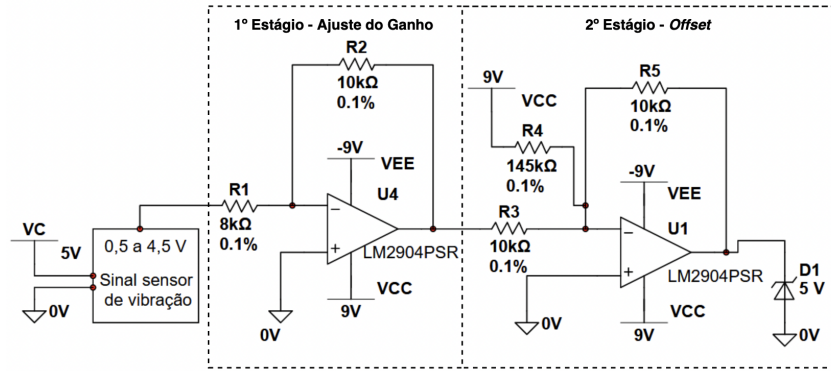


Figura 3.10: Circuito de condicionamento do sinal de vibração.

de pico a pico de 5 V. Assim, este é dimensionado para um ganho G de 1,25, conforme apresentado em (3.11), onde $V_{vib} \in [0, 5; 4, 5]$ é a tensão proveniente do sensor de vibração.

$$G = -\frac{R2}{R1} = -1,25 \quad V_{out} = -\frac{R2}{R1}V_{vib} = -1,25V_{vib} \quad (3.11)$$

A gama de saída do estágio de amplificação (V_{out}) será de -0,625 V a -5,625 V ($V_{out} \in [-0,625; -5,625]$) tendo em conta a gama da tensão de saída do sensor de vibração de +0,5 V a +4,5 V ($V_{vib} \in [0,5; 4,5]$). O ajuste do ganho pode ser feito através do ajuste do valor de R1 ou R2.

Por fim, no segundo estágio, é feito o *offset* DC e a inversão do sinal para uma saída de 0 a 5 V do sinal de tensão. O sinal proveniente do estágio anterior irá ter uma amplificação de -1 ($G = -R5/R3$), visto que $R3 = R5$. A tensão de *offset* DC aplicada é apresentada na Equação (3.12).

$$G = -\frac{R5}{R3} = -1 \quad offset = -\frac{R5}{R4}(+9) = -0,620V_{AC} \quad (3.12)$$

A saída do sinal de tensão do último estágio é dado pela diferença do 0,620 V do *offset* DC com o sinal proveniente do estágio anterior V_{out} invertido (Equação (3.11)), sendo a saída final de 0,005 a 5,005 V. O ajuste do *offset* DC é facilmente parametrizado através do ajuste da resistência R4. Por fim no circuito, é usado um diodo Zener como proteção para sobretensões superiores a 5 V.

Concluimos o dimensionamento do circuito de condicionamento do sinal de vibração, onde observamos a importância de cada estágio e a fácil parametrização do sinal de saída através do ajuste das resistências. Neste caso foram usados dois estágios de amplificador inversor para o sinal proveniente do sensor de vibração. Sofrendo assim, em ambos os estágios duas inversões ou defasamentos de 180 graus, o que irá corresponder ao sinal de entrada sem qualquer defasamento. A tipologia de amplificador inversor é também de aplicação simples, permitindo um ajuste do sinal mais fácil em cada estágio.

ADC SPI

Após o condicionamento do sinal para a tensão admissível pelo ADC, é feita a conversão do sinal analógico para digital. O ADC com comunicação SPI irá permitir a transmissão da informação recolhida por este mSV para o mPP. O ADC com SPI necessita de dois canais para a recolha de informação proveniente do sensor da entrada (relativo à primeira câmara) e do sensor da saída (relativo à segunda câmara) do moinho de cimento. Ao contrário do

ADC do módulo de sinais elétricos, este não necessita de uma recolha simultânea. Este apenas necessita de uma frequência de amostragem que permita a leitura dos sensores de acordo com a frequência de leitura dos mesmos (teorema Nyquist [65]).

Alimentação - Conversor DC/DC

O desenvolvimento da alimentação deste módulo é conseguido de modo idêntico ao módulo de sinais elétricos (Secção 3.4). O mSV é alimentado através do barramento com 24 VDC e é utilizado um conversor DC/DC com isolamento galvânico com as saídas de +9 V, 0 V e -9 V, que irá servir de alimentação para todos os componentes deste módulo. Inclusive a alimentação dos sensores de vibração é feita com uma tensão ajustada por um divisor de tensão. De igual forma, é feito o uso de reguladores de tensão diferentes para a alimentação analógica e digital.

Capítulo 4

Casos de estudo: inteligência computacional aplicada aos módulos de expansão

Utilizando os módulos de expansão apresentados no capítulo anterior: módulo de expansão de sinais elétricos (mSE) na Secção 3.4 e módulo de expansão de sinais de vibração (mSV) na Secção 3.5, foram desenvolvidos dois casos de estudo com recurso a inteligência computacional. O primeiro caso de estudo (Secção 4.1), associado ao mSE, consistiu na desagregação de cargas a partir de sinais trifásicos de corrente e tensão de um conjunto de cargas. O segundo caso de estudo (Secção 4.2), associado ao mSV, consistiu na estimação do enchimento de moinho de bolas a partir de sinais de vibração.

Em cada caso de estudo é apresentado um breve estado da arte sobre o tema, seguido da apresentação das metodologias de inteligência computacional utilizadas para a resolução do problema.

4.1 Módulo de expansão de sinais elétricos: Desagregação de cargas

4.1.1 Estado da arte

A desagregação de cargas (também chamada de monitorização não intrusiva de cargas, MNIC ou NILM em inglês) consiste em identificar os equipamentos em operação de forma não intrusiva a partir dos sinais elétricos obtidos à entrada do sistema [66], tal como sugerido na Figura 4.1. A monitorização não intrusiva necessita apenas da instalação de um único equipamento de monitorização que recolha a informação de vários equipamentos, por exemplo instalado na entrada do quadro elétrico. A monitorização intrusiva requer a instalação de equipamento de monitorização em cada um dos equipamentos que se pretende monitorizar [67].

A desagregação de cargas tem sido um foco de pesquisa que abrange várias áreas de aplicação, tais como ambiente residencial, redes inteligentes e mais recentemente ambientes industriais. A desagregação de cargas começou a ganhar relevância com o trabalho “Nonintrusive appliance load monitoring” por George Hart [68], e desde então com o avanço das tecnologias de hardware e da inteligência computacional têm surgido muitos trabalhos científicos na área de desagregação de cargas com aplicação em residências,

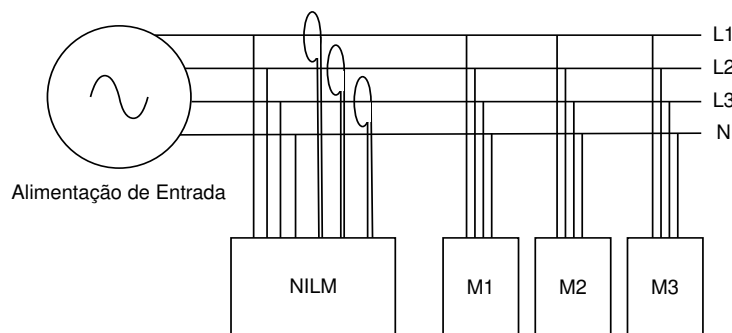


Figura 4.1: Ilustração de um exemplo de desagregação não intrusiva de cargas. M1, M2 e M3 são 3 equipamentos alimentados pela alimentação de entrada.

edifícios de grande dimensão, redes inteligentes e indústria.

Nos últimos anos foram feitos vários estudos sobre as características que podem ser utilizados na concepção de um sistema NILM [69, 70, 71, 72]. Por exemplo, em [73], uma metodologia é proposta para identificar equipamentos em operação a partir da trajetória tensão-corrente, ao longo do tempo. Outro exemplo, é o sistema NILM proposto em [74] que propõe a utilização da assinatura energética transitória e assinaturas de potência em estado estacionário. A energia transitória de ativação para cada carga foi calculada a partir das formas de onda da tensão e corrente medidas na entrada do sistema trifásico.

Por outro lado, em [75], Su utiliza a transformada de Fourier de curto prazo (STFT) (análise espectral dependente do tempo) e a transformada de onda discreta (DWT) para identificar o momento de ativação da carga. Os resultados indicam que a transformação DWT leva a melhores resultados do que a STFT.

Outras características geralmente utilizadas são “múltiplos harmônicos” [76], “harmônicos pares” ou “harmônicos ímpares” da corrente, ou FFT [77] ou “wavelet” [78] da corrente e da tensão. Em particular, diversos autores realçam os “harmônicos ímpares” como uma característica vantajosa na desagregação de cargas [79, 80, 81], em particular os harmônicos ímpares relativos a índices mais baixos. A alteração destes afeta mais uma onda periódica do que a alteração dos harmônicos pares e dos harmônicos de ordens maiores.

Para além dos estudos das características a serem utilizadas, também diversos trabalhos incluem o estudo de modelos classificadores associados a estas características. Estes classificadores têm como objetivo associar um certo equipamento aos seus valores de características. Azaza em [82] mostrou que as características elétricas: forma de onda atual, potência ativa/reactiva e características transitórias levam a resultados da desagregação interessantes quando associados a um classificador específico. Exemplos destes classificadores são árvore de decisão (DT), k -NN (do inglês “K-nearest neighbors”) e máquina de vetores de suporte (SVM). [83] propõe uma metodologia que combina um conjunto de características e um conjunto de modelos classificadores. Os classificadores utilizados incluem redes neurais, algoritmos genéticos e otimização por *least residue* (LS).

Em [84], foi realizado um estudo onde se compara o desempenho da desagregação de cargas utilizando três diferentes espaços de características e três diferentes modelos de classificação de cargas (desagregadores). As características avaliadas foram a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a Transformada Wavelet Discreta (DWT) e o algoritmo MinMaxSteady-State [85] das potências aparente (S), real/ativa (P) e reativa (Q). As

fórmulas para estas potências a partir dos sinais discretos de tensão (U) e corrente (I) estão apresentadas nas Equações 4.1 a 4.3.

$$S = UI \quad (4.1)$$

$$P = UI \cos(\phi) \quad (4.2)$$

$$Q = UI \sin(\phi) \quad (4.3)$$

onde ϕ é o desfasamento entre U e I .

Os três desagregadores utilizados para este estudo foram: SVM, k -NN e uma rede neuronal perceptron multicamada (MLP). O *dataset* utilizado para o estudo foi o AMPds [86]. Este *dataset* contém dados de eletricidade que alimenta uma casa canadiana através de um serviço de 240 V e 200 A, por um sistema bifásico. Mediu-se a precisão dos modelos e o tempo computacional associado à desagregação das cargas presentes do *dataset*. O modelo classificador k -NN obteve resultados equivalentes aos outros algoritmos, mas com menor exigência computacional. Deste modo, foi o classificador escolhido para este trabalho.

k -NN e características

k -NN é um método clássico de *Machine Learning* baseado em distâncias que considera a proximidade entre os dados para a obtenção de predições [87]. k -NN é uma extensão do algoritmo 1-NN que considera os k -vizinhos mais próximos, enquanto que, 1-NN que considera 1 vizinho mais próximo.

Neste projeto, k -NN usa as assinaturas dos equipamentos guardadas (\mathbf{Sig}_{eq_i}) para prever o nome/etiqueta do equipamento em causa. Em primeiro lugar, são selecionadas as k assinaturas cujos valores são mais semelhantes com os valores da assinatura do equipamento a determinar $\mathbf{Sig}_{eq_{atual}}$.

Com base no estado da arte apresentado na Subsecção 4.1.1, a característica definida para constituir as assinaturas dos equipamentos são o conjunto de harmónicos ímpares da corrente. Os harmónicos são as componentes da corrente com frequências múltiplas da frequência fundamental (50Hz neste caso) e são obtidos pela FFT. A FFT permite resolver a transformada de Fourier discreta de forma rápida para obter a componente do sinal para cada frequência. A transformada de Fourier é apresentada na Equação (4.4). $I_{eq_i}^l(n)$ é o sinal temporal discreto correspondente à corrente consumida pelo equipamento eq_i (previamente identificado) relativo à fase l ($l \in \{1, 2, 3\}$). Sendo $n = 0, \dots, N - 1$ o índice da amostra (N é o número de amostras) e $X_{eq_i}^l(k)$ é a intensidade do sinal para o índice do espetro $k = 0, \dots, N - 1$, correspondente a uma frequência $2\pi k/N$ rad/s e fase l . Os harmónicos ímpares ($harmonicos_{impares}$) são os harmónicos correspondentes a índices k ímpares, como sugerido no exemplo da Figura 4.2.

$$X_{eq_i}^l(k) = \sum_{n=0}^{N-1} I_{eq_i}^l(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (4.4)$$

$$harmonicos_{impares}^l = X_{eq_i}^l(k), \text{ para } k \text{ ímpares} \quad (4.5)$$

Deste modo, a assinatura de um equipamento i (\mathbf{Sig}_{eq_i}) é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{Sig}_{eq_i} = [X_{eq_i}^1(k), X_{eq_i}^2(k), X_{eq_i}^3(k)], \text{ para } k \text{ ímpares} \quad (4.6)$$

Espectro - diagrama da Transformada de Fourier

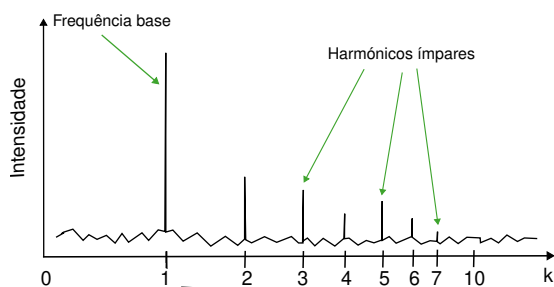


Figura 4.2: Exemplo ilustrativo de harmônicos ímpares.

No método k -NN, selecionam-se as k assinaturas \mathbf{Sig}_{eq_i} que minimizam $d(\mathbf{Sig}_{eq_i}, \mathbf{Sig}_{eq_{atual}})$. Sendo $d(\cdot)$ a distância Euclidiana entre dois vetores, conforme apresentada na Equação (4.7), onde N é o número total de amostras. De seguida, a partir das etiquetas dessas assinaturas mais semelhantes, executa-se uma votação para prever a etiqueta da assinatura a avaliar. Figura 4.3 apresenta um exemplo de aplicação do algoritmo k -NN com duas etiquetas (Equipamento 3 e Equipamento 4) com base em dois harmônicos ($X^a(1)$ e $X^a(2)$) usando $k = 3$ ou $k = 6$ vizinhos mais próximos com o objetivo de atribuir uma das etiquetas à amostra apresentada a vermelho.

$$d(\mathbf{Sig}_{eq_i}, \mathbf{Sig}_{eq_{atual}}) = \sum_{l=1}^3 \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (X_{eq_i}^l(k) - X_{eq_{atual}}^l(k))^2} \quad (4.7)$$

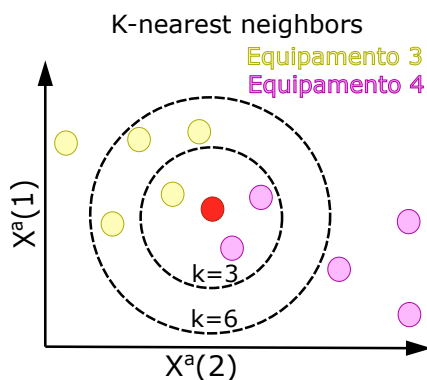


Figura 4.3: Exemplo de aplicação do algoritmo k -nearest neighbors (k -NN).

4.1.2 Metodologia para desagregação de cargas

Esta Subsecção descreve a metodologia proposta para a desagregação de cargas. O algoritmo é executado no módulo principal de processamento (mPP) usando os sinais provenientes do mSE.

4.1.2.1 Descrição geral do algoritmo

As etapas (fluxograma) da metodologia proposta para a desagregação são representadas na Figura 4.4. A saída (objetivo) da metodologia é a atribuição de uma etiqueta num

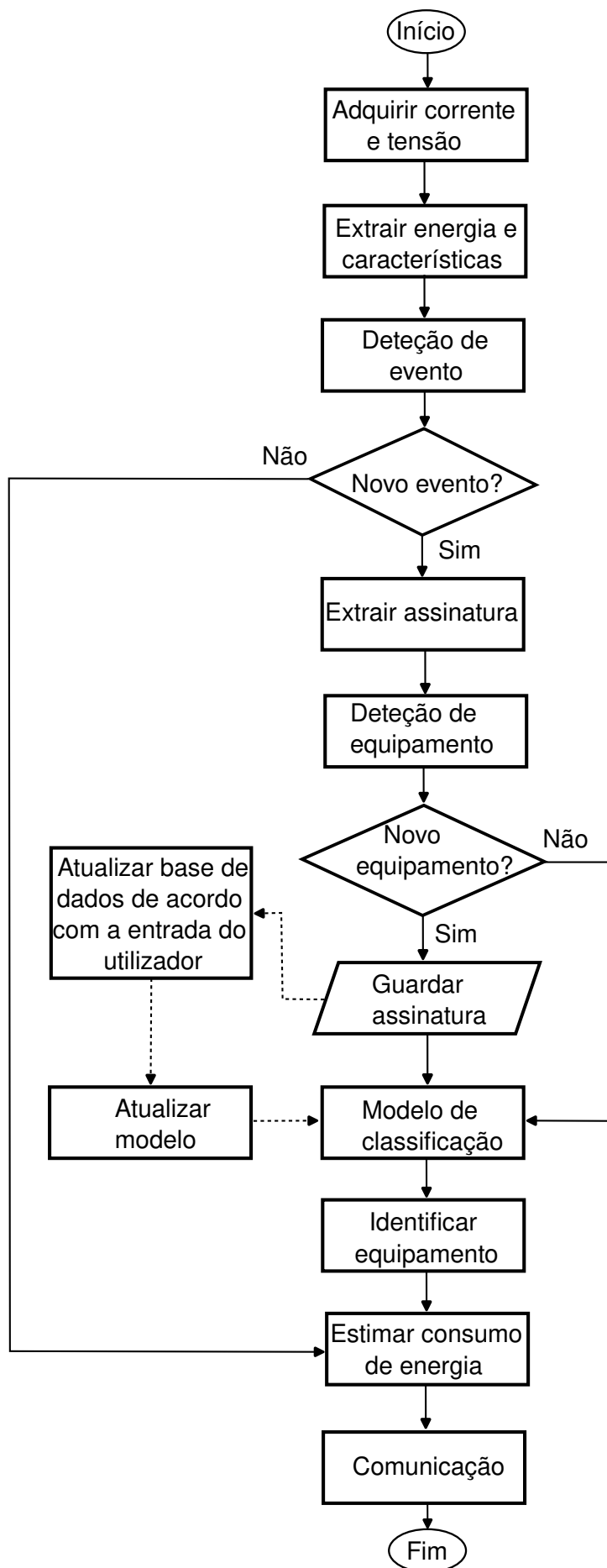


Figura 4.4: Fluxograma da metodologia de desagregação de cargas.

dado evento. Este evento é o ligar ($evento = 1$) ou desligar ($evento = -1$) de um dado equipamento.

De forma online, o algoritmo começa por receber sinais de corrente e tensão do evento atual. Em seguida, os harmônicos ímpares e as potências correspondentes ao sinal total são extraídas. As potências extraídas são a potência real P (4.2), a potência aparente S (4.1) e a potência reativa Q (4.3).

Em seguida, é efetuada a deteção do evento. O objetivo desta etapa é identificar se algum equipamento foi ligado ou desligado. Isto é feito através da deteção de eventos com base na regressão linear, utilizando as potências aparentes dos 5 últimos instantes [88]. Outros algoritmos para deteção de eventos poderiam ser usados, contudo a maioria desses algoritmos são computacionalmente pesados para utilização em sistemas de processamento embebidos. Assim, numa avaliação entre o desempenho e a exigência computacional dos métodos, decidiu-se que o método a utilizar seria a regressão linear. Deste modo, tal como sugerido na Figura 4.5, verificando o declive da potência aparente dos últimos 5 instantes, se este for maior do que um limiar T , então um novo evento de ligar é detetado. Se a inclinação for menor do que $-T$, então um novo evento de desligar é detetado. Caso contrário, nenhum evento é assinalado. Isto é descrito na Equação (4.8), onde $evento(n) = 1$ significa que ocorreu um evento de ativação de um equipamento, $evento(n) = -1$ significa que um evento de desativação de um equipamento foi detetada e $evento(n) = 0$ significa que nenhum evento ocorreu.

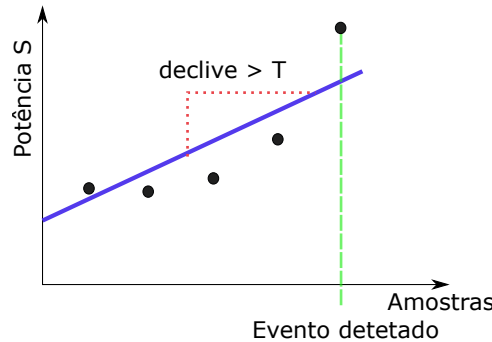


Figura 4.5: Deteção do evento de ativação de equipamento.

$$evento(n) = \begin{cases} 1, & \text{se } declive > T \\ -1, & \text{se } declive < -T \\ 0, & \text{se } T > declive > -T \end{cases} \quad (4.8)$$

Se nenhum evento for identificado, o consumo total de energia é estimado. Se, por outro lado, um novo evento for detetado, a assinatura do evento atual ($\mathbf{Sig}_{Ev_{atual}}$) é extraída. Esta assinatura é constituída pelos harmônicos ímpares do evento atual (Ev_{atual}), tal como apresentado na Equação (4.9). Sendo que Ev_{atual} é o sinal temporal definido como a subtração entre o sinal temporal anterior, de corrente e tensão, e o sinal temporal atual.

$$\mathbf{Sig}_{Ev_{atual}} = [X_{atual}^1(k), X_{atual}^2(k), X_{atual}^3(k)], \text{ para } k \text{ ímpares} \quad (4.9)$$

onde $X_{atual}^l(k)$ ($l \in \{1, 2, 3\}$) é a intensidade do sinal do evento atual e k é o índice do espetro de frequências.

De seguida, é efetuada a etapa de identificação do equipamento, para averiguar se o evento foi originado por um equipamento novo ou já existente na base de dados de

assinaturas e etiquetas. Isto é feito calculando a semelhança (S_{eq_i}) entre a assinatura do evento atual $\mathbf{Sig}_{Ev_{atual}}$ e as assinaturas dos equipamentos previamente identificados \mathbf{Sig}_{eq_i} , $eq_i = 1, \dots, EQ$, onde EQ é o número de equipamentos identificados no evento anterior. A semelhança S_{eq} entre as características da assinatura do evento atual ($\mathbf{Sig}_{Ev_{atual}}$) e a assinatura de um dado equipamento eq_i previamente identificado (\mathbf{Sig}_{eq_i}), é dada por:

$$S_{eq_i} = \frac{1}{(\mathbf{Sig}_{Ev_{atual}} - \mathbf{Sig}_{eq_i})^T (\mathbf{Sig}_{Ev_{atual}} - \mathbf{Sig}_{eq_i})} \quad (4.10)$$

Se para um certo equipamento eq_i , S_{eq_i} tiver um valor menor que um dado limiar S_t , assume-se que o evento foi originado por um equipamento novo. Deste modo, a etiqueta do equipamento em causa é definida pelo *input* de um utilizador. Se pelo contrário o equipamento não for novo, a etiqueta do equipamento é identificada através do modelo classificador k -NN, já descrito acima. Depois da classificação do equipamento, a assinatura do equipamento associada à sua etiqueta é guardada.

Além disso, são estimados o consumo total de energia e o consumo de energia do equipamento identificado. O consumo total de energia é a soma dos integrais da potência aparente do sinal atual de cada fase ($S^l(t)$ com $l \in \{1, 2, 3\}$) ao longo do intervalo de tempo entre t e $t + dt$:

$$E_{total}(t) = \sum_{l=1}^3 \sum_t^{t+dt} S^l(t) \quad (4.11)$$

O consumo de energia do equipamento identificado é dado por:

$$E_{eq_i} = \sum_{l=1}^3 \sum_t^{t+dt} S_{eq_i}^l(t) \quad (4.12)$$

onde $S_{eq_i}^l(t)$ com $l \in \{1, 2, 3\}$ é a da potência aparente do equipamento eq_i correspondente a cada fase.

Por fim, os resultados são transmitidos, ao mPP, para observação ou para outras aplicações. Por exemplo, os dados poderão ser usados como parâmetros de controlo de processos. Neste projeto, é objetivo os resultados serem transmitidos através da comunicação externa, após o respetivo processamento no mPP.

4.2 Módulo de expansão de sinais de vibração: Enchimento de moinhos

Num moinho de bolas, a redução do tamanho do cimento é feita por impacto, à medida que esferas (feitas de aço, aço inoxidável, cerâmica ou borracha) caem de perto do topo da câmara (Figura 4.6). Na Secção 3.5 foi apresentada a constituição de um moinho de bolas, encontrando-se este ilustrado na Figura 3.9.

No processo de moagem por este tipo de moinhos, para obter uma moagem otimizada do cimento, é necessário garantir que o moinho tem um enchimento adequado nas suas câmaras. Evita-se sobretudo que as câmaras do moinho estejam totalmente cheias ou totalmente vazias. Um processo de moagem estável e sem grandes variações no seu enchimento diminui a probabilidade de falhas e de intervenção humana, otimizando o uso de recursos energéticos no processo de moagem. Desta forma, é evidente a importância da

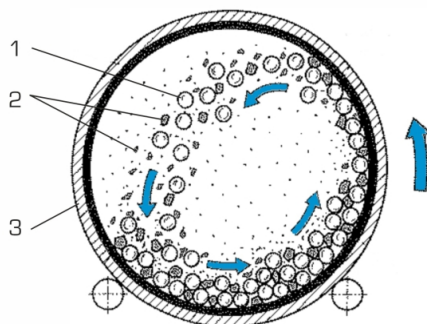


Figura 4.6: Princípio de funcionamento de um moinho de bolas. 1 - esferas, 2 - cimento a moer, 3 - câmara cilíndrica [89].

determinação do enchimento do moinho durante a sua operação. Neste projeto propomos utilizar sensores de vibração na entrada e saída do moinho, para a previsão do enchimento da primeira e segunda câmara.

No segundo caso de estudo, pretende-se desenvolver e validar uma metodologia para determinar o enchimento de um moinho de cimento da empresa CIMPOR. Para isso, foi necessário a recolha de sinais de vibração obtidos pelo mSV a diferentes níveis de enchimento conhecidos. O objetivo é obter um modelo preliminar para a estimação do enchimento do moinho e validar o mSV. O modelo foi obtido pelo método dos mínimos quadrados [90].

4.2.1 Estado da arte

Diversos métodos foram estudados ao longo dos últimos anos para determinar o nível de enchimento de um moinho de bolas através de sinais de vibração. Entre as técnicas mais utilizadas estão a determinação do enchimento extraíndo a potência, a energia e a raiz quadrada média (RMS) do sinal de vibração do rolamento do moinho [91, 92, 93, 94].

Gugel et al. [95, 96] apresentou uma metodologia para melhorar a precisão das técnicas anteriores. Neste trabalho, dois sensores de vibração, separados por 180 graus, foram utilizados para obter sinais da vibração da superfície cilíndrica das câmaras do moinho. As leituras instantâneas são obtidas em conjunto e os dados médios alimentam uma rede neuronal. Outras técnicas populares usadas para processamento de sinais de vibração incluem características no domínio da frequência obtidas por transformadas de Fourier, transformadas wavelet e transformadas de Hilbert-Huang [97, 98, 99]. Diversas características foram investigadas, por exemplo, potência, entropia e as características estatísticas do espectro de frequência. Além disso, a frequência central e a variação de frequência do espectro de vibração do moinho são também utilizadas. É também comum utilizar sub-bandas de frequências características para modelar os parâmetros de enchimento [100, 101].

No artigo [100], um método de extração de características dos sinais de vibração foi proposto para estimar o enchimento de um moinho de bolas. O método baseia-se na transformada fracionária de Fourier (FrFT), que é uma generalização da transformada de Fourier e permite obter uma mistura de componentes temporais e em frequência do sinal.

No estudo apresentado em [101], obtêm-se sinais de vibração da base de um moinho de bolas usando um acelerómetro de ± 5 g. As características do sinal são extraídas usando

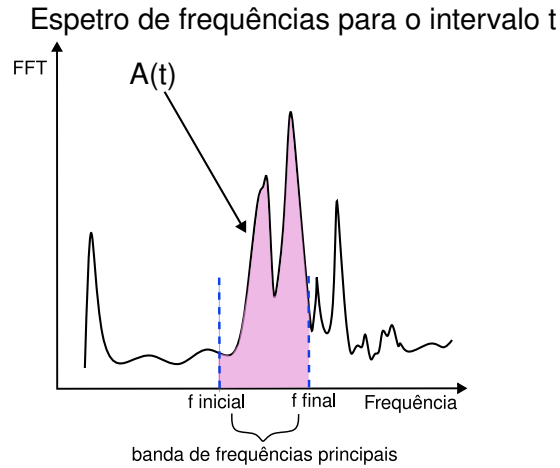


Figura 4.7: Ilustração da obtenção da área A para uma banda de frequências principais $f_{inicial}$ e f_{final} .

transformada rápida de Fourier (FFT), transformada de wavelet discreta, decomposição de pacotes wavelet e decomposição em modo empírico. Estas características são fornecidas como entrada para uma rede neural artificial que é utilizada para prever o nível de enchimento percentual dentro do moinho. As características de entrada baseadas em FFT são obtidas tomando a soma de amplitudes consecutivas do sinal no domínio da frequência, relativos a uma faixa de frequências característica. Pela sua simplicidade e boa performance, esta foi a característica selecionada para ser usada na resolução do presente caso de estudo.

4.2.2 Metodologia para determinação do nível de enchimento

Esta Subsecção descreve a metodologia proposta para a determinação do enchimento do moinho a partir de sinais de vibração obtidos pelo mSV.

A determinação do enchimento do moinho baseia-se no facto da energia do sinal de vibração se concentrar numa banda de frequências principais. A componente do sinal de vibração correspondente a esta banda de frequências é a mais afetada pelo impacto das esferas no moinho e reflete informações acerca do nível de enchimento do mesmo. Por razões de confidencialidade associados ao projeto iProMo, os limites da banda de frequências principais são omitidos. Esta componente denomina-se área A e considera-se que apresenta uma relação aproximadamente linear com o nível de enchimento E . Para um dado instante t , consideramos que o enchimento é dado por:

$$E(t) \approx aA(t) + b, \quad (4.13)$$

onde a é a constante de proporcionalidade, e b é a ordenada na origem. A área A é obtida a partir do cálculo de FFT do sinal, como a área do espectro de frequências correspondente às frequências principais, tal como apresentado na Equação (4.14) e Figura (4.7).

$$A = \sum_{f=f_{inicial}}^{f_{final}} |X(f)|, \quad (4.14)$$

onde $f_{inicial}$ e f_{final} são o início e fim da gama de frequências principais, respetivamente.

$X(f)$ é o valor da FFT para a frequência f e é dado por:

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi fn/N}, f = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (4.15)$$

onde $x(n)$ é o sinal de vibração no domínio da frequência, n é o índice da amostra, N é o tamanho do sinal $x(n)$ e f é o índice da frequência.

Desta forma, a metodologia para determinar o enchimento consiste na obtenção/calibração do modelo definido pela Equação (4.13), obtendo-se os parâmetros a e b . Neste projeto, a obtenção deste modelo é realizada com base no método de mínimos quadrados através de dados de treino, valores de área A referentes ao enchimento do moinho E .

Capítulo 5

Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados do desenvolvimento dos Capítulos 3 e 4. Na Secção 5.1 é apresentada a arquitetura de hardware modular desenvolvida e são apresentados os resultados relativos aos módulos desenvolvidos para a incorporação da arquitetura de hardware modular. Na Secção 5.2 são apresentados os resultados obtidos para os casos de estudo de desagregação de cargas e enchimento de moinhos, com os dados recolhidos através do mSE e mSV. Os dados “raw” são transmitidos para o mPP e processados nesse dispositivo.

5.1 Resultados sistema de hardware modular

5.1.1 Visão global

A arquitetura de hardware modular, conforme referido na Secção 3.2, é constituída pelo módulo principal de processamento e os módulos de expansão. Neste caso específico foram desenvolvidos os módulos mSE e o mSV. Com os módulos desenvolvidos procedeu-se à construção do sistema de hardware modular.



Figura 5.1: Sistema de hardware modular desenvolvido.

Na Figura 5.1 é apresentado o sistema de hardware modular desenvolvido. A comunicação SPI entre os mEX e o mPP é feita através do barramento conforme mencionado na Secção 3.2. A alimentação dos mEX também é feita através do barramento, mas

esta provém diretamente da fonte externa e não do mPP, visto a arquitetura não ser constituída pelo mPP referido na Secção 3.3.

O sistema de hardware modular não é constituído pelo mPP devido à não finalização da construção do mesmo. O esquemático do módulo de processamento foi finalizado, mas devido à sua alta complexidade e à falta de componentes disponíveis no mercado (como o PMIC MMPF0100) não foi possível construir o PCB durante este projeto. Este será constituído por várias camadas e várias técnicas, como por exemplo, a distribuição das pistas das memórias RAM com a mesma distância. Para além disso, o processo de soldagem de alguns componentes (como por exemplo o microprocessador a usar MCIMX6D5EYM10AE) requerem processos de soldagem especiais (PBGA *Plastic Ball Grid Array*) e uma verificação por raio X da correta soldagem dos mesmos. O esquemático do módulo principal de processamento foi finalizado, podendo ser consultado no Apêndice C, e encontra-se em desenvolvimento o projeto do PCB. Estes factos levaram a que o mPP fosse substituído por um “Raspberry Pi” por forma a testar e validar os mEX desenvolvidos.

O “Raspberry Pi” possui características suficientes para o desempenho do mPP especificado. Este equipamento executa a tarefa de controlo na rede (interna e externa), o processamento dos dados e o teste dos módulos de expansão na nossa arquitetura. Inclusive permite o controlo e a comunicação com o exterior da arquitetura, através de Ethernet, conforme estipulado na Secção 3.2. Apesar deste não estar pronto para a aplicação industrial, conseguiu-se validar o estudo desenvolvido nesta tese.

Validou-se o sistema de hardware modular desenvolvido, a sua arquitetura e os módulos de expansão mSE e mSV, sendo os resultados obtidos apresentados de seguida. O sistema permitiu também a recolha de dados dos sinais de campo e a validação dos algoritmos de inteligência computacional apresentada no Capítulo 4.

5.1.2 Módulo de expansão de sinais elétricos

Placa de validação dos circuitos de condicionamento

Inicialmente, para a validação dos circuitos de condicionamento de corrente e tensão do mSE, apresentados no Capítulo 3 nas Secções 3.4 e 3.5, foi desenvolvida a placa constituída pelos circuitos de condicionamento apresentada na Figura 5.2. Na figura pode-se observar as entradas para os sinais de tensão trifásico e neutro (L1, L2, L3 e N) e para os sinais provenientes dos sensores de Rogowski de cada fase (S1+, S1-, S2+, S2-, S3+ e S3-). As saídas da placa correspondem às saídas dos circuitos de condicionamento de corrente e tensão apresentados na Secção 3.4 de 0 a 5 V. A alimentação da placa é feita através de um conversor isolador DC/DC de 24 VDC e GND para as saídas +9 V, 0 V e -9 V. As saídas do conversor DC/DC servem de alimentação dos amplificadores presentes na placa (LM2904PSR) e foram usadas para fazer o *offset* dos sinais no circuito de condicionamento. No Apêndice D pode-se observar o esquemático, o PCB e o modelo 3D da placa de validação de circuitos de condicionamento.

Circuitos de condicionamento de tensão

A validação dos circuitos de condicionamento de tensão e corrente foi testada em laboratório. No circuito de condicionamento de tensão foi usado como entrada a rede monofásica presente nos escritórios da empresa Oncontrol, em que foi ligada a fase e o neutro ao circuito de condicionamento de tensão. Assim, foi efetuada a validação dos 3

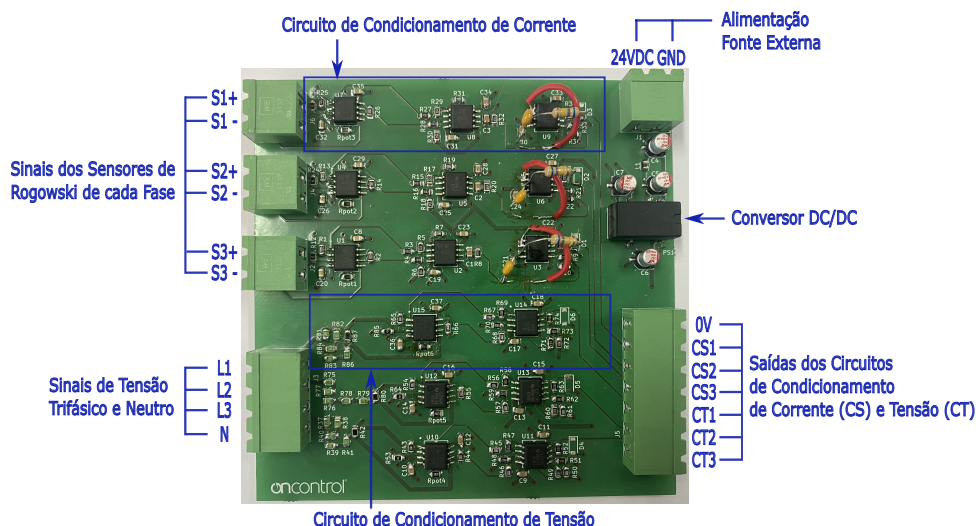


Figura 5.2: Placa de sinais elétricos para teste de circuitos de condicionamento de corrente e tensão.

circuitos de condicionamento de tensão, testando individualmente a ligação da fase em cada circuito de condicionamento, com a fase ligada em paralelo nos 3 circuitos. Através do osciloscópio foi feita a observação do sinal em cada estágio do circuito de condicionamento de tensão, que se pode observar no Apêndice E. De seguida, são apresentados os sinais de entrada e saída do circuito de condicionamento de tensão na Figura 5.3. O sinal de entrada encontra-se apresentado a amarelo (sinal de entrada no circuito de condicionamento de tensão após o divisor de tensão).

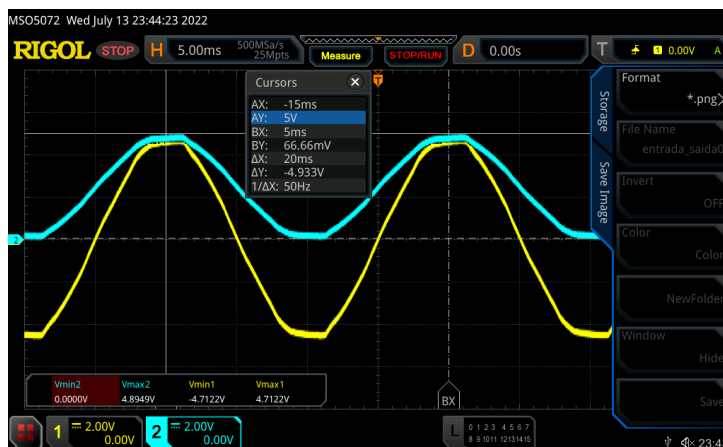


Figura 5.3: Sinais de entrada e saída do circuito de condicionamento de tensão.

Se o sinal da rede monofásica fosse idealmente de 325 V, teríamos um sinal de entrada de 4,637 VAC proveniente do divisor de tensão (Equação (3.1)). O sinal de entrada vai ao encontro do apresentado no osciloscópio, com uma pequena discrepância, uma vez que a tensão da rede não é idealmente 325 V e está associado à tolerância das resistências de 0,1%. Assim como, a leitura feita pelo osciloscópio de V_{min} e V_{max} também não é a mais precisa, pois a leitura efetuada é sobre o valor mais baixo e alto do sinal tendo em conta o ruído, e não sobre o valor central presente no ruído proveniente da rede.

O sinal de saída (azul) esperado do circuito no último estágio, tendo em conta os cálculos apresentados na Secção 3.4, seria idealmente de 0,165 V a 4,83 V. Com as

discrepâncias mencionadas anteriormente e o facto de não estarmos no ambiente ideal, com o uso de amplificadores não ideais (existem correntes de *offset* e tensões de *offset*), o valor de saída apresentado no osciloscópio (0 V a 4,895 V) é considerado o desejável.

Concluí-se que atingiu o objetivo pretendido do condicionamento dos sinais de tensão, com a entrada de um sinal 325 VAC, tendo obtido uma saída do sinal na gama de 0 a 5 V. Verifica-se também que este sinal não tem nenhum desfasamento, conforme pretendido.

Circuitos de condicionamento de corrente

No circuito de condicionamento de corrente foi realizada a validação dos 3 circuitos de condicionamento de corrente, correspondente a cada fase, com a introdução de um sinal equivalente ao de saída do sensor de Rogowski (22,613 mV - Equação (3.6)) a partir de um gerador de sinal. Este teste teve de ser realizado com um gerador de sinal, porque em laboratório torna-se complicado atingir correntes de 1 kA, que é estipulada na Secção 3.4 na medição de corrente máxima primária do sensor de Rogowski. De igual forma, ao circuito de condicionamento de tensão, foi feito o teste do sinal para cada circuito, com uma ligação em paralelo nos 3 circuitos. De seguida, na Figura 5.4 pode-se observar os sinais de entrada e de saída do circuito de condicionamento de corrente. No Apêndice E constam os sinais do osciloscópio em cada estágio deste circuito.



Figura 5.4: Sinais de entrada e saída do circuito de condicionamento de corrente.

Na Figura 5.4, o sinal amarelo representa a entrada proveniente do gerador de sinal. Este tem presente algum ruído originado pela fonte, devido à geração de um sinal de amplitude pequena (22,6 mV). O sinal azul representa o sinal de saída do circuito de condicionamento de corrente, após o último estágio de *offset*. Conforme se pode verificar, segundo o desenvolvimento feito na Secção 3.4 para o circuito de condicionamento de corrente, obteve-se uma saída ideal de 0,057 V a 4,943 V. Observando o sinal obtido no osciloscópio (0,166 V a 4,700 V) pode-se concluir que o circuito de condicionamento vai ao encontro do idealizado. As discrepâncias são aceitáveis visto não se estar num ambiente ideal. O ruído proveniente da fonte geradora de sinal, o uso de resistências com uma tolerância de 0,1%, o uso de amplificadores não ideais com tensão e correntes de *offset* e o uso de um condensador na integração do sinal com uma tolerância de 5% são fatores que contribuem para o ambiente com a existência de erros.

Atingiu-se o objetivo pretendido obtendo uma saída do sinal de 0 a 5 V com a entrada proveniente do sensor de Rogowski de 0 a 22,613 mV. É também possível observar um

desfasamento de 90 graus entre os sinais que vai ao encontro do pretendido, sendo este o desfasamento presente no integrador para a recuperação do sinal original de corrente.

Módulo de expansão de sinais elétricos - Solução final

Após a validação dos circuitos de condicionamento de tensão e corrente, é elaborado o módulo de expansão (mSE) constituído por estes, e que é incorporado na arquitetura modular. No Apêndice F está disponível o esquemático, o desenho do PCB e o modelo 3D deste módulo desenvolvido em Kicad. No desenvolvimento procedeu-se ao ajuste das resistências para um sinal de saída de corrente e tensão admissível pelo ADC em uso (0 a 2,5 V). É utilizado o mesmo método apresentado na Secção 3.4 mas para o ajuste da saída de 0 a 2,5 V.

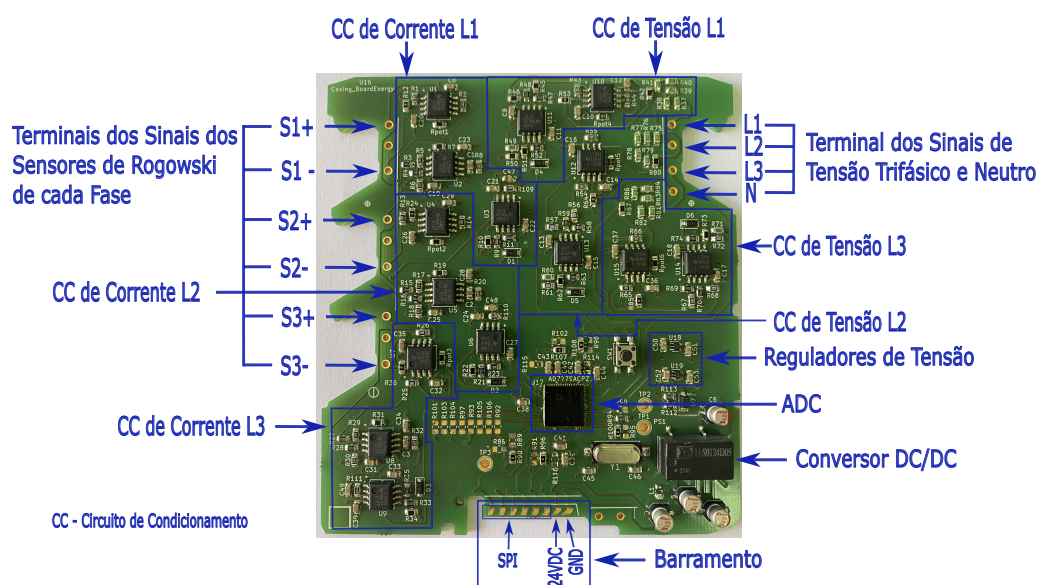
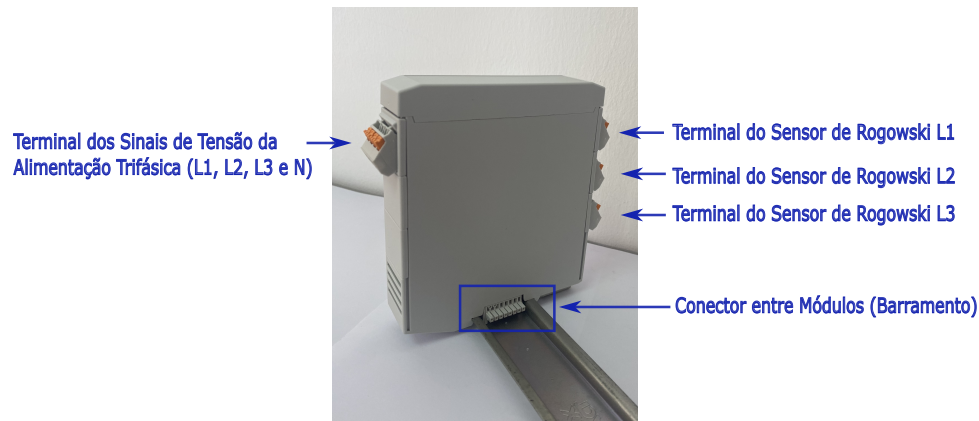


Figura 5.5: PCB do módulo de expansão de sinais elétricos.

Na Figura 5.5 é apresentado o PCB do mSE. No PCB observam-se as entradas dos sinais de campo de corrente e tensão, os circuitos de condicionamento de tensão e corrente, o ADC com comunicação por SPI e a alimentação (conversor DC/DC e reguladores de tensão). Os componentes referidos anteriormente têm em conta as características referidas ao longo da Secção 3.4.

Na Figura 5.6 observa-se o *casing* optado para a aplicação industrial deste módulo. Este é fornecido pela Phoenix Contact e é da gama de caixas eletrónicas modulares da série ICS para aplicações IoT [102]. O *casing* é apropriado para a indústria sendo compacto, robusto e resistente termicamente e permite facilmente a incorporação de dissipadores de calor. O acoplamento entre os vários módulos é efetuado através de conectores adaptados para o encaixe na calha DIN dos módulos, que constituirá o barramento de alimentação e de comunicação. Este conector permite a fácil aplicação dos módulos na arquitetura modular, de encontro ao objetivo *plug & play* da solução. Nas partes laterais do módulo observam-se os terminais para a ligação dos sinais de campo do sensor de Rogowski (corrente) de cada fase e da tensão da alimentação trifásica (3 fases e neutro). Como se observa o PCB foi desenvolvido para o *casing* apresentado.

Figura 5.6: *Casing* do mSE.

Recolha de dados

De modo a testar o módulo de expansão de sinais elétricos desenvolvido, foi feita a recolha de dados da alimentação trifásica no laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra. A alimentação trifásica neste laboratório assemelha-se ao ambiente industrial pois é usada para a alimentação de 5 motores trifásicos presentes na indústria (4 motores de indução e um motor de corrente contínua).

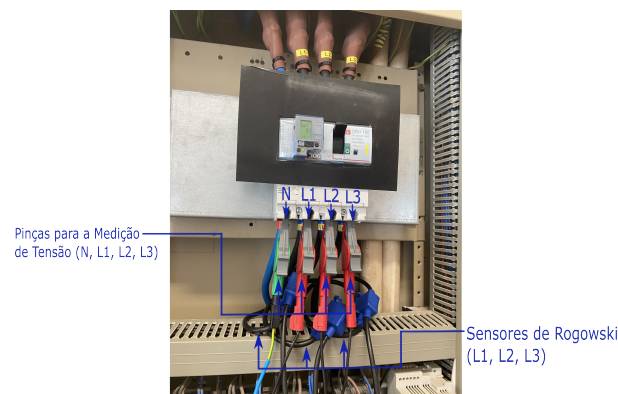
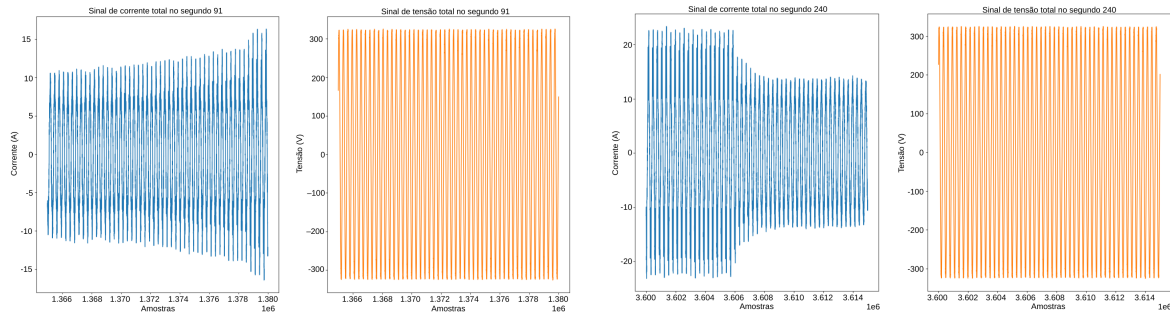


Figura 5.7: Leitura de sinais de tensão e corrente da alimentação trifásica no quadro elétrico.

Na Figura 5.7 é apresentado o quadro elétrico em que se fez a recolha dos dados através do mSE desenvolvido, no qual foi feita a leitura de tensão (através de pinças) e corrente da alimentação trifásica. Utilizou-se a arquitetura apresentada na Subsecção 5.1.1. Os sensores de Rogowski foram ligados em cada um dos terminais do mSE, assim como cada uma das fases e neutro nos respetivos terminais. Na figura observam-se os sensores de Rogowski para a leitura da corrente presente em cada fase, e o uso de pinças para a leitura da tensão em cada fase e no neutro da alimentação trifásica do laboratório.

A recolha de dados foi feita ao longo de 360 segundos, em que se ligou e desligou sequencialmente 5 equipamentos, para a aplicação da metodologia apresentada na Secção 4.1. Na Subsecção 5.2.1 são apresentados os resultados obtidos com estes dados relativos ao caso de estudo da desagregação de cargas.

Nas Figuras 5.8a e 5.8b são apresentados os sinais de corrente e tensão correspondente



(a) Quando o equipamento 3 é ligado (91s). (b) Quando o equipamento 3 é desligado (240s).

Figura 5.8: Sinais de corrente e de tensão da fase 1 do equipamento 3.

à fase L1 dos instantes em que se liga e desliga o equipamento 3 (motor), respetivamente. São apresentados os sinais de tensão correspondentes ao valor real de tensão e corrente presente na alimentação trifásica. Neste caso específico, podemos observar um aumento da corrente quando o equipamento é ligado e uma diminuição quando este é desligado, como esperado.

Os resultados obtidos demonstram que o mSE encontra-se preparado para ser incorporado na arquitetura modular para futuros testes em ambiente industrial, estando apto para a recolha de sinais de campo de corrente e tensão, e para a comunicação por SPI com o mPP.

5.1.3 Módulo de expansão de sinais de vibração

Sensor de vibração

De seguida, é apresentado o sensor de vibração desenvolvido de acordo com as características requeridas na Secção 3.5.



(a) Vista lateral.

(b) Vista superior.

(c) Vista interior.

Figura 5.9: Sensor de vibração desenvolvido.

Observando a Figura 5.9, na vista lateral, é visível um íman magnético para a fixação do sensor junto ao moinho de cimento, tornando o sensor de fácil aplicação e remoção. O sensor é constituído por um *casing* robusto preparado para atingir altas vibrações, e para proteger o acelerómetro e o PCB. Isto permite que o interior do sensor esteja protegido do ambiente exterior, como por exemplo de poeiras. O PCB é fixo ao *casing* através de parafusos. Assim, o sensor encontra-se preparado para testes na indústria, neste caso

específico para a recolha de sinais de vibração de um moinho de cimento para a estimação do seu enchimento, indo ao encontro das características necessárias. No entanto, está em falta a aplicação de uma resina no interior do sensor. Visto que este está sujeito a vibrações, podem existir vibrações do interior do sensor, como do PCB ou da fixação dos parafusos. A aplicação de resina irá permitir uma melhor fixação e ligação entre os meios presentes no sensor (*casing*, PCB e parafusos), ficando o sensor estruturado num só corpo com os meios interligados. Desta forma, as vibrações serão comuns a todo o sensor, o que possibilitará uma melhor recolha pois as vibrações detetadas serão sobretudo provenientes do moinho. A resina não foi colocada porque, como nos encontrávamos em fase de testes, esta impossibilitaria alguma intervenção no interior da caixa do sensor.

Módulo de expansão de sinais de vibração - Solução final

Após o desenvolvimento do sensor de vibração, foi elaborado o módulo de expansão de sinais de vibração, o mSV. No desenvolvimento deste módulo procedeu-se ao ajuste das resistências para uma saída no circuito de condicionamento de 0 a 3,3 V, que é a gama de tensão admissível pelo ADC em uso. No Apêndice G é possível observar o esquemático, o desenho do PCB e o modelo 3D do módulo apresentado. Neste módulo, não foi feito o teste dos circuitos de condicionamento pois este é um circuito simples e típico, constituído por dois amplificadores inversores para o ajuste do ganho e *offset* do sinal.

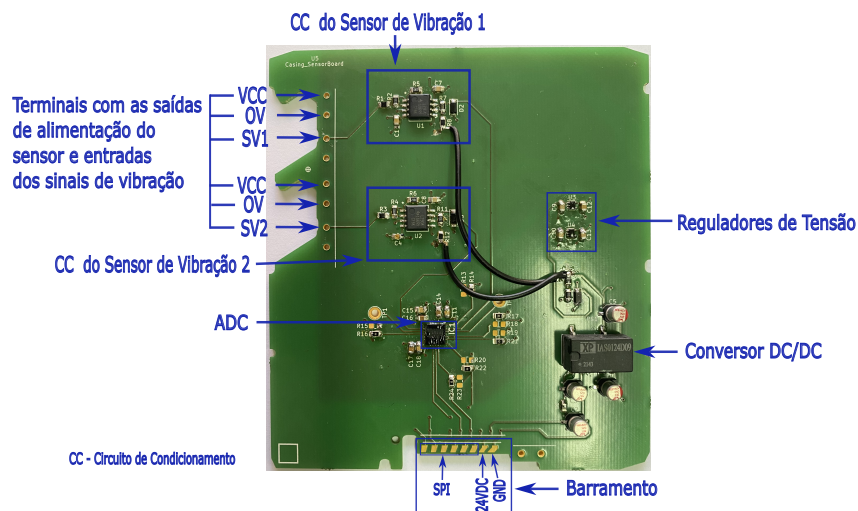


Figura 5.10: PCB do mSV.

Na Figura 5.10 é apresentado o PCB desenvolvido do mSV. No PCB, de igual forma ao mSE, observam-se os circuitos de condicionamento, o ADC com comunicação por SPI, a alimentação (conversor DC/DC) e os reguladores de tensão, indo ao encontro das características mencionadas na Secção 3.5. Este possui lateralmente os terminais para as saídas de alimentação do sensor e entrada para os sinais de vibração em tensão. Este módulo tem dois andares/terminais, um para cada sensor de vibração, pois para nossa aplicação, como referido na Secção 3.5, o moinho de cimento possui duas câmaras: um sensor irá ser usado na câmara de entrada e outro na câmara de saída, em que a monitorização do enchimento de cada câmara é feito pelo respetivo sensor.

Na Figura 5.11 é apresentado o *casing* para o módulo de sinais de vibração, sendo o mesmo *casing* usado para o módulo de sinais elétricos (Secção 5.1.2). A sua estrutura é idêntica e com as mesmas características, i.e., robusto, compacto, termicamente resistente

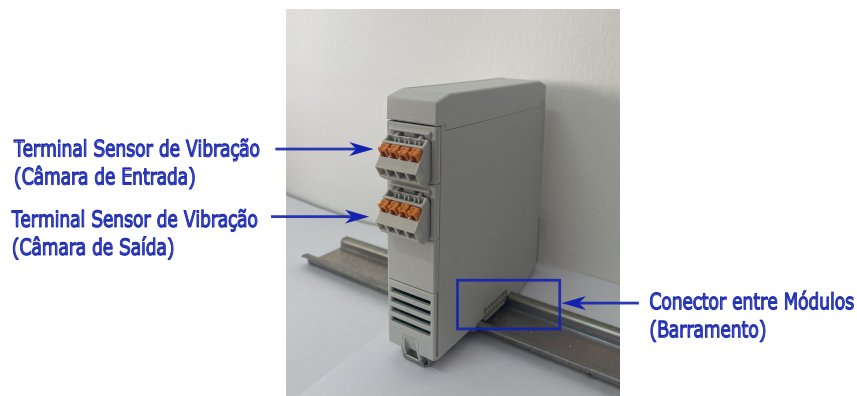


Figura 5.11: *Casing* do mSV.

e facilmente aplicável na arquitetura através do encaixe e desencaixe em calha DIN (conceito *plug & play*), possuindo um conector idêntico, que permite o barramento comum estipulado entre os módulos. A principal diferença é que este possui na parte lateral apenas dois terminais, em que cada um é relativo a um sensor de vibração. O PCB observado foi desenhado para o *casing* apresentado.

Recolha de dados

Após o desenvolvimento do mSV e do sensor de vibração procedeu-se à recolha de dados (sinais de vibração). A recolha de dados tem como objetivo o teste do módulo na arquitetura modular e a implementação do caso de estudo explícito na Secção 4.2 (estimação do enchimento do moinho).



Figura 5.12: Moinho de cimento na CIMPOR.

Na Figura 5.12 é explícito o ambiente industrial em que foi testado o mSV e o sensor de vibração, estes foram testados na empresa de cimento CIMPOR, na fábrica de Souselas em Coimbra. O mSV foi testado apenas com um sensor de vibração fixo na câmara de entrada do moinho de cimento pelo facto de estarmos em fase de testes para aprovação do sensor desenvolvido. Na Figura 5.13 observa-se o local de fixação do sensor desenvolvido junto ao moinho de cimento. O local de fixação do sensor é no local de suporte do moinho junto à câmara de entrada. Assim procedeu-se à recolha dos sinais de vibração com o sensor de vibração. Os dados recolhidos foram feitos em intervalos de 2 minutos com o funcionamento do moinho em processo de moagem.



Figura 5.13: Posicionamento do sensor de vibração no moinho de cimento.

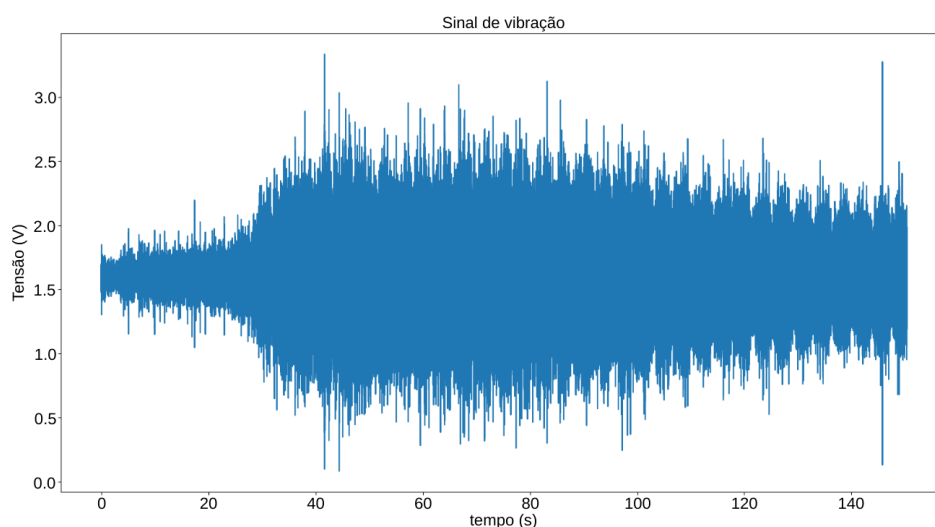


Figura 5.14: Dados obtidos pelo mSV.

Na Figura 5.14 pode se observar o sinal de vibração obtido em tensão pelo mSV. Os dados apresentados são relativos ao intervalo de tempo de cerca de 2 minutos do arranque do moinho. Podemos observar que inicialmente temos um sinal de tensão baixo, que depois aumenta e na parte final começa a estabilizar reduzindo um pouco a tensão. Como apresentado na Secção 3.5, o sinal de tensão será proporcional à vibração ou aceleração medida pelo sensor. Tendo em conta o comportamento de arranque do moinho de cimento, inicialmente temos uma vibração menor pois o moinho está no início de rotação, de seguida esta aumenta quando a velocidade de rotação do moinho aumenta e por fim estabiliza quando este já atingiu a velocidade de rotação do moinho. Concluímos que os dados apresentados vão ao encontro do esperado. Os sinais obtidos apresentam algum ruído que poderá provir da falta de resina na construção do sensor, conforme anteriormente referido, e estar presente um ambiente externo bastante perturbador, aumentando assim as vibrações no sensor. Para uma melhor entendimento e observação do sinal obtido, pode observar os resultados obtidos dos mesmos após a implementação da inteligência computacional para a estimação do enchimento do moinho na Subsecção 5.2.2.

Os resultados nesta subsecção demonstram que o mSV está pronto para ser incorporado na arquitetura modular e testado no ambiente industrial. Através da recolha de sinais de campo de vibração e transmissão dos mesmos para o mPP, através de SPI, atingiu-se o

objetivo pretendido para este módulo.

5.2 Resultados dos casos de estudo: inteligência computacional nos módulos de expansão

5.2.1 Módulo de expansão de sinais elétricos

De forma a validar o módulo de expansão e a metodologia de inteligência computacional para desagregação de cargas apresentada na Secção 4.1, o primeiro caso de estudo foi implementado. Começou-se por recolher os sinais de tensão e de corrente trifásicos à entrada do laboratório da Universidade de Coimbra, correspondentes à convolução dos sinais de todos os equipamentos em operação no respetivo laboratório. Esta recolha foi feita com o mSE. Os equipamentos do laboratório estão nomeados de 1 a 5. Esta recolha foi realizada ao longo de 360 segundos. Durante este tempo, diversos equipamentos foram ligados e desligados nos seguintes instantes:

- segundo 29: ativação do equipamento 1;
- segundo 59: ativação do equipamento 2;
- segundo 91: ativação do equipamento 3;
- segundo 121: ativação do equipamento 4;
- segundo 152: ativação do equipamento 5;
- segundo 179: desativação do equipamento 1;
- segundo 209: desativação do equipamento 2;
- segundo 240: desativação do equipamento 3;
- segundo 273: desativação do equipamento 4;
- segundo 303: desativação do equipamento 5.

Na Figura 5.15 está apresentado um gráfico com os valores das potências aparentes para as 3 fases de alimentação elétrica do laboratório, ao longo do tempo total. Na Figura 5.15, os instantes de eventos de ativação e desativação de equipamentos são facilmente identificados. Como mencionado na descrição da metodologia para a desagregação das cargas (Secção 4.1), para identificar o equipamento que originou um evento, o classificador k -NN é utilizado, baseando-se nos valores dos harmónicos ímpares da corrente (assinatura) do evento. Como exemplo ilustrativo, apresentam-se na Figura 5.16 uma assinatura do equipamento 3 e uma assinatura do equipamento 5.

Os parâmetros utilizados foram: limiar de declive para deteção de evento $T = 5$ W/s, limiar de semelhança $S_t = 10$ e número de vizinhos considerados no método k -NN = 3.

O resultado final é apresentado na Tabela 5.1 que apresenta os eventos ocorridos e a sua deteção. Pode observar-se que os eventos de ativação e desativação de equipamentos e os instantes em que eles ocorreram foram coincidentes com a sequência real dos eventos. A única exceção foi o desligamento do equipamento 1 (ao segundo 179) que foi detetado ao segundo 180 pelo algoritmo. Isto pode ser devido ao facto do equipamento 1 não ter um

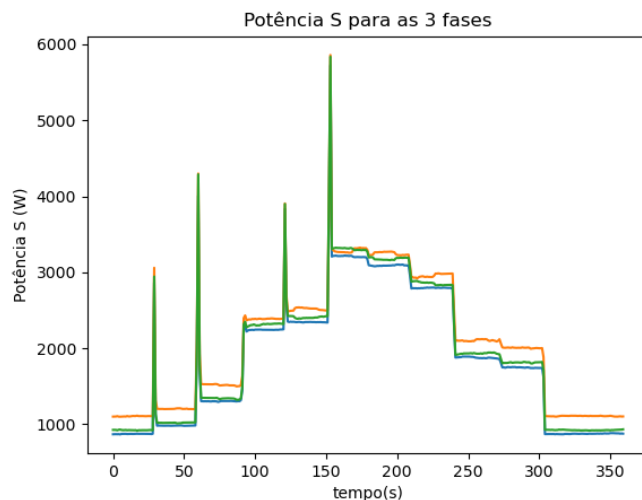


Figura 5.15: Potência aparente ao longo do tempo para as 3 fases de alimentação elétrica. Verde: fase 1; laranja: fase 2; azul: fase 3.

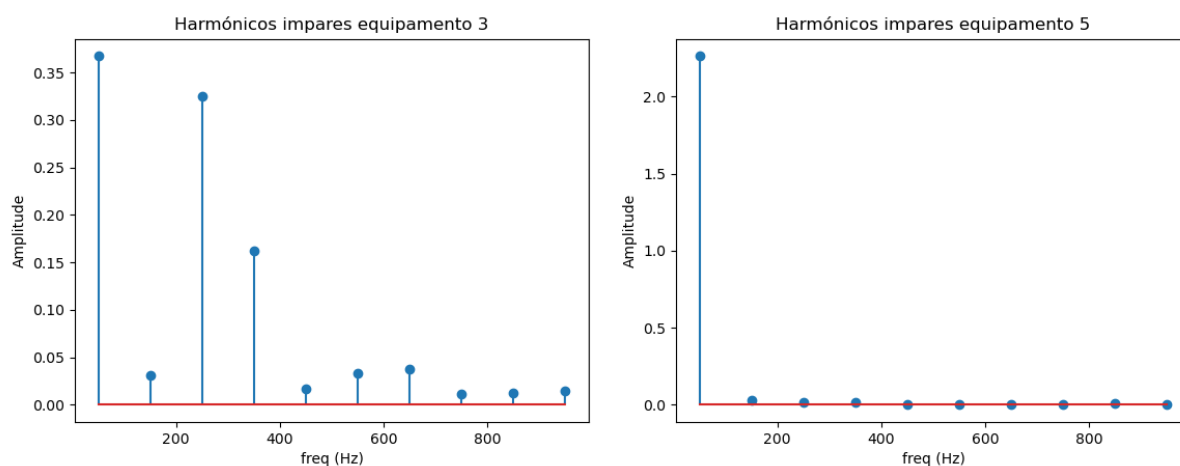


Figura 5.16: Assinaturas dos equipamentos 3 (esquerda) e 5 (direita) da fase 1 ($l=1$). Vetor das amplitudes dos harmônicos ímpares, associado à respectiva frequência (50 Hz).

desligamento instantâneo. Verificou-se ainda uma exatidão de 100% na classificação de equipamentos, pois as etiquetas obtidas dos equipamentos para cada evento coincidiram com as etiquetas reais.

Estes resultados vão ao encontro dos objetivos deste caso de estudo: demonstram que o mSE opera de forma expectável, e que o método implementado para desagregação de cargas é razoável para a aplicação em causa. Futuramente, tenciona-se aprimorar o método de desagregação de cargas, testando outras aplicações, classificadores e características. Além disso, pretende-se, no futuro, obter valores reais para consumos de energia para cada equipamento, de forma a validar o método de estimação da energia consumida por desagregação de cargas. Na presente tese, as estimativas das energias consumidas totais, e de cada equipamento, não são apresentadas, uma vez que não estão disponíveis valores reais para a validação do método.

Evento	Instante em que ocorreu (s)	Instante em que foi detetado (s)	Erro (s)
Ativação equipamento 1	29	29	0
Ativação equipamento 2	59	59	0
Ativação equipamento 3	91	91	0
Ativação equipamento 4	121	121	0
Ativação equipamento 5	152	152	0
Desativação do equipamento 1	179	180	1
Desativação do equipamento 2	209	209	0
Desativação do equipamento 3	240	240	0
Desativação do equipamento 4	273	273	0
Desativação do equipamento 5	303	303	0

Tabela 5.1: Resultados obtidos para a deteção de eventos.

5.2.2 Módulo de expansão de sinais de vibração

De forma a validar o mSV, o segundo caso de estudo foi implementado. Começou-se por recolher 12 amostras do sinal de vibração do moinho de cimento da empresa CIMPOR - Cimentos de Portugal, associados a níveis de enchimento conhecidos. Estes sinais de vibração são adquiridos pelo o mSV, enquanto que o nível de enchimento real foi fornecido pela empresa CIMPOR. De seguida, tal como discutido na Secção 4.2, foi calculada a área A dos espectros dos diversos sinais de vibração. O *dataset* total foi aleatoriamente separado em dados de treino (9 amostra, Tabela 5.2a) e dados de teste (4 amostras, Tabela 5.2b). A partir dos dados de treino e através do método dos mínimos quadrados, obteve-se o modelo linear apresentado na Figura 5.17, para modelar a relação entre a Área (A) (4.14) e o enchimento do moinho E (Equação (4.13)).

Área A (V Hz)	Enchimento (%)
4,8288	49
3,1482	56
2,8886	57
2,2962	65
1,5232	68
1,2367	72
1,0146	75
1,0041	78
1,0031	79

(a) Dados de treino.

Área A (V Hz)	Enchimento (%)
4,3765	53
2,7628	62
1,4543	70
1,0037	77

(b) Dados de teste.

Tabela 5.2: Dados de treino e teste para a regressão linear.

A reta obtida foi $E(t) = 7,38A(t) + 81,55$ e o R^2 [103] da regressão linear foi $R^2 = 0,92$. O modelo vai ao encontro do esperado e descrito pela Equação (4.13). Para validar o modelo obtido, este foi aplicado aos dados de teste. Os valores de enchimento estimados são apresentados na Tabela 5.3. A raiz do erro quadrático médio da estimação (RMSE do inglês *Root Mean Squared Error*) foi 2,43%. No futuro, estudos serão feitos para otimizar este modelo testando outras bandas de frequências principais e métodos não lineares. Além disso, o ajuste do modelo pode ser melhorado aumentando o número de dados através de mais medidas. Isto irá permitir o estreitamento do intervalo de confiança dos parâmetros de ajuste. Apesar das possíveis melhorias futuras, estes resultados comprovam que o modelo linear simples é razoável para este sistema e que o mSV opera de forma consistente e expectável.

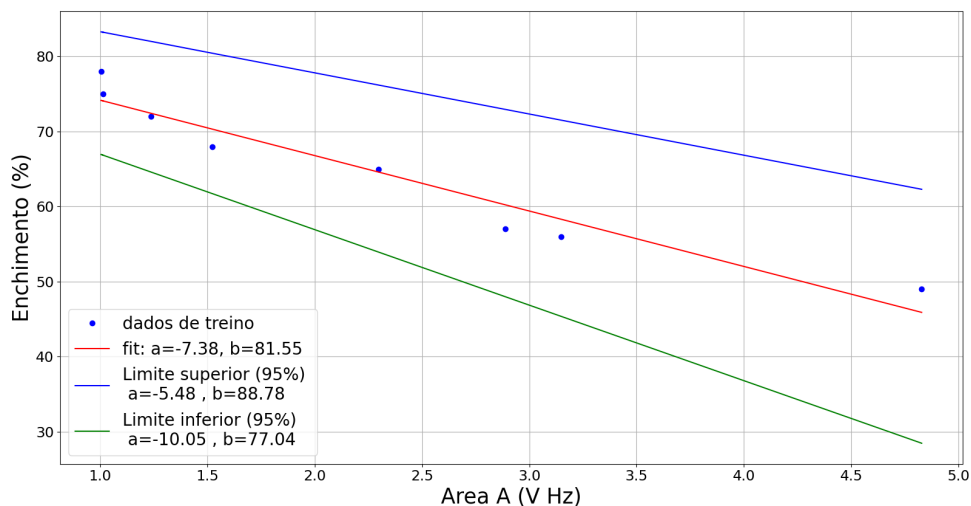


Figura 5.17: Modelo obtido por regressão por mínimos quadrados, e intervalo de confiança para os parâmetros de ajuste obtidos, com um nível de confiança 95%.

Área A (V Hz)	Enchimento estimado (%)	Enchimento observado (%)	Erro (%)
4,3765	49,24	53	3,76
2,7628	61,16	62	0,84
1,4543	70,82	70	0,82
1,0037	74,15	77	2,85

Tabela 5.3: Níveis de enchimento obtidos com o modelo linear para os dados de teste.

Capítulo 6

Discussão e trabalho futuro

Os resultados apresentados vão de encontro ao principal objetivo deste projeto, o desenvolvimento de um sistema de hardware modular para ambientes industriais. A arquitetura de hardware modular desenvolvida cumpre uma das principais características dos sistemas modulares que é a fácil adição e remoção de módulos de expansão por parte do utilizador, indo ao encontro do conceito *plug & play*. Esta característica é conseguida através dos conectores entre módulos, que permitem um barramento comum aos módulos, incorporando a comunicação por SPI dos mEX com o mPP. Consequentemente, os dados transmitidos por SPI são processados localmente no mPP, extraíndo *features* dos mesmos, permitindo aplicar técnicas de modelação e inteligência computacional, conforme objetivo estabelecido para este sistema modular.

O sistema modular vai de encontro aos estudados na Secção 2.2, mas com um desenvolvimento mais otimizado para o ambiente industrial. Os meios de proteção apresentados no esquemático do mPP e o *casing* utilizado, tornam este sistema robusto e resistente para a aplicação industrial. Esta arquitetura também é mais direcionada para o utilizador e para a sua aplicação específica em ambiente industrial. Esta permite o desenvolvimento de módulos de expansão específicos de aplicação direta em campo, já com o respetivo condicionamento necessário e comunicação estabelecida para o mPP. A comunicação estabelecida é também comum no mercado e sem quaisquer restrições no seu domínio para utilizações futuras. Estas características tornam o sistema modular desenvolvido adequado para a aplicação industrial e de fácil aplicação para o utilizador.

Em relação ao mPP, foi desenvolvido o seu esquemático final, em que a sua arquitetura vai de encontro aos módulos estudados na Subsecção 2.3.1 e à arquitetura estudada no Apêndice A. As características do mPP são estipuladas para a incorporação das seguintes funcionalidades: capacidade de suporte de sistema operativo; capacidade de processamento de sinais através de inteligência computacional; comunicação SPI com os mEX; e comunicação exterior para a monitorização e controlo do sistema modular. As características apresentadas vão de encontro ao objetivo estabelecido para este módulo. Contudo não foi finalizado o seu desenvolvimento devido às razões apresentadas na Subsecção 5.1.1. Como tal, foram realizados todos os testes da arquitetura modular e respetivos mEX com o módulo “Raspberry PI”, que tem capacidades idênticas às do mPP apresentado, mas não é preparado para a aplicação industrial.

Os módulos de expansão específicos presentes no sistema modular, mSE e mSV, vão de encontro à arquitetura estudada na Subsecção 2.3.2. Os mEX permitem a recolha de sinais de campo através de sensores, o condicionamento do sinal e a conversão do sinal analógico para digital. Para além disso, estes permitem a comunicação através de

um barramento com o mPP. Assim, cumpriu-se o objetivo principal dos mEX que é a aquisição de sinais de campo e transmissão dos mesmos para o mPP. Os módulos foram desenvolvidos, estruturados e testados com o *casing* adequado para a aplicação industrial.

O mSE foi testado com a arquitetura modular desenvolvida, mas em laboratório, para a leitura dos sinais de alimentação. Este ambiente assemelha-se ao ambiente industrial também com a alimentação trifásica de motores presentes na indústria. O teste efetuado permitiu a recolha de dados e a validação deste módulo, verificando-se o correto funcionamento com os dados obtidos na faixa de tensão admissível pelo ADC, a correta transmissão dos mesmos para o módulo principal e, conseqüentemente, a correta leitura dos valores reais de tensão e corrente. Os dados recolhidos pelo mSE foram utilizados para a aplicação do caso de estudo da inteligência computacional sobre a desagregação de cargas. Neste caso de estudo validam-se os dados recolhidos pelo mSE e o processamento destes dados para recolha de *features* para efetuar a desagregação de cargas. As *features* recolhidas neste caso de estudo permitiram a desagregação das cargas através deste módulo, evidenciando as vantagens na sua aplicação.

O mSV foi também testado com a arquitetura modular desenvolvida, mas em ambiente industrial, com a recolha de sinais de vibração do moinho de cimento da empresa CIMPOR. Para a recolha de sinais de vibração do moinho de cimento foi desenvolvido o sensor de vibração com um acelerómetro e *casing* adequado para a sua fácil aplicação industrial (ímã e caixa para proteção de poeiras). Através do sensor de vibração e da arquitetura modular com o mSV incorporado, foi feita a recolha de dados que permitiu a validação deste módulo e do sensor de vibração. Verificou-se que os dados recolhidos estão na faixa admissível pelo ADC e que foi feita a correta transmissão dos mesmos para o mPP. Foi observado, por peritos da empresa, que os dados estavam no intervalo de valores esperado. Os dados recolhidos permitiram a resolução do caso de estudo para a determinação do nível de enchimento de moinhos.

Através dos resultados obtidos, evidencia-se o bom desempenho da arquitetura modular, para a implementação na indústria, e dos módulos de expansão constituintes na aquisição de sinais elétricos e de vibração. Neste projeto é demonstrada a versatilidade deste sistema modular para novas aplicações e o processamento de sinais para a recolha de informação. Este sistema modular tem uma importante contribuição para o desenvolvimento de sistemas modulares desenhados para a aplicação industrial. Neste projeto é também apresentado um estudo sobre métodos de recolha de sinais elétricos e de vibração de campo na indústria, seguindo o respetivo tratamento dos mesmos para se obter informações do processo.

Apesar dos resultados obtidos, o sistema modular requer execução de trabalhos futuros para a melhoria desta arquitetura de forma a cumprir objetivos definidos pelo projeto iProMo. O desenvolvimento do sistema modular e os resultados obtidos cumprem os requisitos e objetivos deste projeto. No entanto, não foi completado o objetivo de desenvolvimento do módulo principal de processamento, que será o trabalho futuro mais próximo a ser concretizado. Assim, para completar a arquitetura hardware modular final, é necessária a finalização do mPP, com as características e meios de proteção apresentados na Secção 3.3. Para isso proceder-se-á à construção do PCB e *casing* do mPP para a aplicação industrial. Este *casing* será idêntico aos módulos de expansão mas com um dissipador de calor para o arrefecimento mais facilitado do microprocessador incorporado no módulo. O mPP requer futuramente todos os testes necessários, idênticos aos mostrados neste projeto, de forma a validar o mesmo. Posteriormente, a arquitetura de hardware modular definida poderá ser testada em durante um largo período de tempo

e com restrições de tempo real.

Em relação aos mEX, é possível uma melhor otimização dos circuitos de condicionamento dos sinais pela diminuição do número de circuitos integrados utilizados e pela melhoria do seu isolamento galvânico, de igual forma ao mPP. Podem ser utilizados circuitos integrados para isolar os sinais SPI do meio exterior.

O melhoramento futuro da arquitetura modular com a passagem do processamento local para os módulos de expansão é um requisito do projeto iProMo. Isto possibilitará o processamento distribuído no sistema modular. Conforme indicado na introdução deste documento, o processamento nos mEX permitirá a otimização dos recursos necessários no módulo principal e conseqüentemente aumentará a eficiência na utilização de recursos. O processamento local nos mEX, poderá ser feito com a implementação de um FPGA (dispositivo lógico programável). O FPGA destaca-se pela sua velocidade na execução de tarefas. Isto proporcionará a gestão mais facilitada dos módulos, através da inclusão de circuitos integrados que poderão ser controlados pelo FPGA. Deste modo, possibilitará a incorporação de *chips* para a implementação de um novo protocolo de comunicação no sistema modular, como o EtherCAT. O EtherCAT fornece uma comunicação determinista em tempo real, permitindo obter uma comunicação extremamente rápida e sem perdas de informação na passagem de dados para o mPP após o processamento no mEX. Esta comunicação permitirá também um sistema modular otimizado, com um leque maior de aplicações para processamentos que requerem uma monitorização mais eficaz em termos de rapidez.

Bibliografia

- [1] Tie Qiu, Jiancheng Chi, Xiaobo Zhou, Zhaolong Ning, Mohammed Atiquzzaman, and Dapeng Oliver Wu. Edge computing in industrial internet of things: Architecture, advances and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4):2462–2488, 2020.
- [2] Jérôme Mendes, Ricardo Maia, Rui Araújo, and Francisco A. A. Souza. Self-evolving fuzzy controller composed of univariate fuzzy control rules. *Applied Sciences*, 10(17):5836, August 2020.
- [3] Wenliang Mao, Zhiwei Zhao, Zheng Chang, Geyong Min, and Weifeng Gao. Energy-efficient industrial internet of things: Overview and open issues. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(11):7225–7237, 2021.
- [4] Garima Nain, K.K. Pattanaik, and G.K. Sharma. Towards edge computing in intelligent manufacturing: Past, present and future. *Journal of Manufacturing Systems*, 62:588–611, 2022.
- [5] Sudip Misra, Chandana Roy, Thilo Sauter, Anandarup Mukherjee, and Jhareswar Maiti. Industrial internet of things for safety management applications: A survey. *IEEE Access*, 10:83415–83439, 2022.
- [6] Manuel Gonçalves, Pedro Sousa, Jérôme Mendes, Morad Danishvar, and Alireza Mousavi. Real-time event-driven learning in highly volatile systems: A case for embedded machine learning for scada systems. *IEEE Access*, 10:50794–50806, 2022.
- [7] Klaus Schwab. *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum, Geneva, 2016.
- [8] J. Pandremenos, J. Paralikas, K. Salonitis, and G. Chryssolouris. Modularity concepts for the automotive industry: A critical review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(3):148–152, 2009. Design Synthesis.
- [9] Jérôme Mendes, Rui Araújo, Pedro Sousa, Filipe Apóstolo, and Luís Alves. An architecture for adaptive fuzzy control in industrial environments. *Computers in Industry*, 62(3):364–373, April 2011.
- [10] Jay Lee, Hossein Davari, Jaskaran Singh, and Vibhor Pandhare. Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18:20–23, 2018.
- [11] Jérôme Mendes, Ricardo Maia, Rui Araújo, and Gonçalo Gouveia. Intelligent controller for industrial processes applied to a distributed two-tank system. In *Proc.*

- 1st IEEE International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I 2018)*, pages 39–43, Laguna Hills, California, USA, September 26-28 2018. IEEE.
- [12] Ricardo Silva Peres, Xiaodong Jia, Jay Lee, Keyi Sun, Armando Walter Colombo, and Jose Barata. Industrial artificial intelligence in industry 4.0 - systematic review, challenges and outlook. *IEEE Access*, 8:220121–220139, 2020.
- [13] Carlos Resende, Duarte Folgado, João Oliveira, Bernardo Franco, Waldir Moreira, Antonio Oliveira-Jr, Armando Cavaleiro, and Ricardo Carvalho. Tip4.0: Industrial internet of things platform for predictive maintenance. *Sensors*, 21(14), 2021.
- [14] Francisco Souza, Jérôme Mendes, and Rui Araújo. A regularized mixture of linear experts for quality prediction in multimode and multiphase industrial processes. *Applied Sciences*, 11(5):2040, February 2021.
- [15] Sabuzima Nayak, Ripon Patgiri, Lilapati Waikhom, and Arif Ahmed. A review on edge analytics: Issues, challenges, opportunities, promises, future directions, and applications. *ArXiv*, abs/2107.06835, 2021.
- [16] Library at AutomationDirect.com. History of the plc. <https://library.automationdirect.com/history-of-the-plc/>.
- [17] Ephrem Ryan Alphonsus and Mohammad Omar Abdullah. A review on the applications of programmable logic controllers (plcs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60:1185–1205, 2016.
- [18] Inc. Process Solutions. A brief history of programmable logic controllers (plcs). <https://processsolutions.com/a-brief-history-of-programmable-logic-controllers-plcs/>, 2020.
- [19] Bill Schweber. Programmable logic controllers, part 1: Basics and background. <https://www.microcontrollertips.com/programmable-logic-controllers-basics-and-background/>, 2019.
- [20] Bill Schweber. Programmable logic controllers, part 2: Evolution and history. <https://www.microcontrollertips.com/programmable-logic-controllers-evolution-history/>, 2019.
- [21] Raspberry PI. *Datasheet - Raspberry Pi 4 Model B*. Raspberry PI, June 2019.
- [22] Wikipedia. Raspberry pi. https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi, 2021.
- [23] Opto 22. *Data Sheet Digital I/o Carrier Board For Raspberry Pi*. Opto 22, 2020.
- [24] Embedded Micro Technology Ltd. Mypi industrial iot integrator board. <https://www.embeddedpi.com/integrator-board>, 2021.
- [25] Revolution PI. Revolution pi series. <https://revolutionpi.com/revolution-pi-series/>, 2021.
- [26] NI engineer Ambitiously. Compactrio systems. <https://www.ni.com/pt-pt/shop/compactrio.html>, 2021.

- [27] NI engineer Ambitiously. Compactdaq systems. <https://www.ni.com/pt-pt/shop/compactdaq.html>, 2021.
- [28] BECKHOFF. Embedded pcs for industrial control tasks. <https://www.beckhoff.com/en-en/products/ipc/embedded-pcs/>, 2022.
- [29] BECKHOFF. Fieldbus components for all common i/os and fieldbus systems. <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/>, 2022.
- [30] Chun Li, Jingjin Chen, and Mingbo Jiang. Research on application of embedded single chip computer intelligent control. In *2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, pages 588–591, 2020.
- [31] C. Herring. Microprocessors, microcontrollers, and systems in the new millennium. *IEEE Micro*, 20(6):45–51, 2000.
- [32] OLIMEX Ltd. *A64-OLinuXino QUICK START GUIDE*, volume 1. Olimex, 2017.
- [33] Community GITHUB. Olinuxino. <https://github.com/OLIMEX/OLINUXINO>, 2012-2019.
- [34] OLIMEX. A64-olinuxino. <https://www.olimex.com/Products/OLinuXino/A64/A64-OLinuXino/open-source-hardware>, 2012-2019.
- [35] BeagleBoard. Meet beagle: Open source computing. <https://beagleboard.org/>.
- [36] Martin Murin iMX6 REX-Robert Feranec. Openrex – open source hardware project. <https://www.imx6rex.com/open-rex/>.
- [37] FEDEVEL Academy. *Datasheet - iMX6 OpenRex Single Board Computer*, volume 1. VOIPAC TECHNOLOGIES, 2018.
- [38] VOIPAC TECHNOLOGIES.
- [39] Banana Pi team. Banana pi bpi-m2+ with allwinner h3 chip design. <https://www.banana-pi.org/banana-pi-sbcs/45.html>, 2022.
- [40] Banana Pi team. Banana pi bpi-m4 with realtek rt1395 chip design. <https://www.banana-pi.org/banana-pi-sbcs/22.html>, 2022.
- [41] CubieBoard. Cubieboard docs. <http://docs.cubieboard.org>, 2017.
- [42] SolidRun Ltd. *Datasheet - HummingBoard Base*, volume 1. SolidRun Ltd., 2019.
- [43] SolidRun Ltd. *Datasheet - HummingBoard Pro SBC*, volume 1. SolidRun Ltd., 2017.
- [44] V Nikolskiy and V Stegailov. Floating-point performance of ARM cores and their efficiency in classical molecular dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, 681:012049, feb 2016.
- [45] André Domingos Gomes. Contador de energia eléctrica trifásico. Master’s thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Novembro 2012.

- [46] Liu Xian-chun, Xiao Yu-ling, and Zhao Liang-qin. Design of three-phase multi-purpose standard electric energy meter. In *2011 International Conference on System science, Engineering design and Manufacturing informatization*, volume 1, pages 263–266, 2011.
- [47] Yan Xin, Chen Mingshuai, Li Xinyang, Zhang Hongwei, Sui Zongqiang, and Li Liwei. Research of three-phase high-voltage energy metering device. In *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, pages 5845–5848, 2017.
- [48] Explicatorium. Transformadores. <https://www.explicatorium.com/fisica/transformador.html>.
- [49] Luís Filipe Coelho da Silva Teixeira de Magalhães. Development and implementation of a dsp-based three-phase power quality measurement system. Master's thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, October 2014.
- [50] Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro. Desenvolvimento de plug com interface para medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- [51] Eng. Punaro Bley Adão de Oliveira. Transformador de corrente. <https://sites.google.com/site/punarobley/medidor-de-energia-eletrica>.
- [52] Luque Alfredo. Bobina de rogowski. https://pt.wikipedia.org/wiki/Bobina_de_Rogowski, 2018.
- [53] Débora Debiaze de Paula, Andreyana Sárila Ramos Ferreira, Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald, and Cláudio Dornelles Mello Júnior and Rodrigo Zelir Azzolin. Projeto experimental de uma placa de condicionamento de sinal para um sensor de corrente diferencial tipo bobina de rogowski. In *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2010.
- [54] UpKeep. Vibration sensor. <https://www.upkeep.com/learning/vibration-sensor>, 2019.
- [55] Mokka-Sensors. Sensores de vibracao para equipamentos rotativos. <https://www.mokka-sensors.com.br/2020/04/02/sensores-de-vibracao-mokka-sensors/>, 2019.
- [56] Steve Hanly. Vibration sensor types and where to buy them. <https://blog.endaq.com/vibration-sensor-types-and-where-to-buy-them>, 2017.
- [57] Yong Cao, Xiao Long Rong, Si Jie Shao, and Kai Ping He. Present situation and prospects of vibration sensors. In *2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, pages 515–518, 2012.
- [58] Alfonso Fernandez. Sensores de vibración e instrumentación de medida. <https://power-mi.com/es/content/sensores-de-vibracion-e-instrumentacion-de-medida>.
- [59] Carlos Collantes Rivero. Sensores de vibración mems. <https://power-mi.com/es/content/sensores-de-vibracion-mems-0>, 2018.

- [60] HBM Company. Y series universal strain gauges: Over 2,000 different types available. https://www.hbm.com/en/0364/strain-gauges-for-stress-analysis/?product_type_no=Y%20Series%20Strain%20Gauge:%20Wide%20Choice%20for%20Standard%20Applicati.
- [61] LLC Ahmed Alamin Associate Product Engineer Abracon. Common mode chokes basics and applications. <https://abracon.com/uploads/resources/Common-Mode-Chokes-Basics-and-Applications.pdf>, 2022.
- [62] Paul Scherz and Simon Monk. *Practical Eletronics for Inventors*, volume 4. MC Graw Hill Education0, 2016.
- [63] Tobias Funk and Bernhard Wicht. *Integrated Wide-Bandwidth Current Sensing*. Springer Cham, 01 2020.
- [64] LEM. Datasheet split core rogowski coil art series. https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/art-b22-dxxxxx_series.pdf, 2018.
- [65] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, and S. Hamid Nawab. *Signals & Systems (2nd Ed.)*. Prentice-Hall, Inc., USA, 1996.
- [66] Ahmed Zoha, Alexander Gluhak, Muhammad Ali Imran, and Sutharshan Rajasegarar. Non-intrusive load monitoring approaches for disaggregated energy sensing: A survey. *Sensors*, 12(12):16838–16866, 2012.
- [67] Michael Zeifman and Kurt Roth. Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57(1):76–84, 2011.
- [68] G.W. Hart. Nonintrusive appliance load monitoring. *Proceedings of the IEEE*, 80(12):1870–1891, 1992.
- [69] Chun-Nan Hsu, Hung-Ju Huang, and Stefan Dietrich. The annigma-wrapper approach to fast feature selection for neural nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 32(2):207–212, 2002.
- [70] Nojun Kwak and Chong-Ho Choi. Input feature selection for classification problems. *IEEE transactions on neural networks*, 13(1):143–159, 2002.
- [71] Nasrin Sadeghianpourhamami, Joeri Ruyssinck, Dirk Deschrijver, Tom Dhaene, and Chris Develder. Comprehensive feature selection for appliance classification in nilm. *Energy and Buildings*, 151:98–106, 2017.
- [72] A Longjun Wang, B Xiaomin Chen, C Gang Wang, and D Hua. Non-intrusive load monitoring algorithm based on features of v-i trajectory. *Electric Power Systems Research*, 157:134–144, 2018.
- [73] Taha Hassan, Fahad Javed, and Naveed Arshad. An empirical investigation of v-i trajectory based load signatures for non-intrusive load monitoring. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2):870–878, 2014.
- [74] Hsueh-Hsien Chang, Kun-Long Chen, Yuan-Pin Tsai, and Wei-Jen Lee. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(2):764–771, 2011.

- [75] Yi-Ching Su, Kuo-Lung Lian, and Hsueh-Hsien Chang. Feature selection of non-intrusive load monitoring system using stft and wavelet transform. In *2011 IEEE 8th international conference on e-business engineering*, pages 293–298. IEEE, 2011.
- [76] Aggelos S Bouhouras, Paschalis A Gkaidatzis, Evangelos Panagiotou, Nikolaos Poulakis, and Georgios C Christoforidis. A nilm algorithm with enhanced disaggregation scheme under harmonic current vectors. *Energy and Buildings*, 183:392–407, 2019.
- [77] Jian Liang, Simon K. K. Ng, Gail Kendall, and John W. M. Cheng. Load signature study—part i: Basic concept, structure, and methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2):551–560, 2010.
- [78] W.L. Chan, A.T.P. So, and L.L. Lai. Harmonics load signature recognition by wavelets transforms. In *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No.00EX382)*, pages 666–671, 2000.
- [79] Aggelos S. Bouhouras, Mihalis Vaggos, Nikolaos Poulakis, and Georgios C. Christoforidis. Load signatures enhancement via odd-order harmonic currents. In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pages 1–6, 2016.
- [80] Thi-Thu-Huong Le, Hyoeun Kang, and Howon Kim. Household appliance classification using lower odd-numbered harmonics and the bagging decision tree. *IEEE Access*, 8:55937–55952, 2020.
- [81] Eleftherios P Loukas, Klajdi Bodurri, Panagiotis Evangelopoulos, Aggelos S Bouhouras, Nikolay Poulakis, Giorgos C Christoforidis, Ioannis Panapakidis, and Konstantinos Ch Chatzisavvas. A machine learning approach for nilm based on odd harmonic current vectors. In *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [82] Maher Azaza and Fredrik Wallin. Evaluation of classification methodologies and features selection from smart meter data. *Energy Procedia*, 142:2250–2256, 2017.
- [83] Jian Liang, Simon K. K. Ng, Gail Kendall, and John W. M. Cheng. Load signature study—part ii: Disaggregation framework, simulation, and applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2):561–569, 2010.
- [84] Oncontrol Technologies. Project SIICEI: technical-scientific report. Technical report, Oncontrol Technologies University of Coimbra, Coimbra, July 2021.
- [85] Marisa Figueiredo, Ana De Almeida, and Bernardete Ribeiro. Home electrical signal disaggregation for non-intrusive load monitoring (nilm) systems. *Neurocomputing*, 96:66–73, 2012.
- [86] Stephen Makonin, Fred Popowich, Lyn Bartram, Bob Gill, and Ivan V Bajić. Ampds: A public dataset for load disaggregation and eco-feedback research. In *2013 IEEE electrical power & energy conference*, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [87] João Gama, Márcia Oliveira, Ana Carolina Lorena, Katti Faceli, and André Ponce de Leon Carvalho. *Extração de Conhecimento de Dados*. Edições Sílabo, 2012.

- [88] Songling Cao and R Russell Rhinehart. An efficient method for on-line identification of steady state. *Journal of Process Control*, 5(6):363–374, 1995.
- [89] gunt. Ce 245 ball mill. <https://www.gunt.de/en/products/ball-mill/083.24500/ce245/g1ct-1:pa-148:pr-18>, 2022.
- [90] Jorge Nocedal and Stephen J Wright. *Numerical optimization*. Springer, 1999.
- [91] Gangquan Si, Hui Cao, Yanbin Zhang, and Lixin Jia. Experimental investigation of load behaviour of an industrial scale tumbling mill using noise and vibration signature techniques. *Minerals Engineering*, 22(15):1289–1298, 2009.
- [92] Jian Tang, Li-jie Zhao, Jun-wu Zhou, Heng Yue, and Tian-you Chai. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell. *Minerals Engineering*, 23(9):720–730, 2010.
- [93] Zhi-gang Su, Pei-hong Wang, and Xiang-jun Yu. Immune genetic algorithm-based adaptive evidential model for estimating unmeasured parameter: Estimating levels of coal powder filling in ball mill. *Expert Systems with Applications*, 37(7):5246–5258, 2010.
- [94] Peng Huang, Minping Jia, and Binglin Zhong. A study on the technique of measuring the fill level based on the vibration signal of the ball mill shell. In *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, volume 6, pages 202–206. IEEE, 2009.
- [95] Karl S Gugel and Rodney M Moon. Automated mill control using vibration signal processing. In *2007 IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, pages 17–25. IEEE, 2007.
- [96] Karl Gugel, Gerardo Palacios, Jamie Ramirez, and M Parra. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing (dsp) technology. In *Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003*, pages 311–318. IEEE, 2003.
- [97] Peng Huang, Min-ping Jia, and Bing-lin Zhong. Investigation on measuring the fill level of an industrial ball mill based on the vibration characteristics of the mill shell. *Minerals Engineering*, 22(14):1200–1208, 2009.
- [98] Zhi-gang Su, Pei-hong Wang, Xiang-jun Yu, and Zhen-zhong Lv. Experimental investigation of vibration signal of an industrial tubular ball mill: Monitoring and diagnosing. *Minerals engineering*, 21(10):699–710, 2008.
- [99] Jian Tang, Yi Kan, Zhuo Liu, and Tianyou Chai. Modeling load parameters of ball mill using frequency spectral features based on hilbert vibration decomposition. In *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, pages 1055–1060. IEEE, 2014.
- [100] Jianquan Shi, Gangquan Si, Shuiwang Li, Babajide Oresanya, and Yanbin Zhang. Feature extraction based on the fractional fourier transform for vibration signals with application to measuring the load of a tumbling mill. *Control Engineering Practice*, 84:238–246, 2019.

- [101] Dilip Kumar Nayak, Debi Prasad Das, Santosh Kumar Behera, and Sarada Prasad Das. Monitoring the fill level of a ball mill using vibration sensing and artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 32(5):1501–1511, 2020.
- [102] Phoenix Contact. Caixas eletrônicas modulares ics para aplicações iot. <https://www.phoenixcontact.com/pt-br/produtos/caixas-de-montagem-para-eletronica/caixas-eletronicas-modulares-ics#ex-content-transclusion-snippet--283>, 2022.
- [103] Nico JD Nagelkerke et al. A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*, 78(3):691–692, 1991.
- [104] Marilyn Wolf. *Computer As Components - Principles of Embedded Computing System Design*, volume Third Edition. Elsevier, 2012.
- [105] Adnan Aqeel. Introduction to microcontrollers. <https://www.theengineeringprojects.com/2018/03/introduction-to-microcontrollers.html>, 2018.
- [106] D. Li, Chongquan Zhong, Xiaofeng Yuan, Li Zhang, and Liqian Zhang. Study on embedded equipment web monitoring and control based on industrial ethernet. In *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, volume 1, pages 4600–4603, 2006.
- [107] LOUIS E. FRENZEL Jr. *Handbook of SERIAL COMMUNICATIONS INTERFACES*. Newnes, 2016.
- [108] José Mauricio S. Pinheiro. *Apostila do Curso de Tecnologia de Redes de Computadores*. UGB/FERP, 2003.
- [109] JOHN S RINALDI. Ethercat vs. ethernet/ip. <https://www.rtautomation.com/rtas-blog/ethercat-vs-ethernet-ip/>, 2019.
- [110] Gianluca Cena, Ivan Cibrario Bertolotti, Stefano Scanzio, Adriano Valenzano, and Claudio Zunino. On the accuracy of the distributed clock mechanism in ethercat. In *2010 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems Proceedings*, pages 43–52, 2010.
- [111] Chang-le Zhong, Zhen Zhu, and Ren-Gen Huang. On the use of a full stack hardware/software infrastructure for sensor data fusion and fault prediction in industry 4.0. In *Pattern Recognition Letters*, volume 138, pages 30–37, 2020.
- [112] Chang-le Zhong, Zhen Zhu, and Ren-Gen Huang. Study on the iot architecture and access technology. In *2017 16th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science (DCABES)*, pages 113–116, 2017.
- [113] Ju Ren Hui Guo, Deyu Zhang, Yaoxue Zhang, and Junying Hu. A scalable and manageable iot architecture based on transparent computing. In *Journal of Parallel and Distributed Computing*, volume 118 Part 1, pages 5–13, 2018.

Apêndice A

Módulo principal de processamento

A.1 Arquitetura

Neste apêndice é feito o estudo da arquitetura do módulo principal de processamento que teve como base as seguintes fontes: [104] [105]. Este apresenta, geralmente, a seguinte arquitetura:

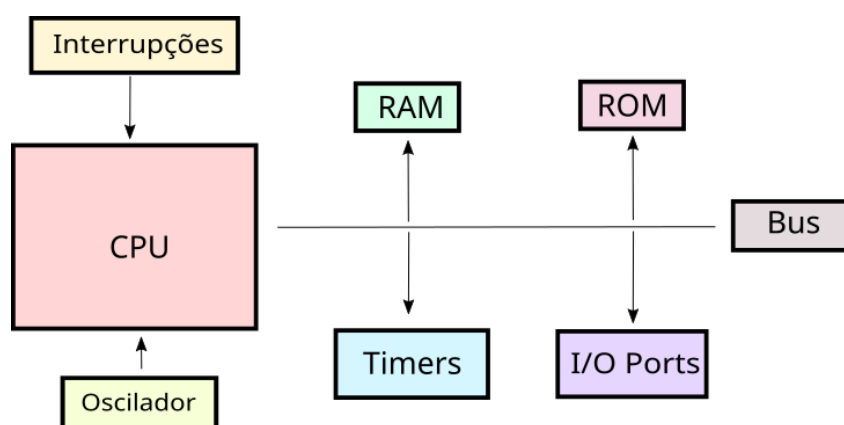


Figura A.1: Arquitetura do módulo principal de processamento

- O **CPU** é a unidade central de processamento, responsável por receber e executar instruções, podendo possuir um processador CISC ou RISC. O processador CISC executa instruções complexas que exigem vários ciclos de relógio para serem executadas, enquanto o processador RISC executa instruções simples num ciclo de relógio, executando instruções combinadas com maior rapidez. Rapidamente os microprocessadores RISC passaram a ser a CPU mais utilizado nestes módulos, como poderá ver na Subsecção 2.3.1. Estes destacam-se pelas seguintes características: a sua frequência máxima de operação, tamanho do seus registos (8, 16, 32 e 64 bits) e o número de núcleos de processamento, onde o aumento do número de núcleos num microprocessador aumenta a capacidade de executar tarefas, levando a um melhor desempenho.
- As memórias **ROM** ou **FLASH** são memórias não voláteis, ou seja não há perda de dados ao ficarem sem energia, e normalmente são usadas para guardar códigos de *boot* do sistema operativo.

- A memória **RAM**, memória volátil, é usada para armazenar dados em operações. Os dados desta memória são facilmente eliminados, sendo possível apagar esta memória usando programação. Esta memória apresenta um acesso rápido quando comparado com a memória **ROM**. Quanto maior a RAM mais tarefas podem ser executadas e mais dados podem ser armazenados com acesso rápido por parte do processador.
- Possui várias **portas de entrada e saída de pinos digitais e analógicos**, que são usados para a ligação de outros módulos ou dispositivos externos, permitindo a comunicação.
- Os **relógios** (“**timers**”), usados na sincronização do microprocessador/CPU na realização de tarefas.
- O **bus** é responsável pela comunicação do CPU com todos os outros componentes do módulo. Ao módulo está associado um *control bus* que é o responsável por gerir a comunicação.
- As **interrupções**, aplicadas em cenários urgentes, são utilizadas para interromper uma tarefa presente no microprocessador/CPU e executar a tarefa associada.
- O **oscilador**, tem como função servir de relógio/*clock* do microprocessador/CPU para que as instruções sejam sincronizadas e executadas. Um oscilador de cristal é um tipo de oscilador comum.

A.2 Principais tipos de comunicação

O módulo principal de processamento com arquiteturas industriais, equivalente à referida na Secção A.1, é responsável pelo controlo e obtenção de dados dos módulos de expansão. A comunicação permite obter arquiteturas de sistemas importantes para o controlo em ambientes industriais, incluindo o seu acesso remoto, como podemos observar na Figura A.2. Esta arquitetura permite partilhar recursos e a comunicação de informações, o que desencadeia um controlo inteligente destes sistemas.

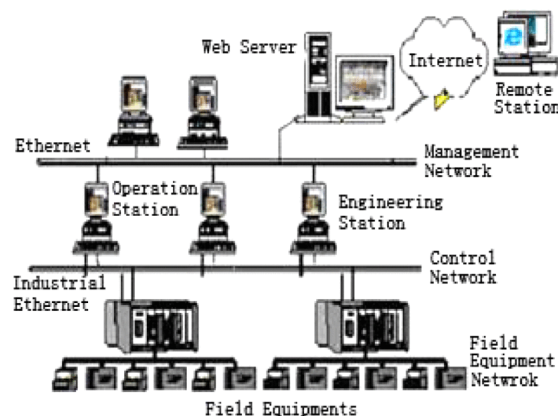


Figura A.2: Arquitetura da comunicação em ambientes industriais [106].

Arquiteturas com capacidades de comunicações complexas tornam a solução mais expansível, modular e adaptável.

Assim, foi feito o estudo dos diferentes protocolos de comunicação que podem ser usados na comunicação entre os módulos de expansão e o módulo principal:

- **UART** [104, 107] é um protocolo de comunicação serial usado na comunicação direta entre dois dispositivos, usando apenas dois fios na comunicação. O pino Tx para transmitir dados e o pino Rx para receber dados. Esta transmissão é feita de forma assíncrona pois não há sinal de *clock* para sincronizar a saída de bits. Para haver uma boa transmissão estes têm de funcionar em taxas de transmissão idênticas. As mensagens/*frames* são constituídas por um bit de início, um bit de paridade (para verificar erros na transmissão) e um bit final.

Apesar de ser um protocolo simples e amplamente utilizado, este não permite a comunicação com vários dispositivos mestres ou escravos e o tamanho da *frame* de dados é limitada.

- **I2C** [104, 107] é um protocolo de comunicação serial *half-duplex*, constituído por duas linhas de comunicação bidirecionais, a linha de *clock* (SCL) e a linha de dados (SDA). Existem dois modos de funcionamento, o modo mestre que é o dispositivo que gera o *clock* e inicia a comunicação com o dispositivo em modo escravo, e o modo escravo que recebe o *clock* e responde ao modo mestre. As mensagens/*frames* são constituídas por uma iniciação da comunicação, um bit de leitura ou escrita, um endereço do escravo, dados e uma condição de stop. Este protocolo é de complexidade e velocidade baixa na transmissão de dados.
- **SPI** [107] é um protocolo de comunicação serial *full-duplex* utilizado principalmente em curtas distâncias. Este faz a transferência de dados sem interrupção, onde os bits são enviados e recebidos num fluxo contínuo e não em *frames*. O protocolo é constituído também por um mestre e escravo, e por quatro linhas:
 - MOSI - Linha para o mestre enviar dados ao escravo.
 - MISO - Linha para o escravo enviar dados para o mestre.
 - SCLK – Linha para o sinal de *clock*.
 - SS/CS – Linha para o mestre selecionar para qual escravo enviar os dados.

Nesta topologia apenas existe um mestre por cada rede, e permite uma velocidade de transmissão de dados mais rápida que no protocolo I2C, apesar de haver um menor controlo na comunicação, não havendo bit de paridade e reconhecimento se os dados foram recebidos com sucesso.

- **Modbus RS232** [107] é usado em comunicações do tipo ponto a ponto, ou seja, um mestre e um escravo. A sua velocidade máxima ronda os 115 kbps e a distância máxima entre dispositivos é cerca de 30 metros.
- **Modbus RS485** [107], este padrão é muito utilizado na indústria. Permite ter um mestre e vários escravos na rede, permite trabalhar em taxas até 12 Mbps e alguns casos até 50 Mbps, estando a distância máxima da rede em cerca de 1200 metros. Este transmite a informação através de dois pinos como o Tx e Rx, mas normalmente denominados por A e B. Como este método também é assíncrono todos os dispositivos têm de estar na mesma taxa de transmissão (exemplo: *BaudRate* 9600).

Nos protocolos Modbus o mestre é que inicia a comunicação e solicita que os escravos enviem os dados. O protocolo de mensagens é constituído pelo endereço do dispositivo, código da função, dados e check de erros. O modo de transmissão dos bytes da mensagem, ou seja a forma com a informação da mensagem será empacotada e desempacotada, é realizado através do modo RTU ou ASCII.

- **Ethernet TCP/IP** [104, 108], é um protocolo de comunicação que gere como os dispositivos se comunicam numa rede local (LAN). Este protocolo é implementado nas duas primeiras camadas do modelo Open Systems Interconnection (OSI) — a camada Física e a camada de Dados — que lidam com a estrutura física da rede e os meios pelos quais os dispositivos de rede podem enviar informações de um dispositivo para outro. No entanto, a Ethernet divide a camada de Dados em duas camadas separadas, conhecidas como camada de controlo de link lógico (LLC), usado para o controlo do fluxo e de erros, e a camada de controlo de acesso ao meio (MAC), que controla a transmissão, a receção e atua diretamente com o meio físico. O meio físico consiste em hardware usado para transporte de sinais e componentes de sinalização, que consistem em receber e enviar sinais para os dispositivos eletrónicos, que pode ser constituído por fibra óptica ou fios de cobre.

A velocidade de transmissão de dados na Ethernet pode ter tipicamente três velocidades: 10 Mbps, 100 Mbps e 1Gbps. Neste protocolo verificamos o aumento significativo da velocidade da rede em relação aos protocolos anteriores. Este é um protocolo de baixo custo, tem uma maior disponibilidade de dados e a configuração, suporte e manutenção podem ser feitos remotamente, graças ao suporte da internet, o que leva à melhoria dos custos operacionais e a eficiência com recursos fáceis de usar.

- **EtherCAT** [109, 110], assim como o Ethernet TCP/IP, é construído na camada física Ethernet. Em vez de usar TCP/IP para transporte e roteamento de mensagens, o EtherCAT usa uma abordagem de “processamento em tempo real”. Nesta abordagem, o mestre EtherCAT envia um pacote de dados (ver FiguraA.3) que passa por cada nó/escravo, (normalmente um drive ou dispositivo de E/S) .

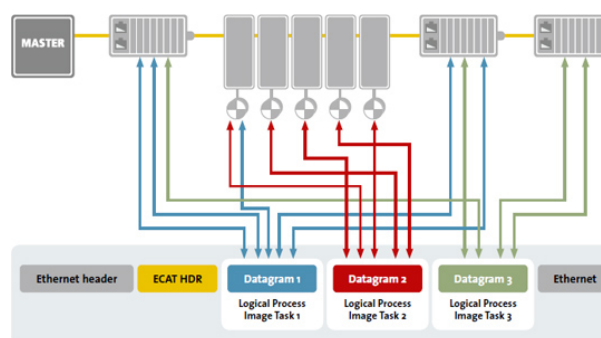


Figura A.3: Pacote de dados EtherCAT.

Os escravos em rede podem ler ou extrair apenas as informações relevantes de que precisam do pacote de dados ou adicionar dados antes de viajar para o próximo escravo. Ou seja, a frame/pacote de dados percorre todos os escravos/nós da rede e depois retorna para o dispositivo mestre. Tal representa um recurso exclusivo do EtherCAT, fornecendo comunicação determinística em tempo real e extremamente rápida.

Apêndice B

Arquiteturas IoT hardware/software

Neste apêndice é feito o estudo de possíveis arquiteturas de hardware e software na indústria que permitam gerir e processar os dados num ambiente industrial. As arquiteturas de IoT apresentadas de seguida vão de encontro às arquiteturas apresentadas na Secção 2.3, podendo ser implementadas no sistema modular a ser desenvolvido neste projeto.

As arquiteturas IoT foram projetadas com o objetivo serem capazes de se adaptar independentemente do número de sensores e, inicialmente, a sua arquitetura era composta por 3 camadas (Figura B.1):

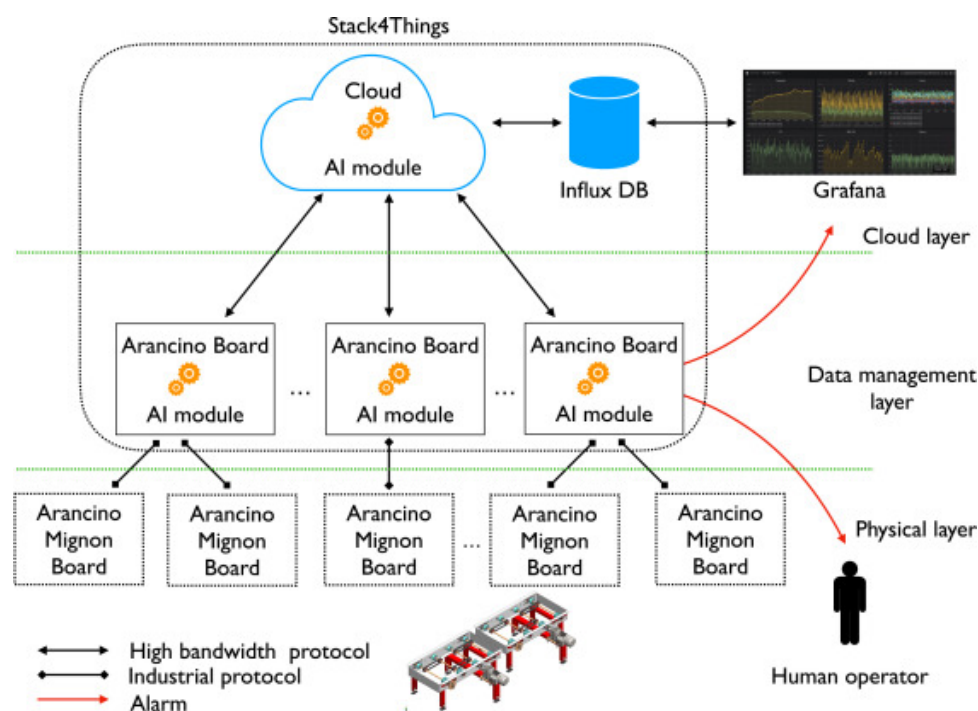


Figura B.1: Arquitetura IoT de 3 camadas [111].

- A **camada física ou de percepção** é a mais próxima da planta industrial, sendo constituída por sensores e circuitos de condicionamento de sinal.
- A **camada de dados ou de rede** é a camada intermédia, podendo ser chamada de camada de transmissão. A camada de rede transfere as informações obtidas pela

camada de percepção para a camada de aplicação de forma segura, rápida e confiável, alcançando a troca de comunicação entre a camada de percepção e a camada de aplicação através de várias redes.

- A **camada de nuvem ou de aplicação** é responsável pela análise de dados e prevenção de falhas. A aplicação é responsável por armazenar dados e permitir o acesso aos mesmos através de acesso remoto.

Esta implementação da arquitetura de 3 camadas pode ser observada nos artigos [112] e [111].

Na implementação IoT, a camada de rede tem um papel importante pois sem ela não é possível aceder aos dados e ter percepção do funcionamento do sistema na camada de aplicação. Tornou-se então necessária a divisão da camada de rede em duas camadas, surgindo a arquitetura IoT de 4 camadas [112]:

- A **camada de acesso** adquire e permite o acesso aos dados obtidos dos sensores.
- A **camada de transmissão** é responsável pela transmissão dos dados de forma confiável.

A camada de aplicativo foi também dividida em duas camadas, dando origem à arquitetura IoT de 5 camadas [112]:

- A **camada de suporte** é responsável pelo armazenamento dos dados e pela sua análise.
- A **camada de apresentação** é responsável pela apresentação da aplicação a nível do seu design gráfico.

No artigo [113], é apresentada uma arquitetura IoT que tem como objetivo centralizar e tornar eficiente os recursos utilizados, e que permita criar aplicativos de controlo da rede. É proposta uma arquitetura com 5 camadas (Figura B.2) que foi construída com base numa arquitetura de três, utilizando-se a computação transparente de forma a combater o uso de recursos IoT heterogéneos:

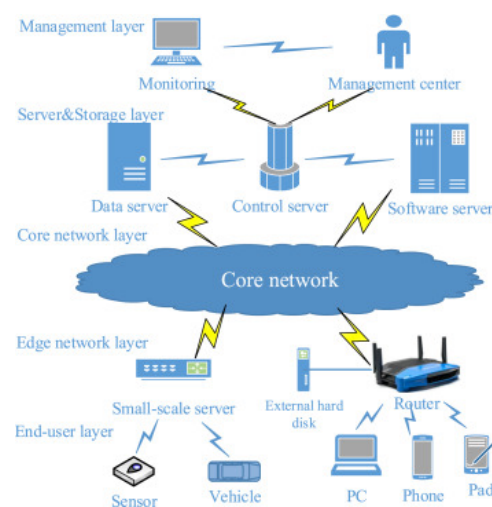


Figura B.2: Arquitetura IoT de 5 camadas [113].

- A **camada do utilizador** (End-user layer) é constituída pelos dispositivos IoT (sensores).
- A **camada de rede** (Edge network layer) guarda os dados processados pelo utilizador que vai enviar os dados para a camada de rede principal.
- A **camada de rede principal** (core network layer) faz a comunicação com a camada de armazenamento e é composta por uma variedade de métodos de comunicação.
- A **camada de serviço e armazenamento** (Server&Storage layer) é utilizada para o armazenamento de dados em que esta pode ser controlada pela camada de controlo.
- A **camada de controlo** (Management layer) permite gerir as tarefas atribuídas ao servidor de controlo, através da camada de serviço.

Esta é uma arquitetura de 5 camadas que vai de encontro à anterior descrita de 3 camadas, tendo algumas diferenças na organização das camadas da arquitetura.

Conclusões

Podemos observar que a arquitetura IoT está a ser uma tecnologia promissora e em rápida evolução. As arquiteturas apresentadas tornam mais eficientes os sistemas modulares no seu funcionamento, sendo importante para estabelecer um relacionamento eficiente entre o hardware e software, o que vai de encontro aos objetivos deste projeto.

Apêndice C

Esquemático do módulo principal de processamento

Neste apêndice apresenta-se o esquemático do módulo principal de processamento, desenvolvido na aplicação Kicad, baseado no microprocessador MCIMX6D5EYM10AE. O esquemático apresenta a seguinte organização:

- Página 89 - Arquitetura geral com os seus periféricos e organização respetiva do esquemático.
- Página 90 - Alimentação do CPU proveniente do PMIC e as saídas providenciadas pelo CPU para alimentação de outros pontos do microprocessador na utilização de periféricos.
- Página 91 - Apresenta as ligações entre as memórias RAM (1 GB) e o microprocessador.
- Página 92 - Apresenta a implementação do PMIC principal do microprocessador que é alimentado externamente e providencia todas as alimentações necessárias para o microprocessador.
- Página 93 - Apresenta a alimentação de entrada proveniente da fonte externa 24 VDC e respetivos meios de proteção: proteção e filtragem de alimentação externa, e proteção de entrada para sobretensões.
- Página 94 - Apresenta as ligações entre o microprocessador e o conector USB.
- Página 95 - Apresenta as ligações entre o microprocessador, o chip Ethernet e o conector Ethernet.
- Página 96 - Apresenta as ligações entre o microprocessador, o circuito integrado intermédio de proteção ESD e o conector HDMI.
- Página 97 - Apresenta as ligações entre o microprocessador e o conector SATA.
- Página 98 - Apresenta as ligações entre o microprocessador e o conector para cartão SD.
- Página 99 - Apresenta as ligações entre o microprocessador, os circuitos integrados para isolamento galvânico e conector para comunicação por SPI com os módulos de expansão.

-
- Página 100 - Apresenta as ligações entre o microprocessador e as memórias ROM & Flash.
 - Página 101 - Apresenta as ligações entre o microprocessador e os osciladores necessários para o desenvolvimento, as ligações JTAG para a possibilidade de *debug* do módulo, o circuito de *Reset* do módulo e a configuração do modo de inicialização da placa.
 - Página 102 - Apresenta os restantes pinos não usados do microprocessador, que podem ser utilizados para a incorporação de outros periféricos.

Esquemático Inicial

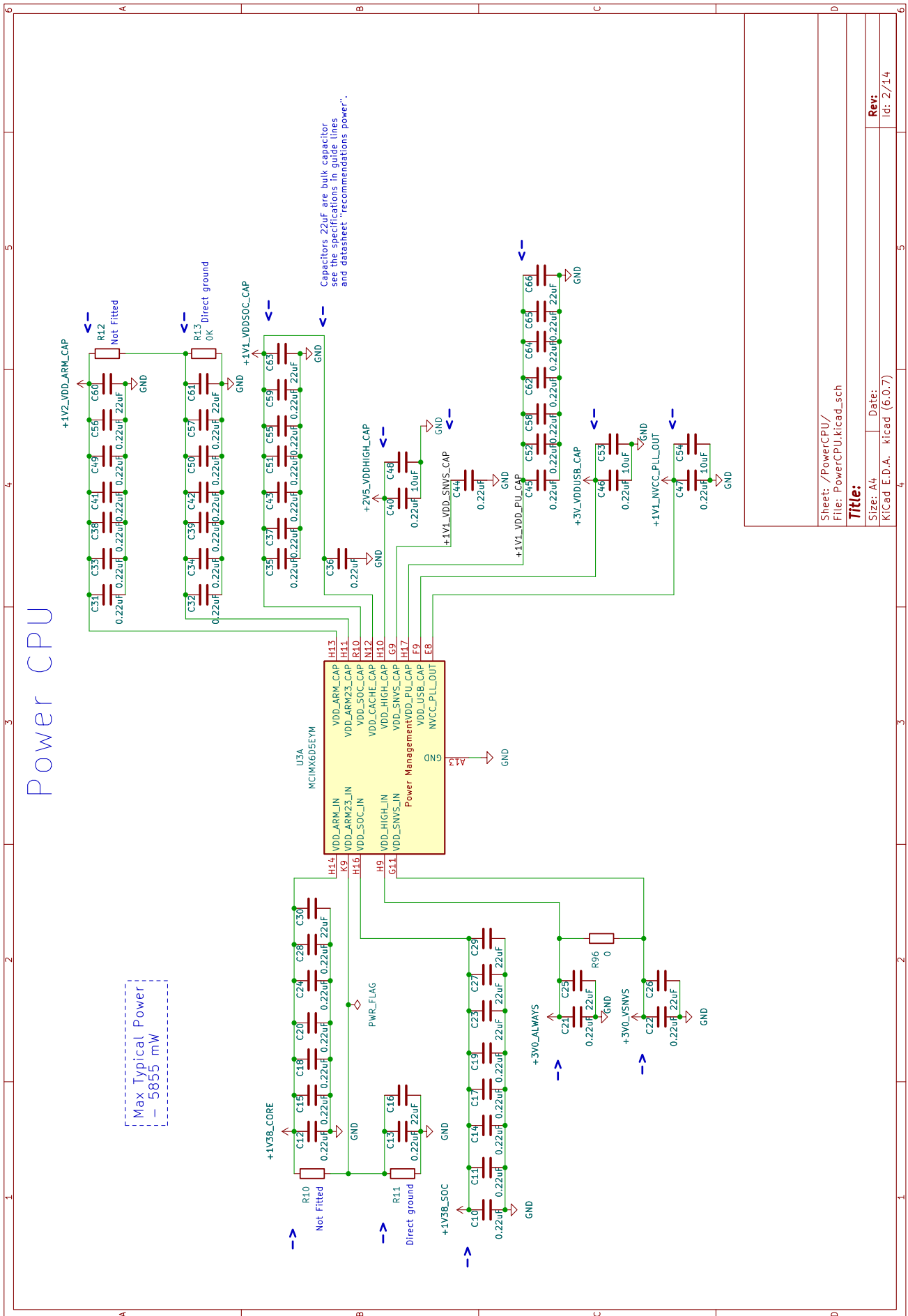
PowerCPU	page 2
File: PowerCPU.kicad_sch	
DDR3_MEM	page 3
File: DDR3_MEM.kicad_sch	
PowerPMIC	page 4
File: PowerPMIC.kicad_sch	
PowerIN	page 5
File: PowerIN.kicad_sch	
USB	page 6
File: USB.kicad_sch	
Ethernet	page 7
File: ethernet.kicad_sch	
HDMI	page 8
File: HDMI.kicad_sch	



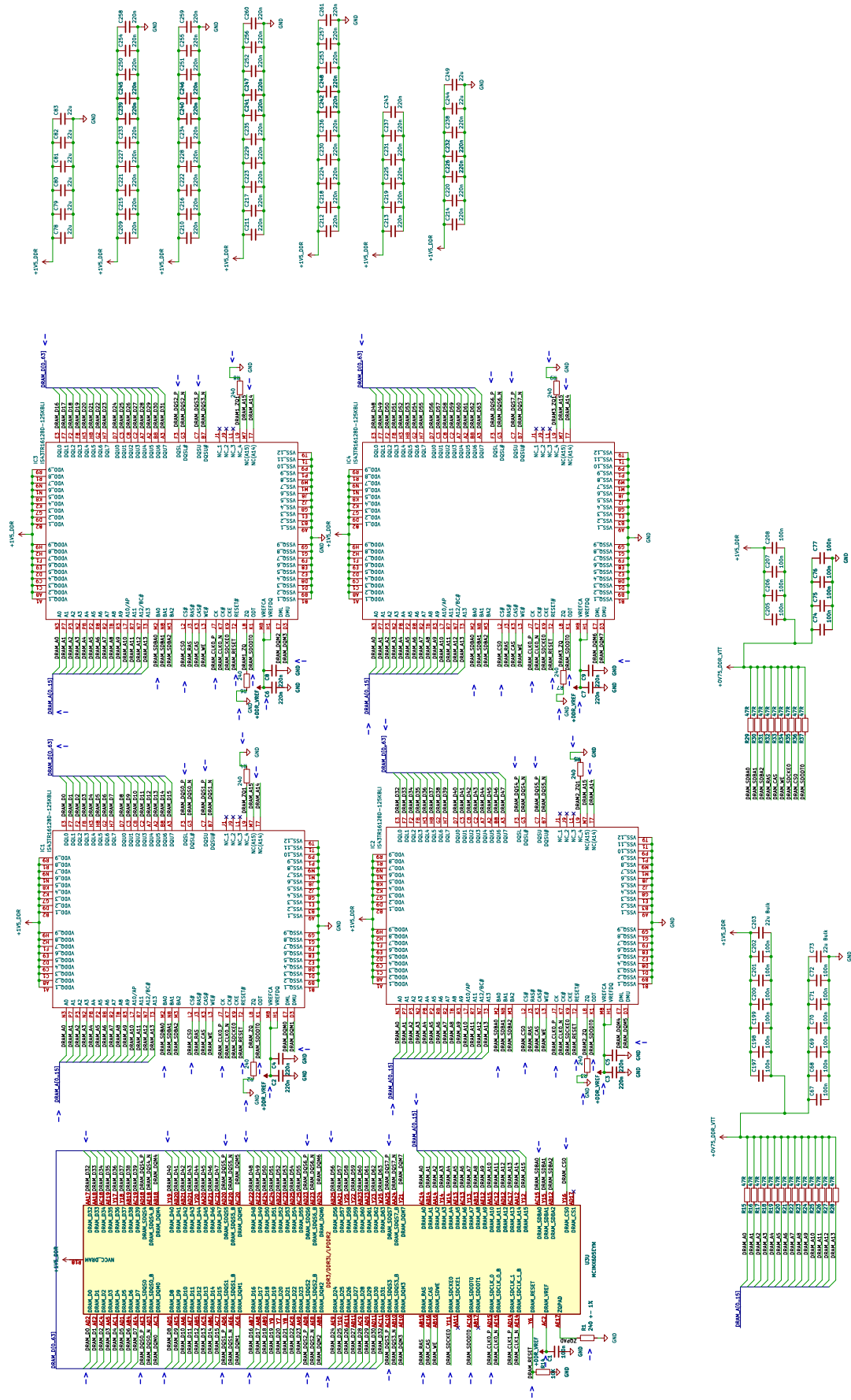
SATA	page 9
File: SATA.kicad_sch	
SDCard	page 10
File: SDCard.kicad_sch	
SPI	page 11
File: SPI.kicad_sch	
EEPROM&FLASH	page 12
File: EEPROM&FLASH.kicad_sch	
Control&JTAG	page 13
File: Control&JTAG.kicad_sch	
PinsUnused	page 14
File: PinsUnused.kicad_sch	

Sheet: /
 File: ModuloTSE.kicad_sch
Title:
 Size: A4 Date:
 KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
 Id: 1/14

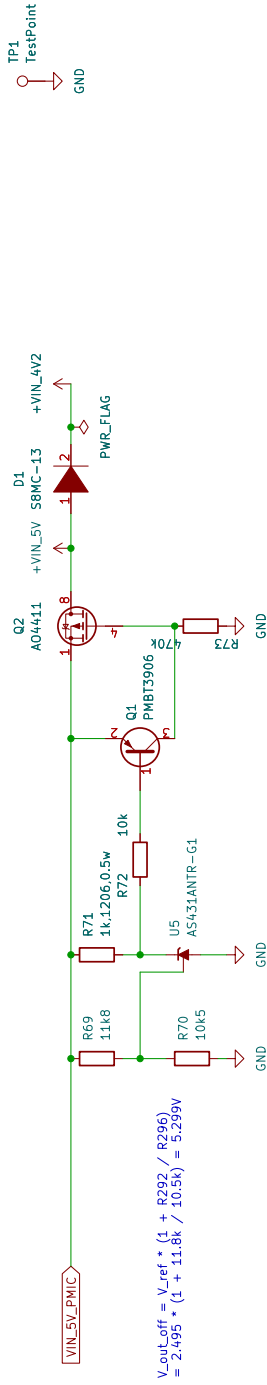
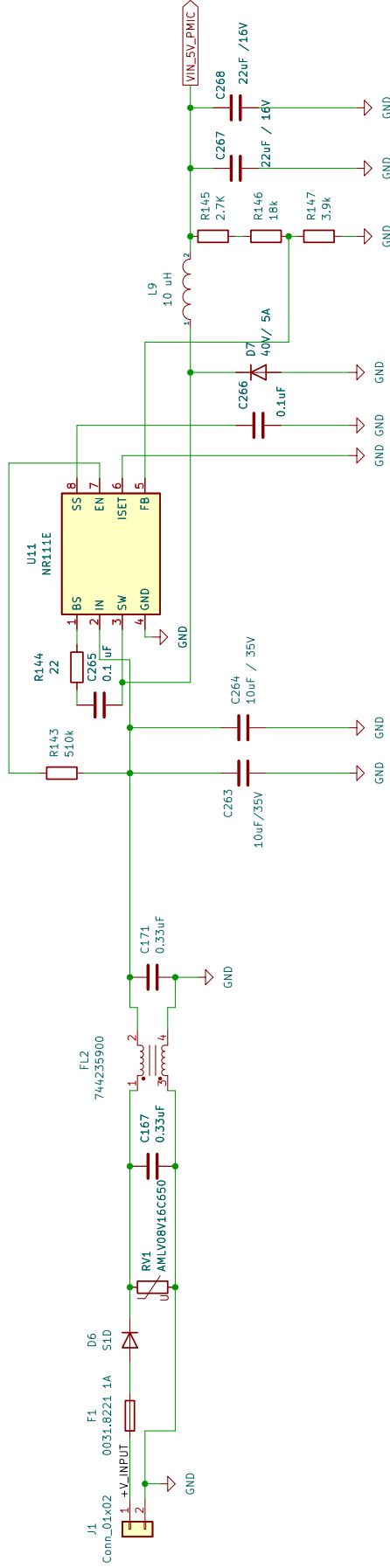


RAM Memory



Sheet: 009/009	Date:
File: 009/009	Draw:
Project: 009/009	Rev: (00.0)
Rev: 1/14	

Power IN



$$V_{out_off} = V_{ref} * (1 + R292 / R296)$$

$$= 2.495 * (1 + 11.8k / 10.5k) = 5.239V$$

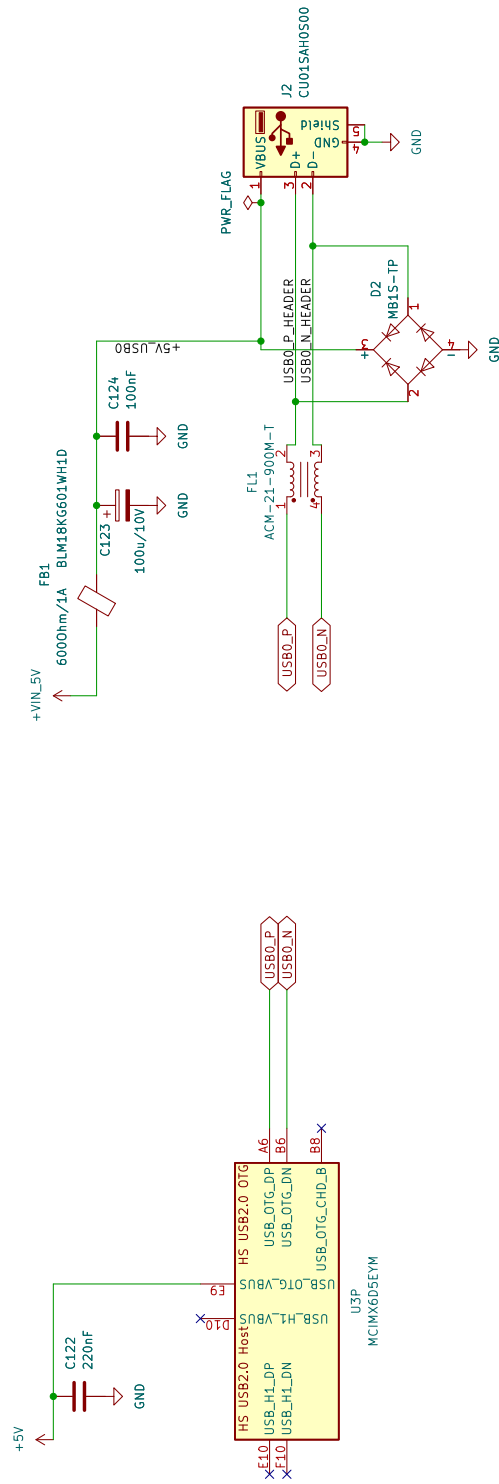
Sheet: PowerIN/
File: PowerIN.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 5/14

USB



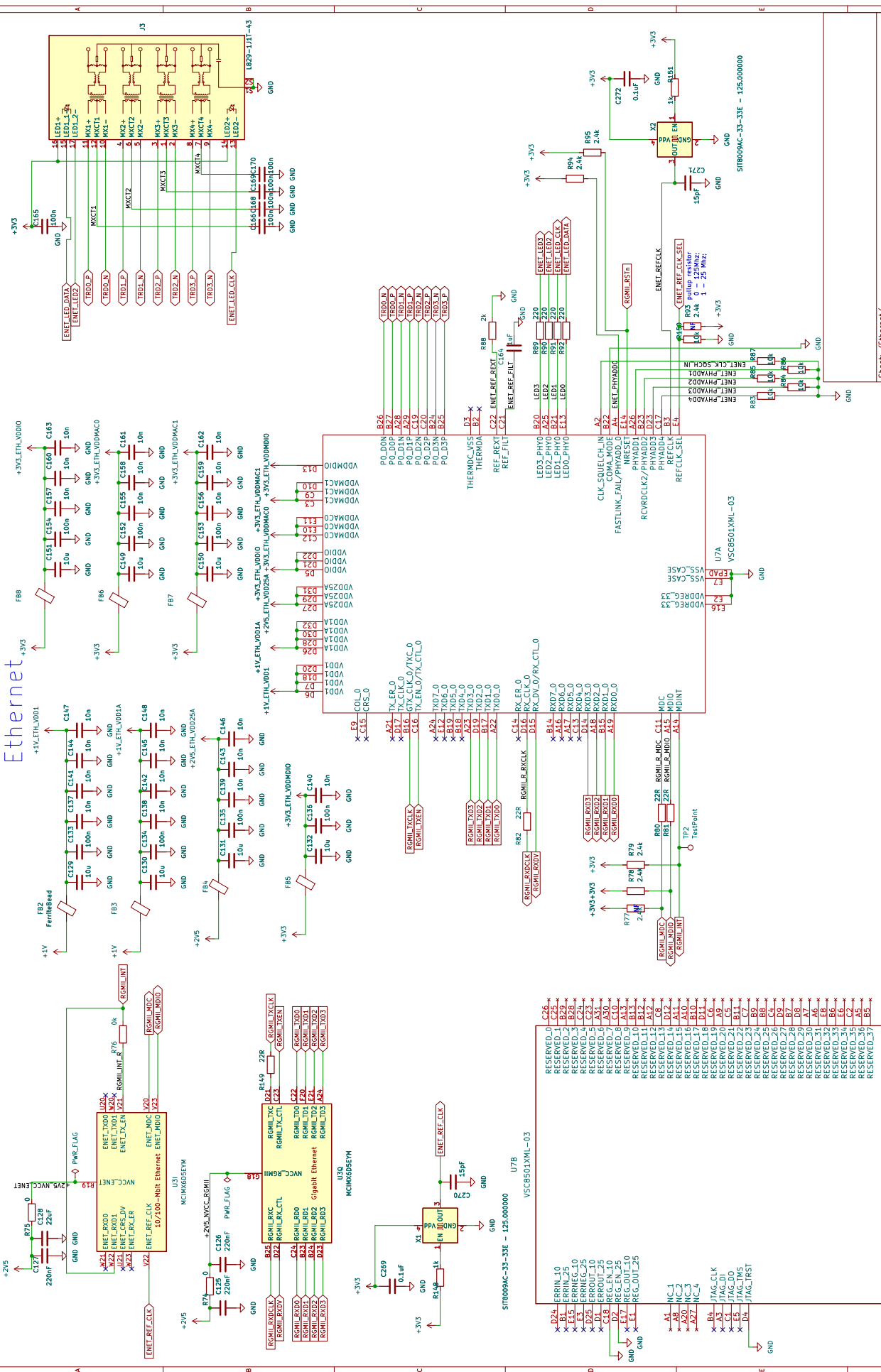
Sheet: /USB/
File: USB.kicad_sch

Title:

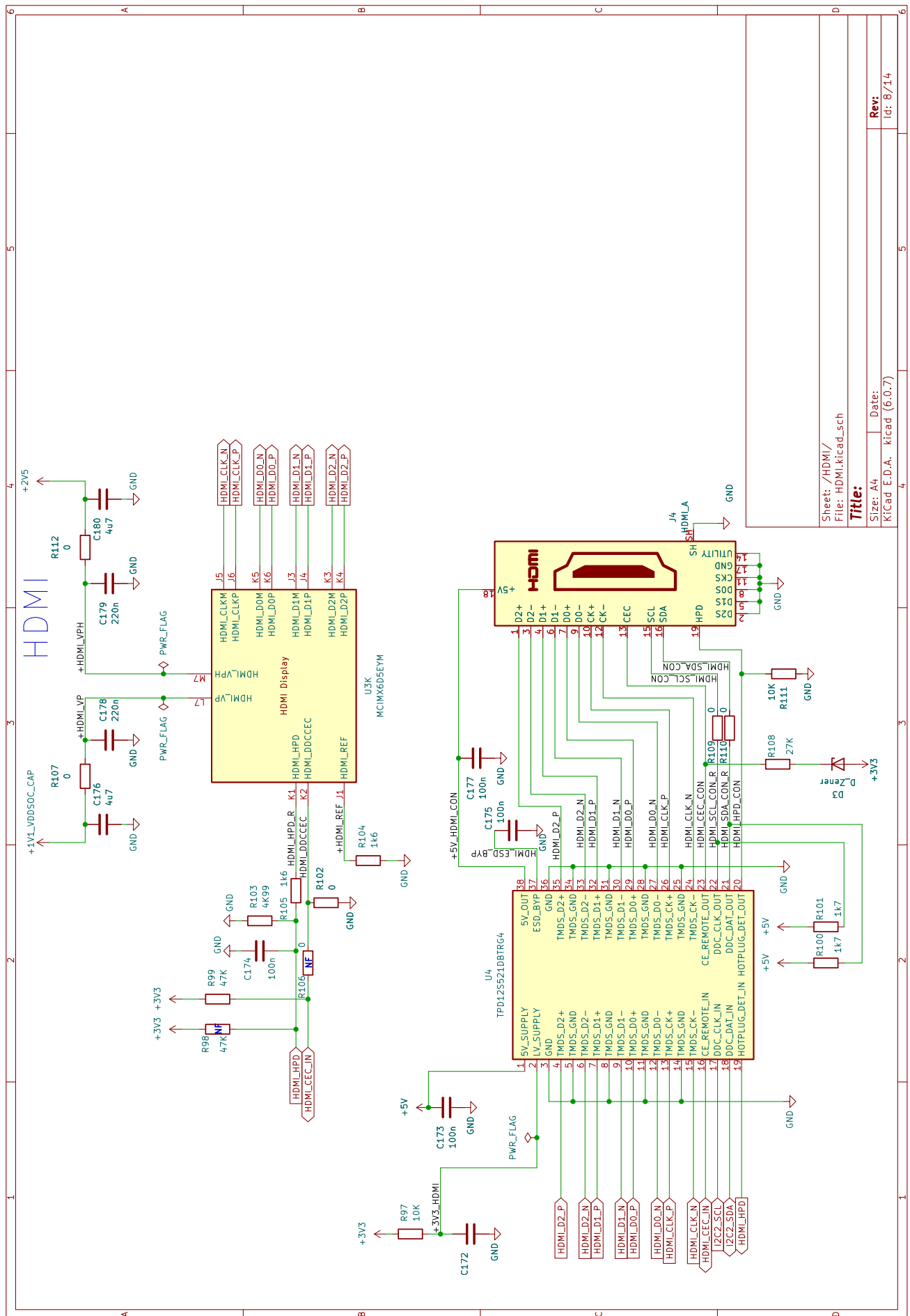
Size: A4 Date:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 6/14

Ethernet



Sheet: /Ethernet/
 File: ethernet.kicad_sch
 Title:
 Size: A3
 Date:
 Kicad E.D.A. kicad (6.0.7)
 Rev:
 06/7/14



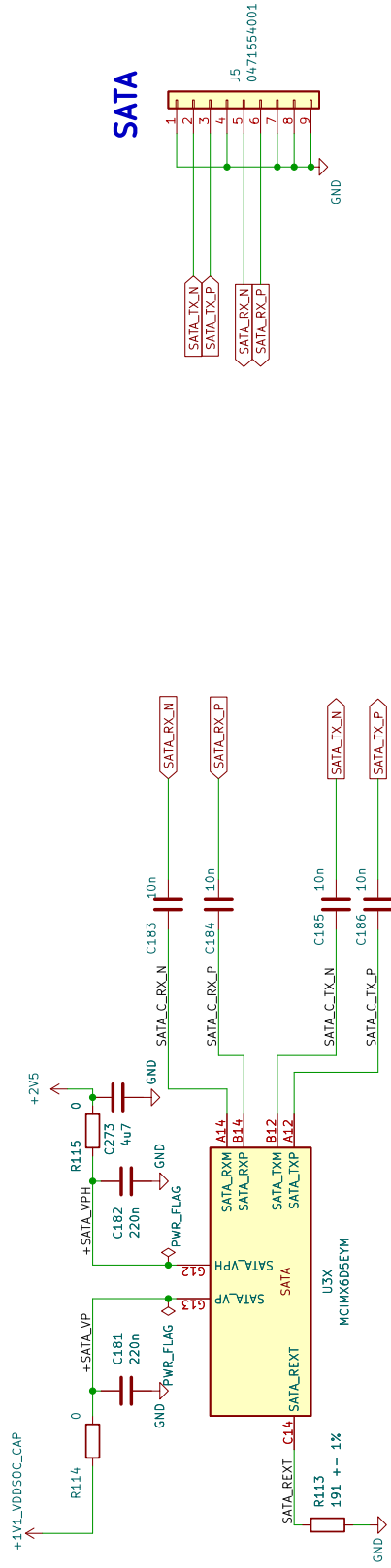
Sheet: /HDMI/
File: HDMI.kicad_sch

Title:

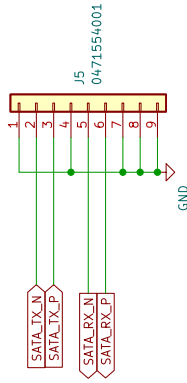
Size: A4 Date:
Kicad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 8/14

SATA



SATA

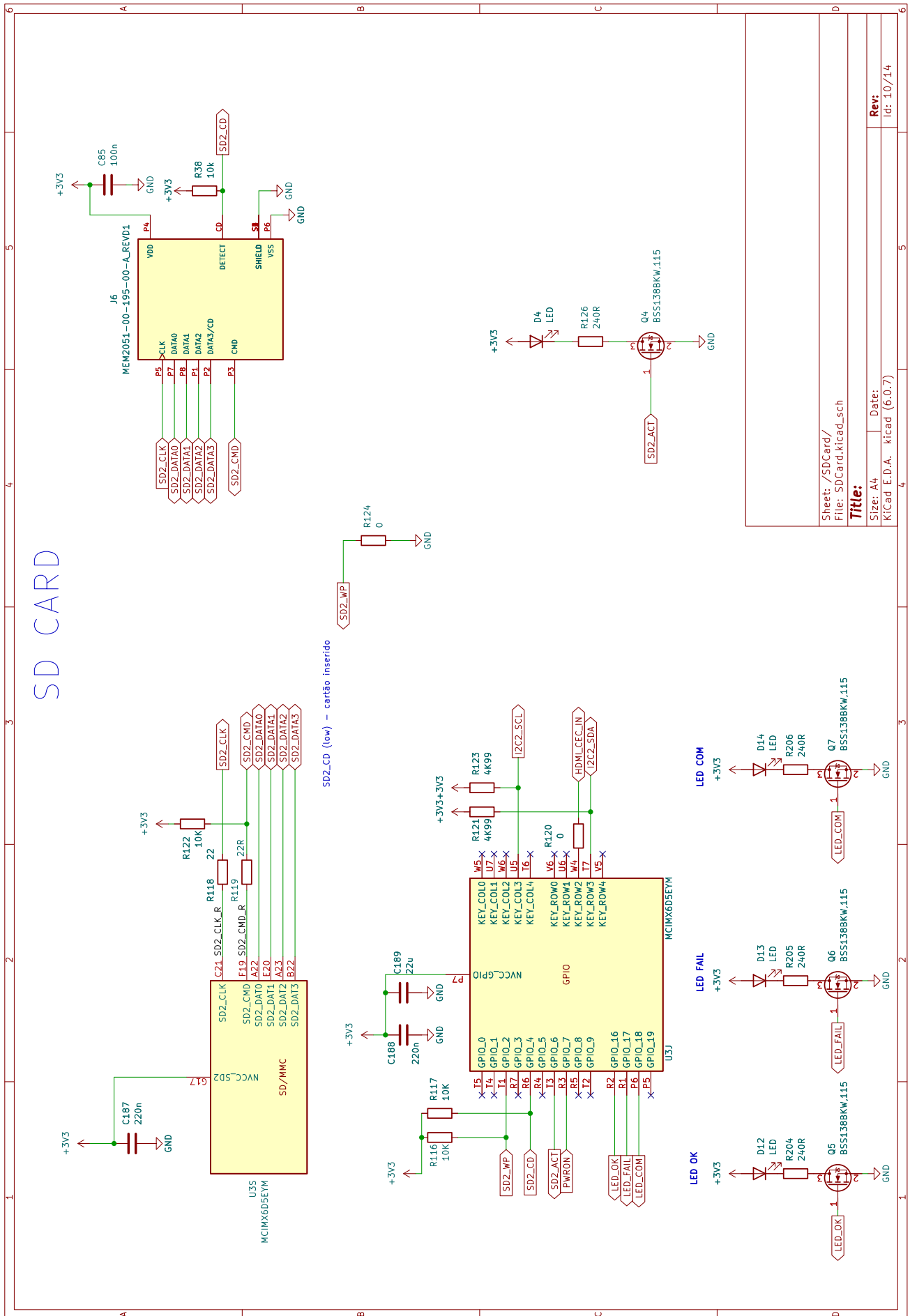


Sheet: /SATA/
File: SATA.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date: Rev:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7) Id: 9/14

SD CARD

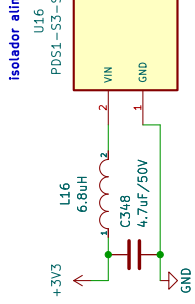


Sheet: /SDCard/
 File: SDCard.kicad_sch
Title:
 Size: A4 Date:
 KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

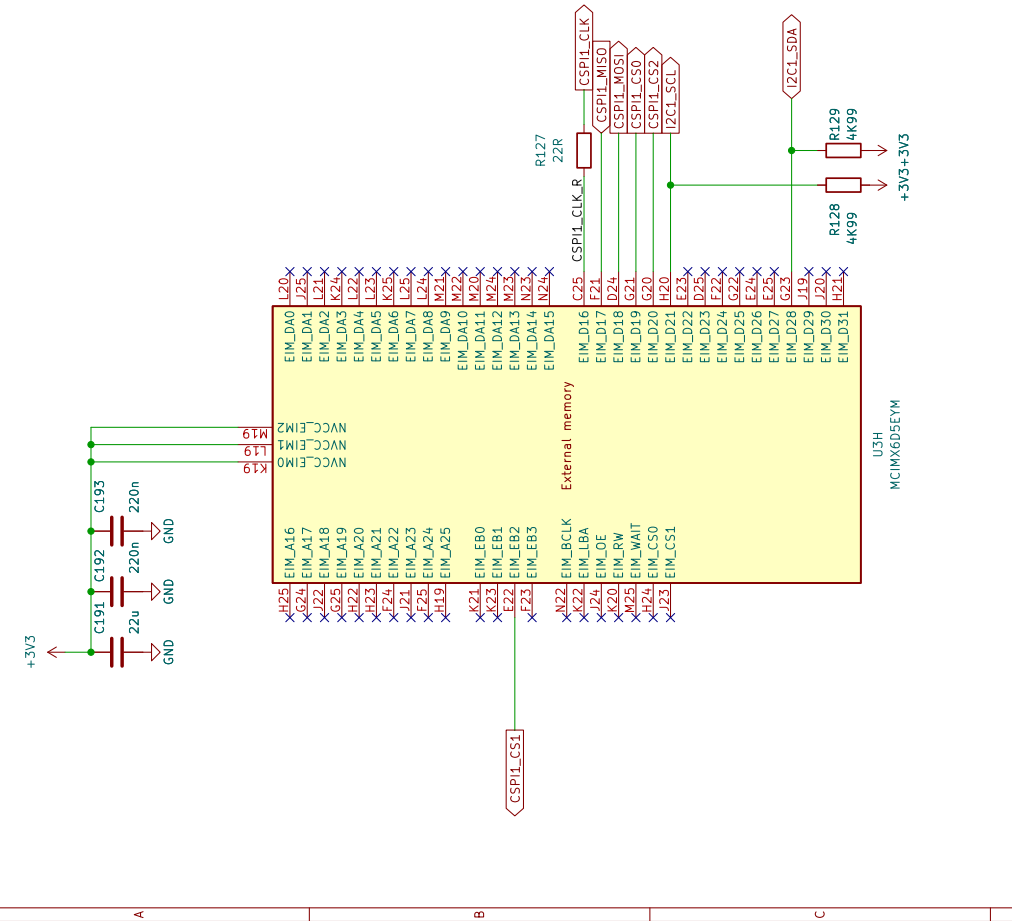
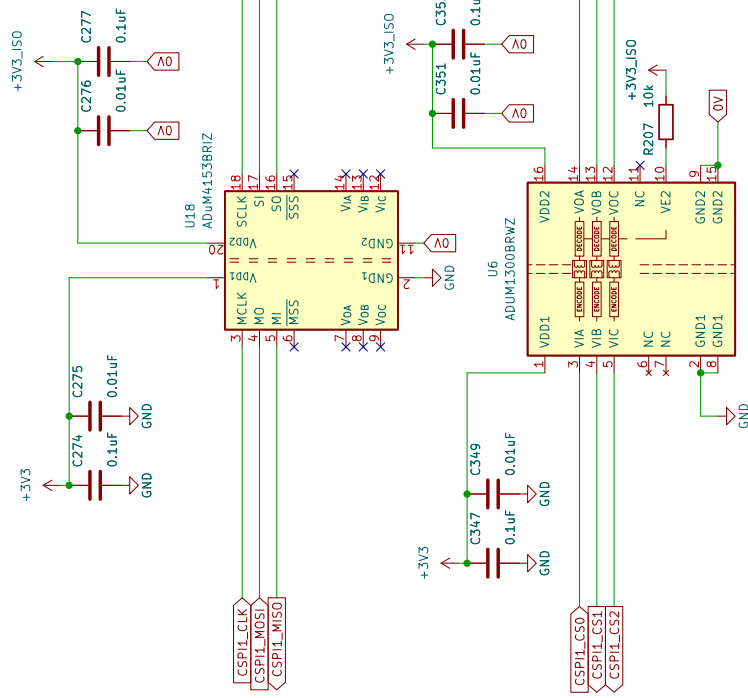
Rev:
 Id: 10/14

SPI

isolador alimentação



isoladores digitais



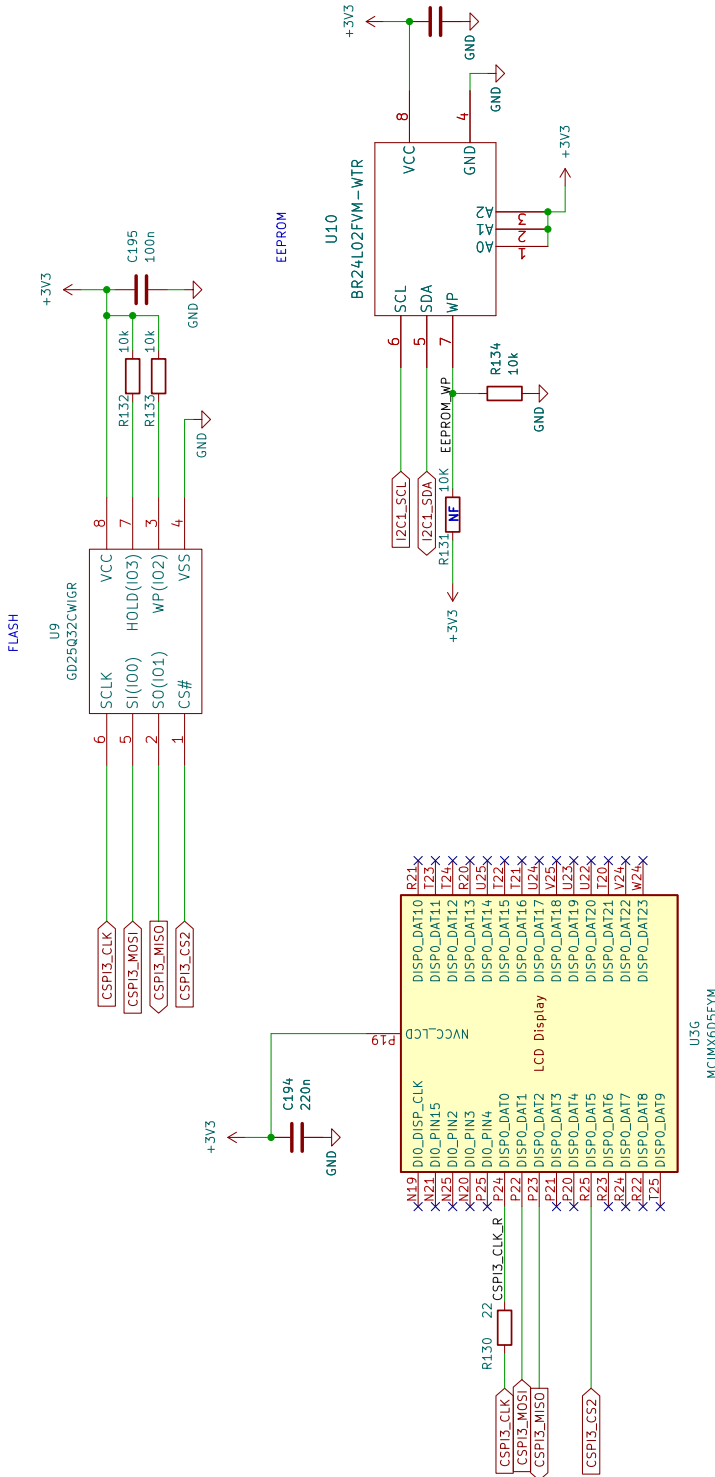
Sheet: /SPI/
 File: SPI.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date:
 KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
 Id: 11/14

EEPROM & FLASH



Sheet: /EEPROM&FLASH/
File: EEPROM&FLASH.kicad_sch

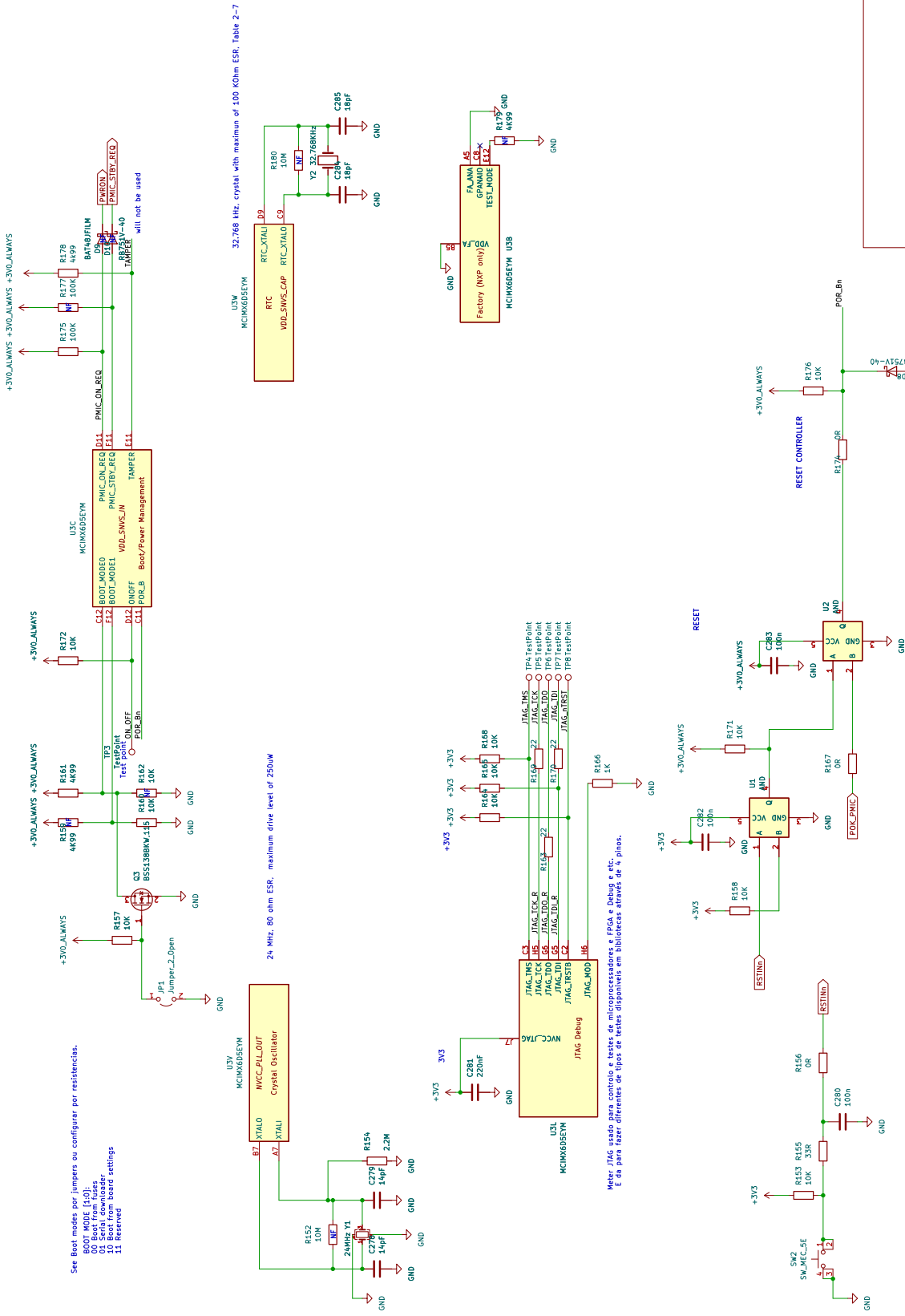
Title:

Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 12/14

Control JTAG, Oscillator & RESET

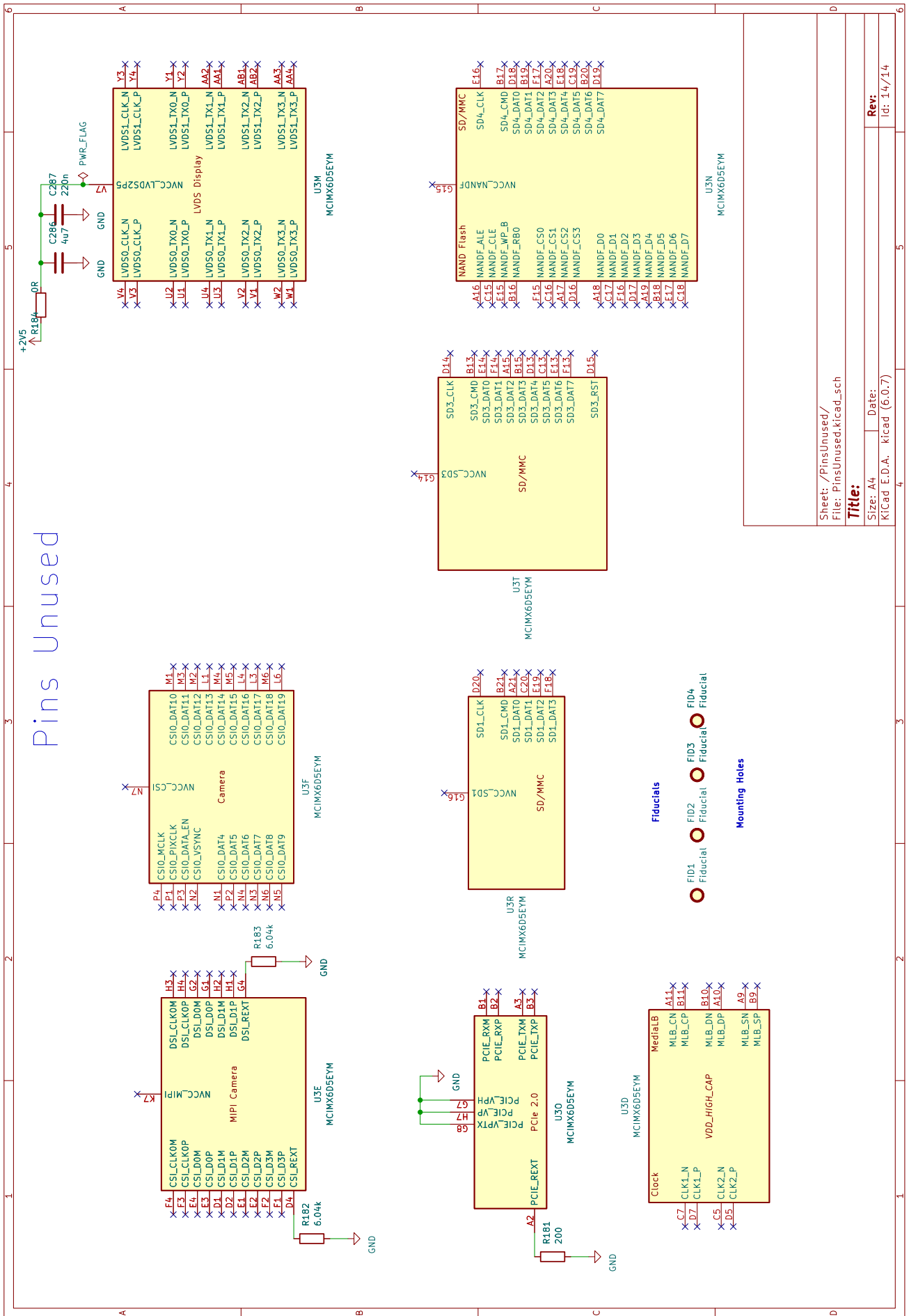


See Boot modes por jumpers ou configurar por resistencias.
 BOOT MODE [1:0]:
 00 Boot from fuses
 01 Boot from fuses
 10 Boot from board settings
 11 Reserved

24 Khz, 80 ohm ESR, maximum drive level of 250uW

Meter JTAG usado para controle e testes de microprocessadores e FPGA e debug e etc.
 É de para fazer diferentes de tipos de testes disponíveis em bibliotecas através de 4 pinos.

Pins Unused



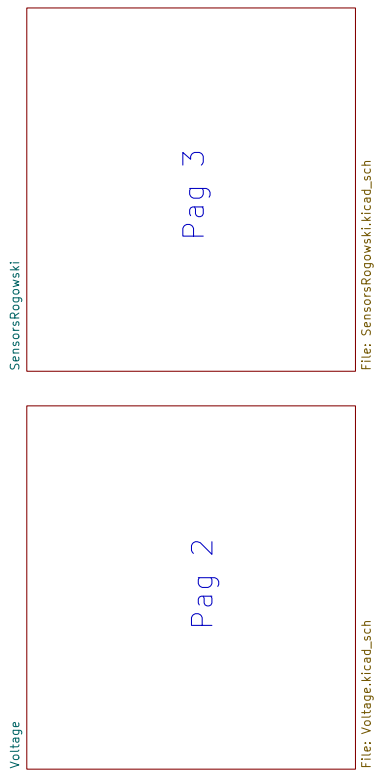
Sheet: /PinsUnused/
 File: PinsUnused.kicad_sch
Title:
 Size: A4 Date:
 KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)
Rev:
 Id: 14/14

Apêndice D

Placa de validação de circuitos de condicionamento

Neste apêndice apresenta-se o esquemático, o PCB e o modelo 3D da placa de validação dos circuitos de condicionamento desenvolvido na aplicação Kicad. A placa é constituída pelos os circuitos de condicionamento de corrente e tensão mencionados no Capítulo 3. Este apêndice apresenta a seguinte organização:

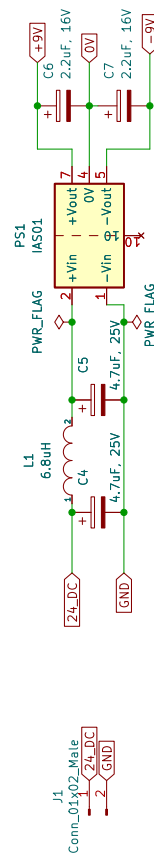
- Página 104 - Apresenta a alimentação da placa.
- Página 105 - Apresenta os três circuitos de condicionamento de tensão da leitura dos sinais de tensão da alimentação trifásica. Estes circuitos são idênticos ao circuito apresentado na Secção 3.4.
- Página 106 - Apresenta os três circuitos de condicionamento de corrente da leitura dos sinais de corrente da alimentação trifásica. Estes circuitos são idênticos ao circuito apresentado na Secção 3.4.
- Página 107 - Apresenta o PCB da placa de validação dos circuitos de condicionamento de tensão e corrente.
- Página 108 - Apresenta o modelo 3D da placa de validação dos circuitos de condicionamento de tensão e corrente.



Pag 2

Pag 3

Alimentação do Módulo



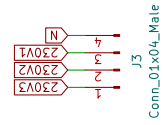
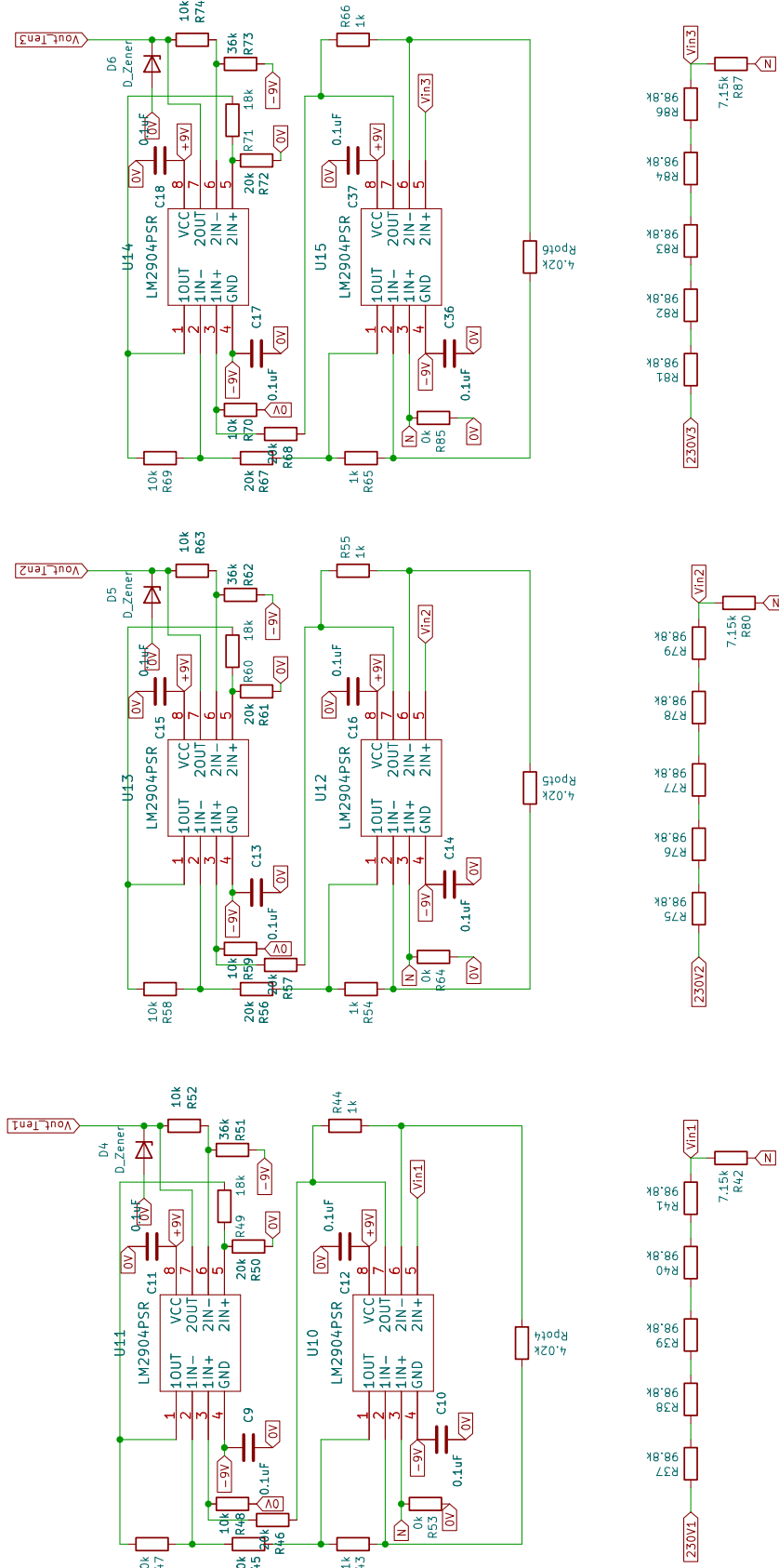
Sheet: /
File: Sinaiseletricos_V2.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Idt: 1/3

Circuitos de Condicionamento de Tensão



Conn_01x04_Male

Sheet: /Voltage/
File: Voltage.kicad_sch

Title:

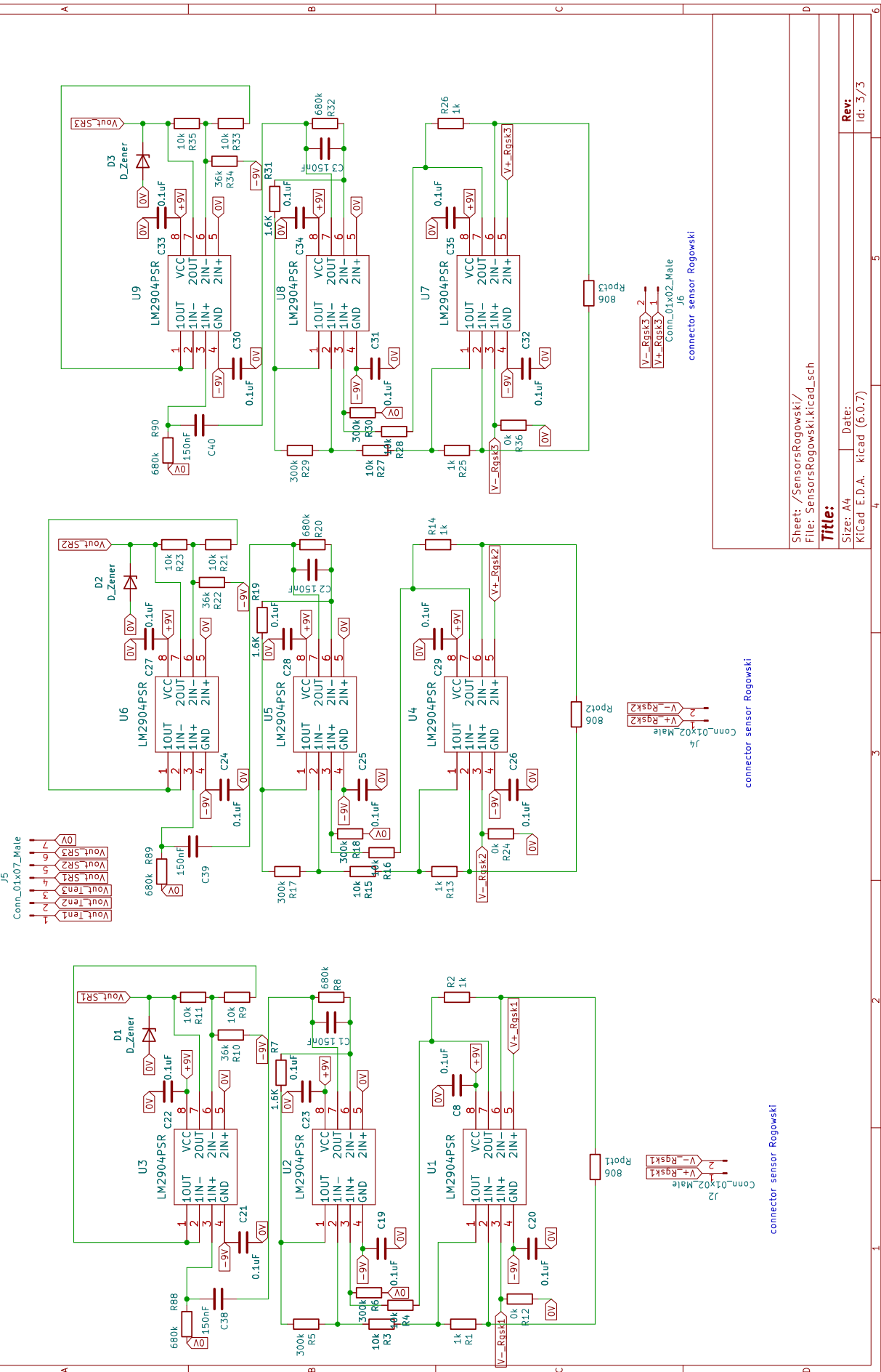
Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

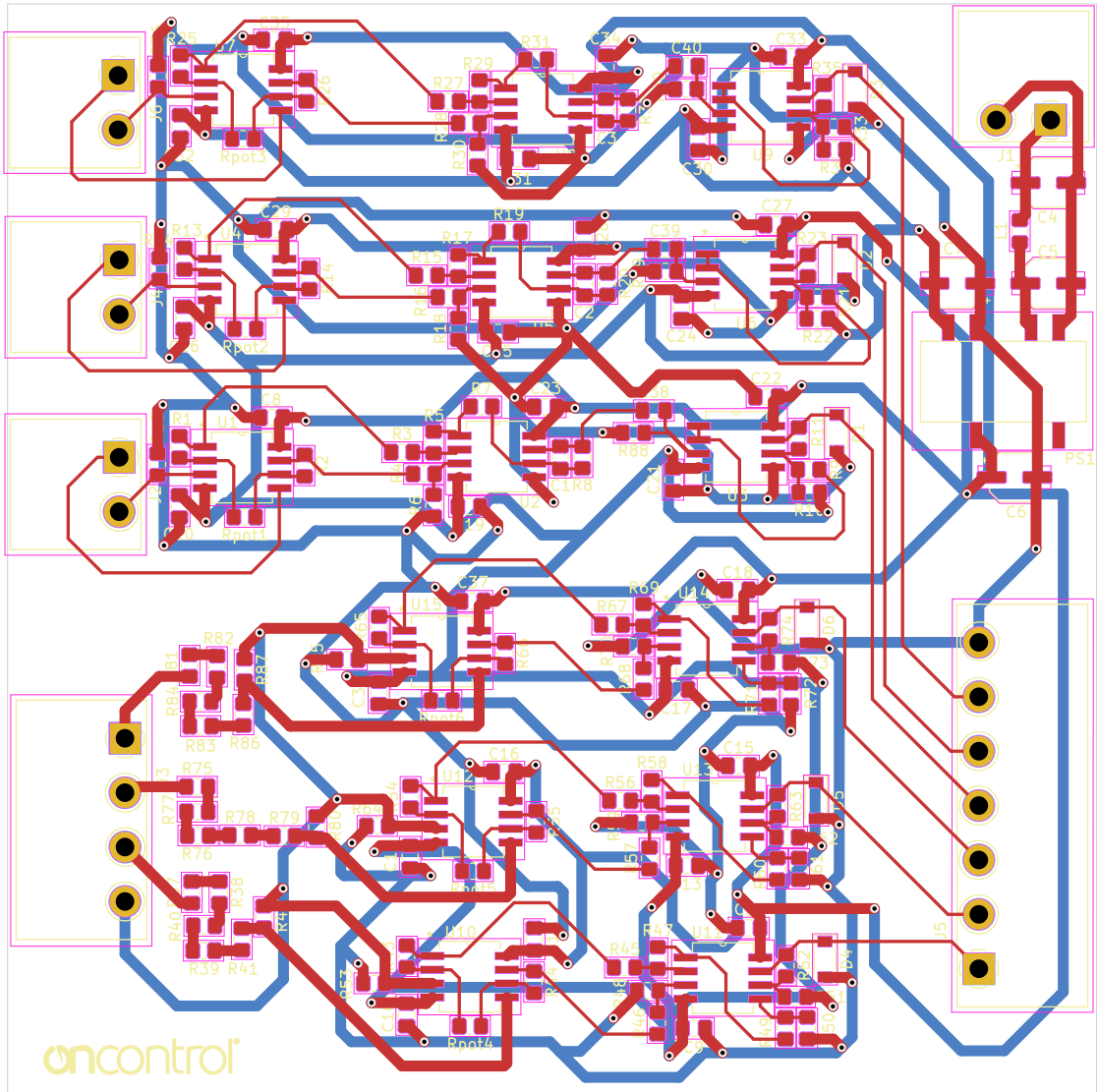
Rev:

Id: 2/3

Circuitos de Condicionamento de Corrente



Sheet: /SensorsRogowski/	5
File: SensorsRogowski.kicad_sch	5
Title:	
Size: A4	
Date:	
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)	
Rev:	Id: 3/3



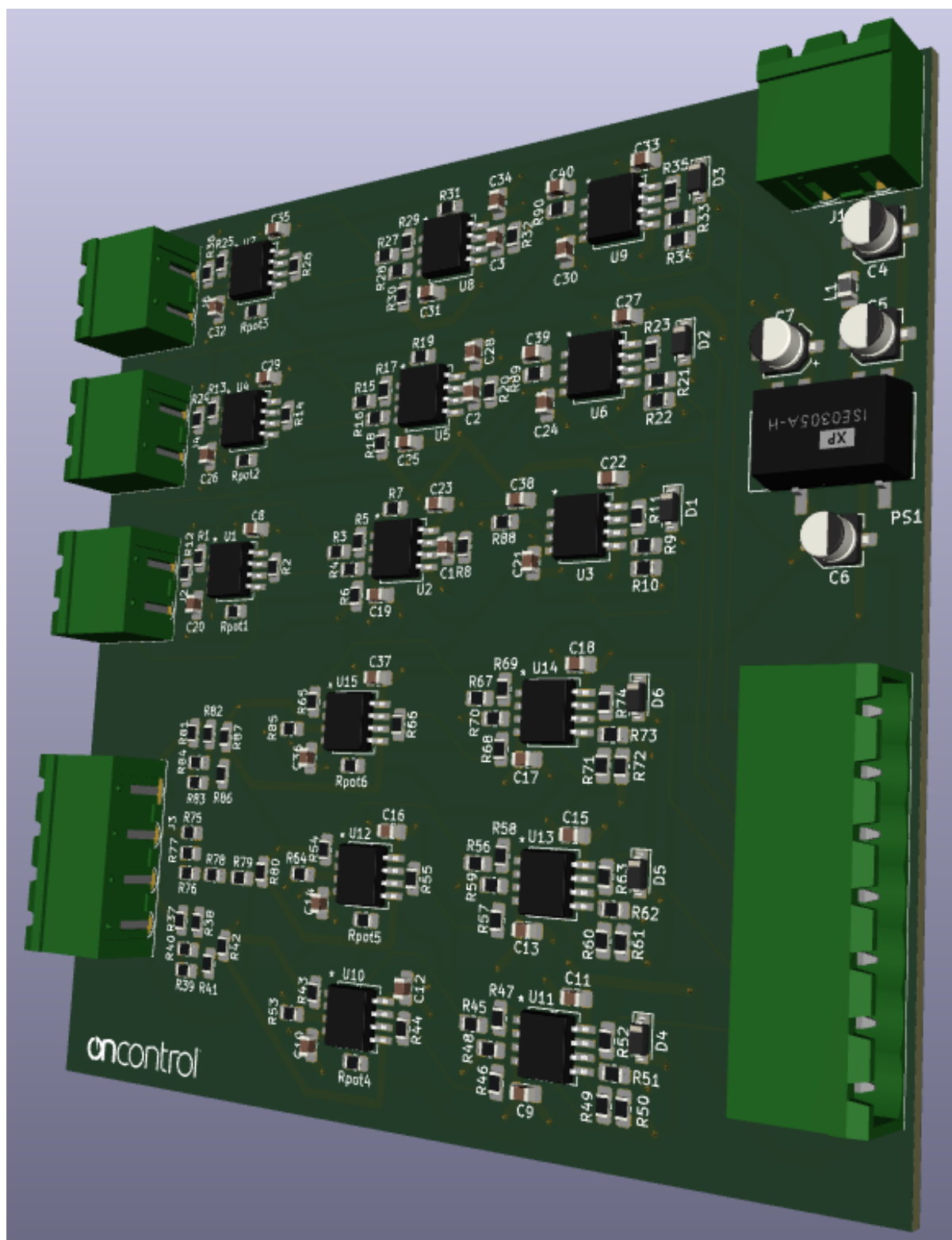


Figura D.1: Modelo 3D da placa de validação dos circuitos de condicionamento.

Apêndice E

Observação dos circuitos de condicionamento no osciloscópio

Neste apêndice são apresentados os sinais de corrente e tensão presentes na placa de validação dos circuitos de condicionamento, apresentada na Subsecção 5.1.2. Os sinais elétricos são observados no osciloscópio, nos diferentes estágios mencionados na Secção 3.4.

E.1 Circuito de condicionamento de Tensão

Nesta secção, observa-se o sinal de tensão no circuito de condicionamento de tensão nos estágios mencionados na Figura 3.7.

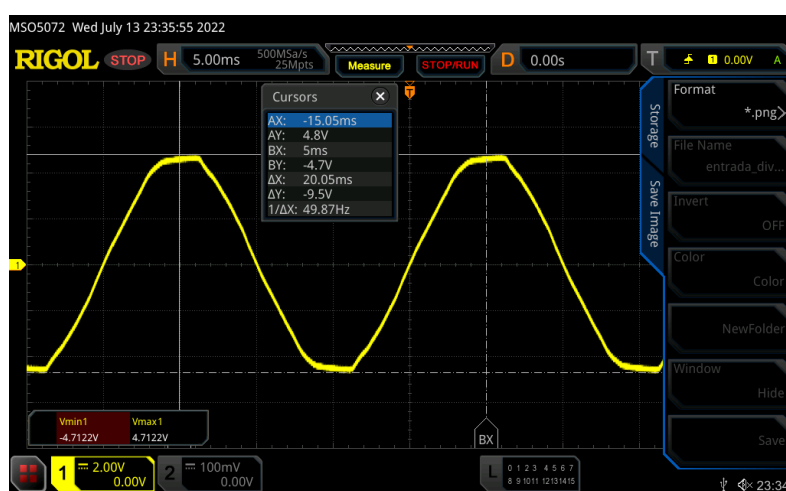


Figura E.1: 1º Estágio - Sinal de entrada de 325 VAC após o divisor de tensão.

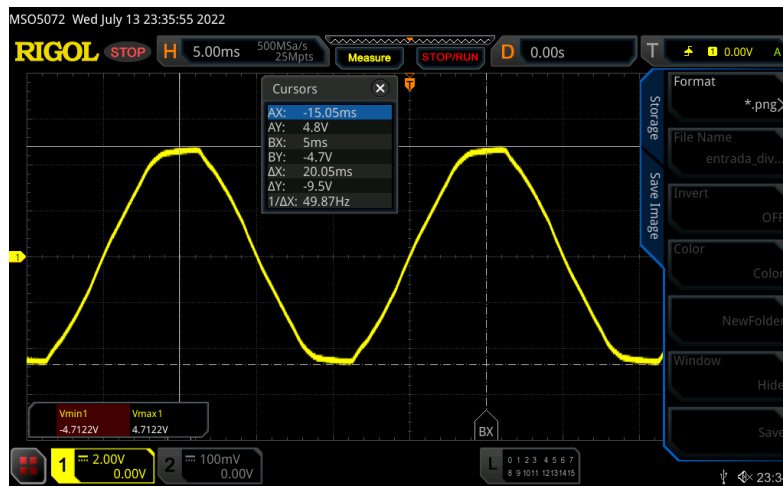


Figura E.2: 2º Estágio - Sinal de saída após o estágio amplificador de instrumentação.

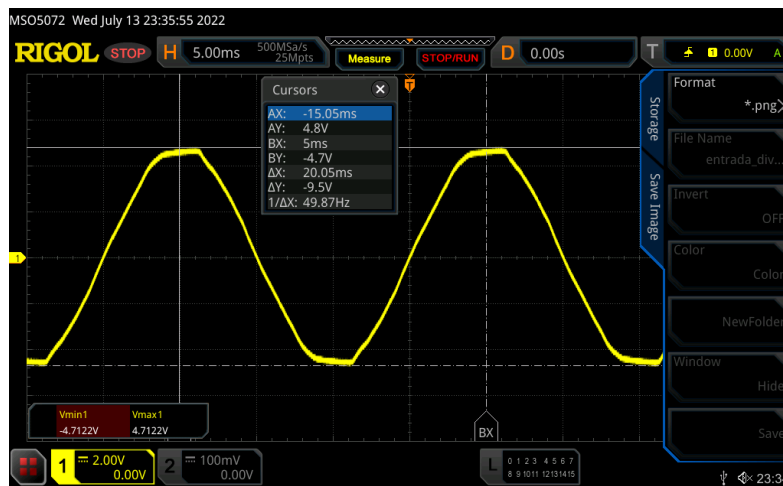


Figura E.3: 3º Estágio - Sinal de saída do último estágio em que é feito um ajuste do ganho e *offset* ao sinal.

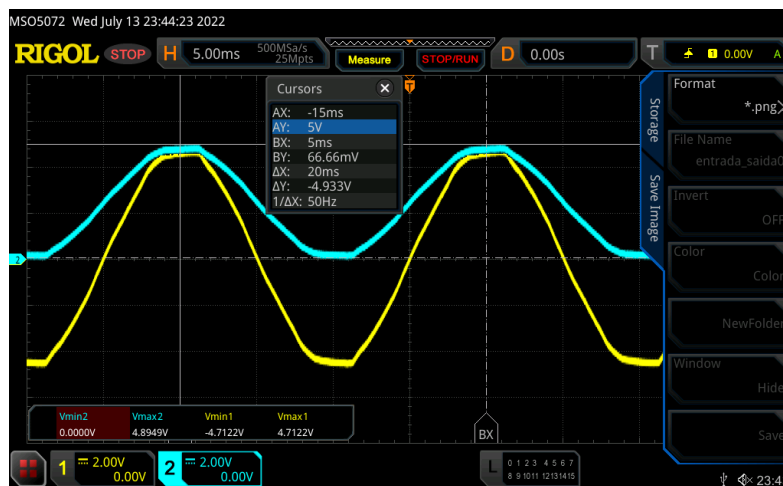


Figura E.4: Sinal de entrada após divisor tensão (amarelo) e sinal de saída do 3º estágio (azul).

E.2 Circuito de condicionamento de corrente

Nesta secção, observa-se o sinal de corrente, equivalente ao proveniente do sensor de Rogowski, no circuito de condicionamento de corrente nos diferentes estágios mencionados na Figura 3.8.



Figura E.5: Sinal de entrada proveniente do gerador de sinal (equivalente a um sinal de uma corrente primária de 1kA).

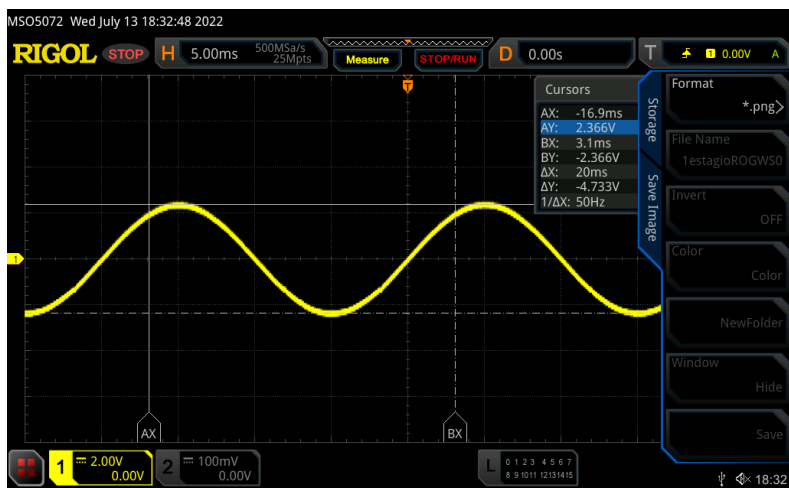


Figura E.6: 1º Estágio - Sinal de saída após o estágio amplificador de instrumentação.

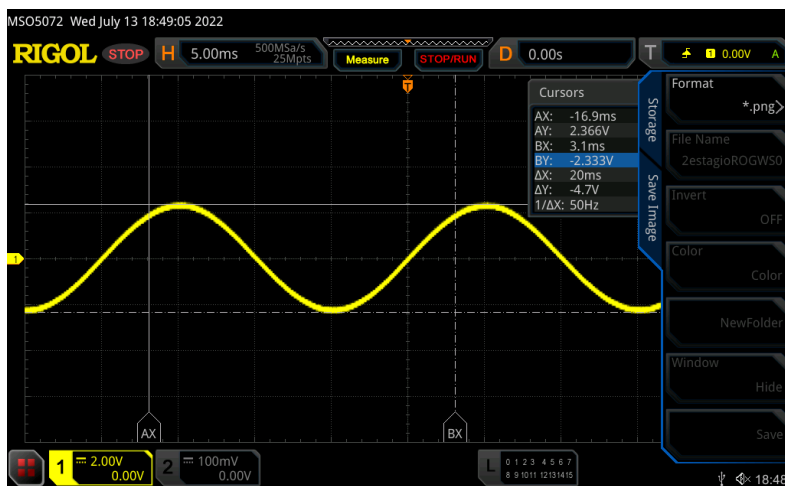


Figura E.7: 2º e 3º Estágio - Sinal após a integração do sinal (amplificador integrador) e filtro passa alto.

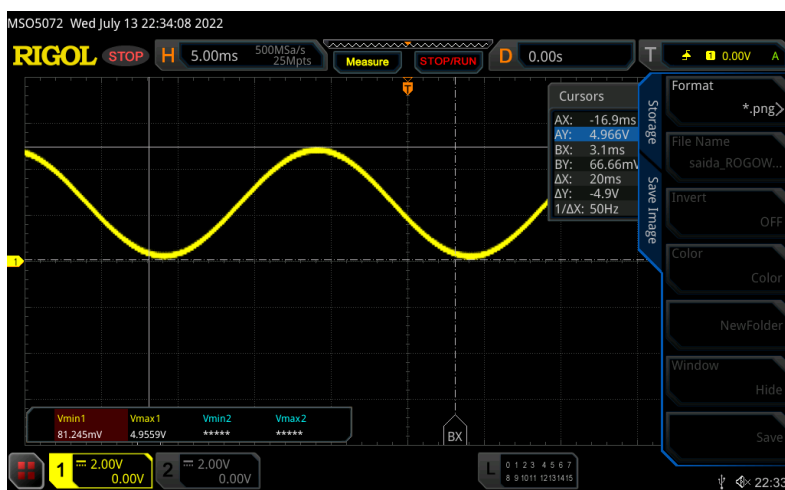


Figura E.8: 4º Estágio - Sinal após o último estágio de ajuste do ganho e *offset*.



Figura E.9: Sinal de entrada do sensor de Rogowski (amarelo) e sinal de saída do 4º estágio (azul).

Apêndice F

Módulo de expansão de sinais elétricos

Neste apêndice apresenta-se o esquemático, o PCB e o modelo 3D do módulo de expansão de sinais elétricos, desenvolvido na aplicação Kicad, com o ADC (AD7779ACPZ) e os circuitos de corrente e tensão para o intervalo admissível pelo ADC (0 a +2,5 V). Este apêndice apresenta a seguinte organização:

- Página 114 - Apresenta a alimentação do mSE e a respetiva alimentação analógica e digital do ADC.
- Página 115 - Apresenta os circuitos de condicionamento dos sinais de tensão da alimentação trifásica para o intervalo admissível pelo ADC (0 a +2,5 V).
- Página 116 - Apresenta os circuitos de condicionamento dos sinais de corrente da alimentação trifásica para o intervalo admissível pelo ADC (0 a +2,5 V).
- Página 117 - Apresenta a implementação do ADC (AD7779ACPZ) de encontro às características referidas na Secção 3.4.
- Página 118 - Apresenta o PCB do mSE.
- Página 119 - Apresenta o modelo 3D do mSE.

ADC_SPI

Pag 4

File: ADC_SPI.kicad_sch

SensorsRogowski

Pag 3

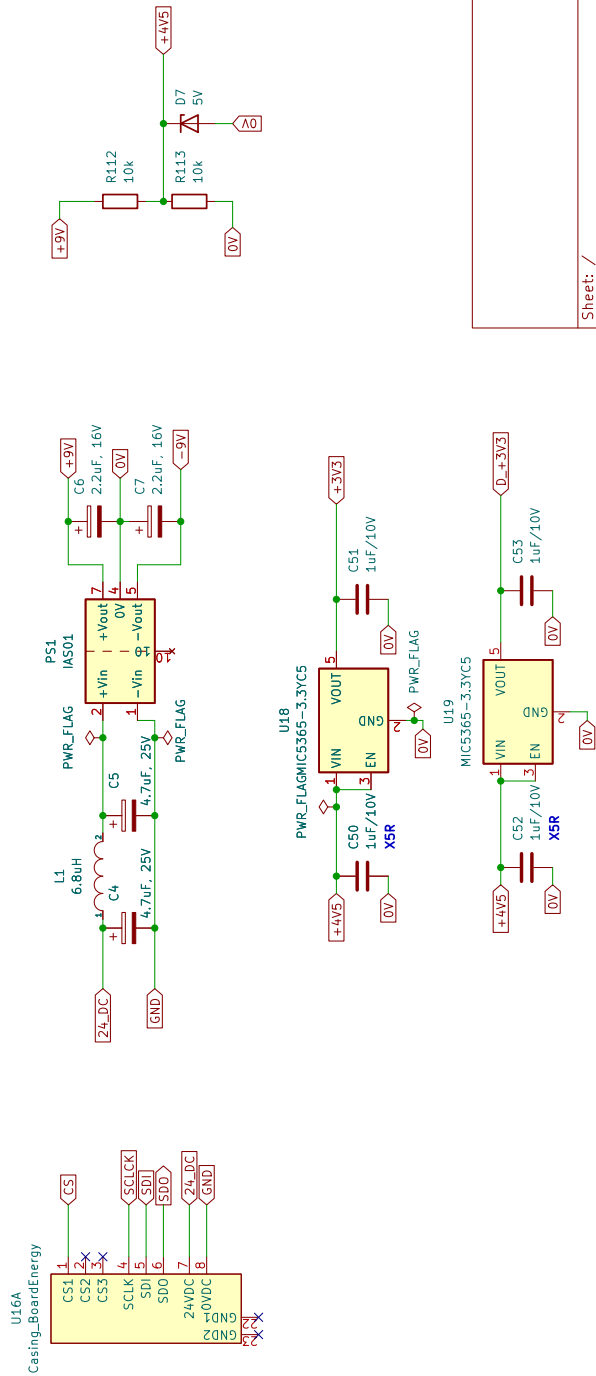
File: SensorsRogowski.kicad_sch

Voltage

Pag 2

File: Voltage.kicad_sch

Alimentação do Módulo



Sheet: /

File: SinaiseletricosV3.kicad_sch

Title:

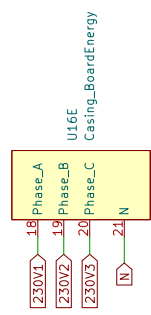
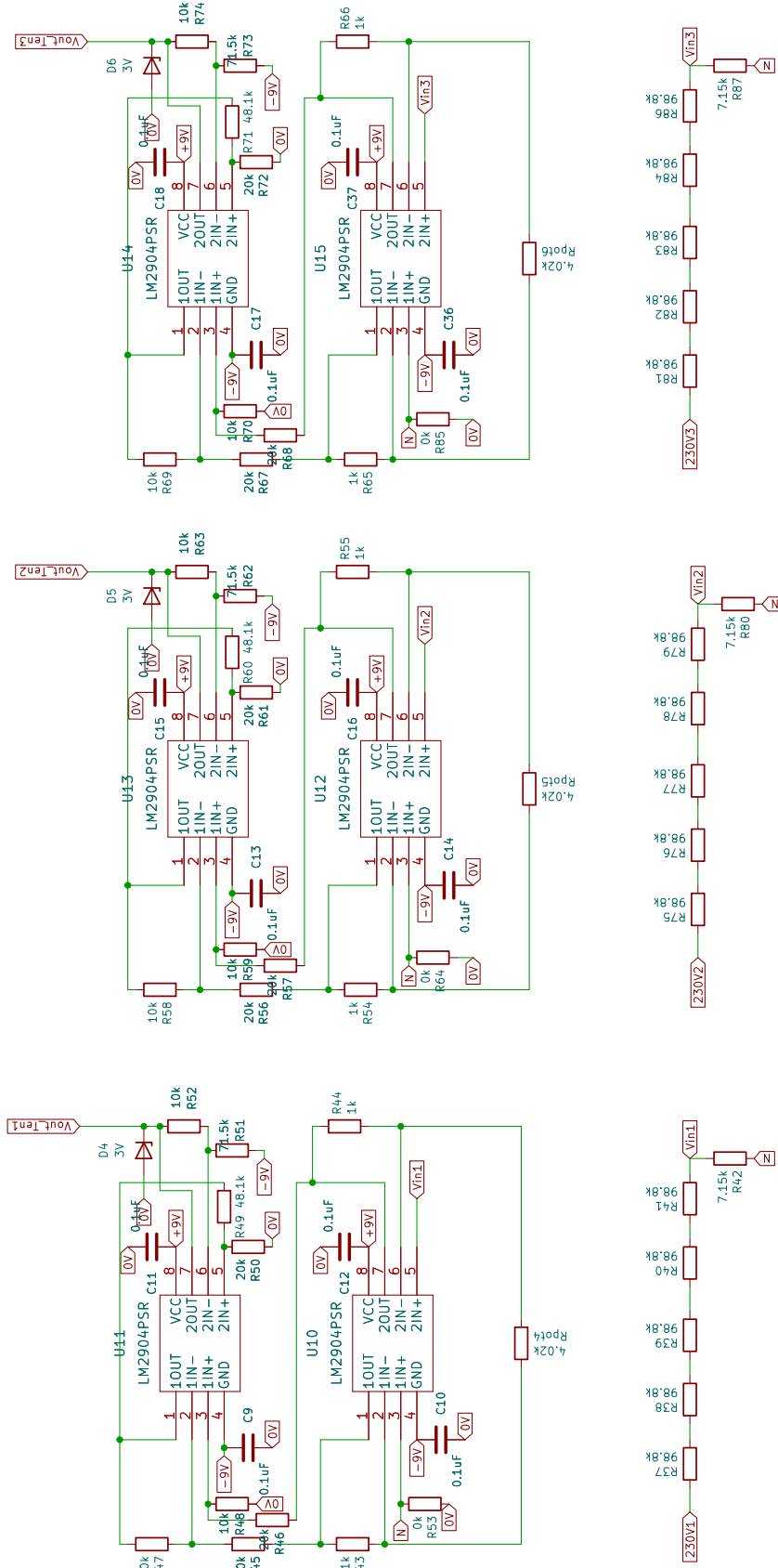
Size: A4

Date:

KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev: Idt.1/4

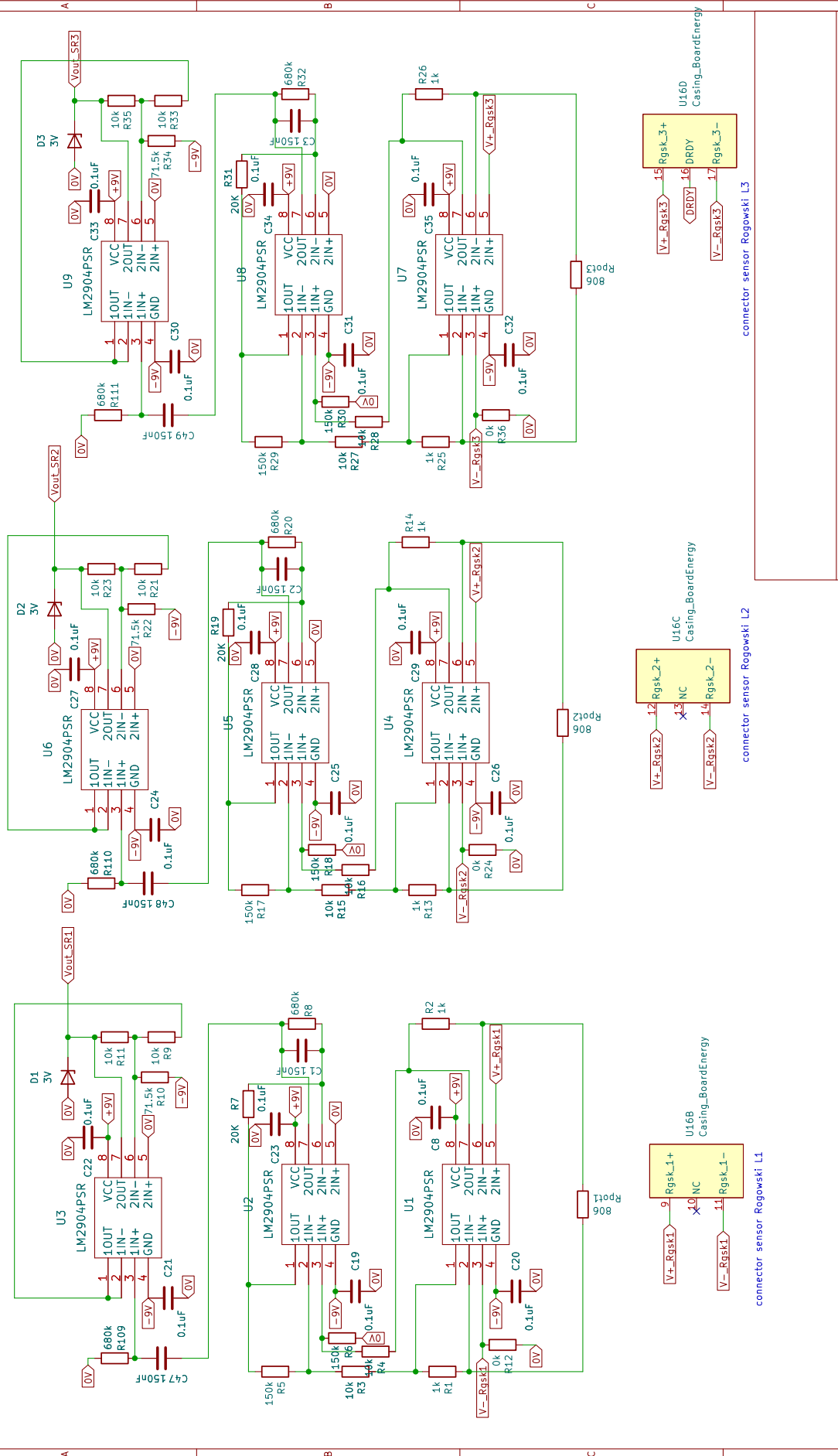
Circuitos de Condicionamento de Tensão



Sheet: /Voltage/
File: Voltage.kicad_sch
Title:
Size: A4 Date:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7) Id: 2/4

Rev:
Id: 2/4

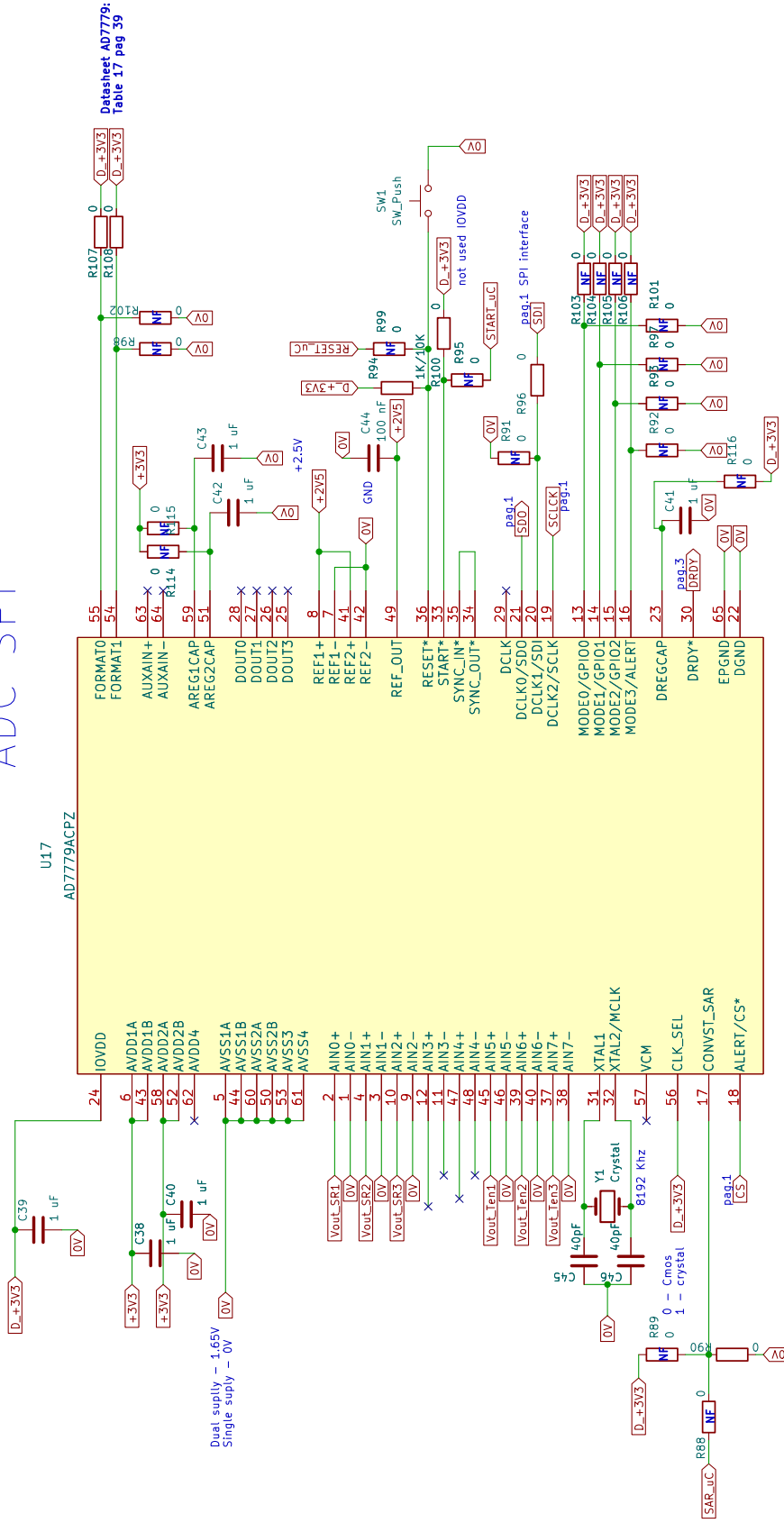
Circuitos de Condicionamento de Corrente



Sheet: /SensorsRogowski/	
File: SensorsRogowski.kicad_sch	
Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)	
	Rev: Id: 3/4

ADC SPI

U17
AD7779ACPZ

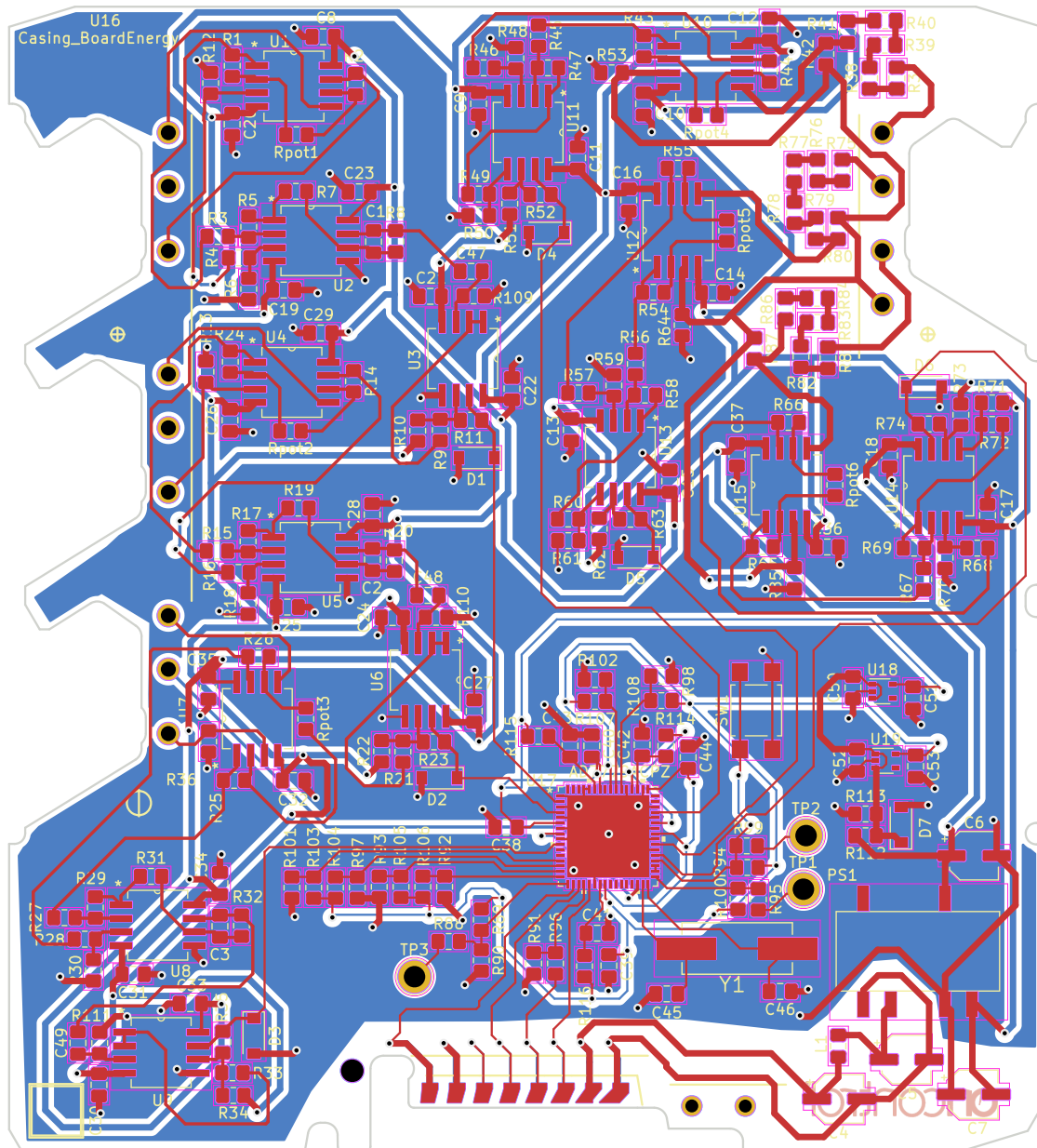


Sheet: /ADC_SPI/
File: ADC_SPI.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 4/4



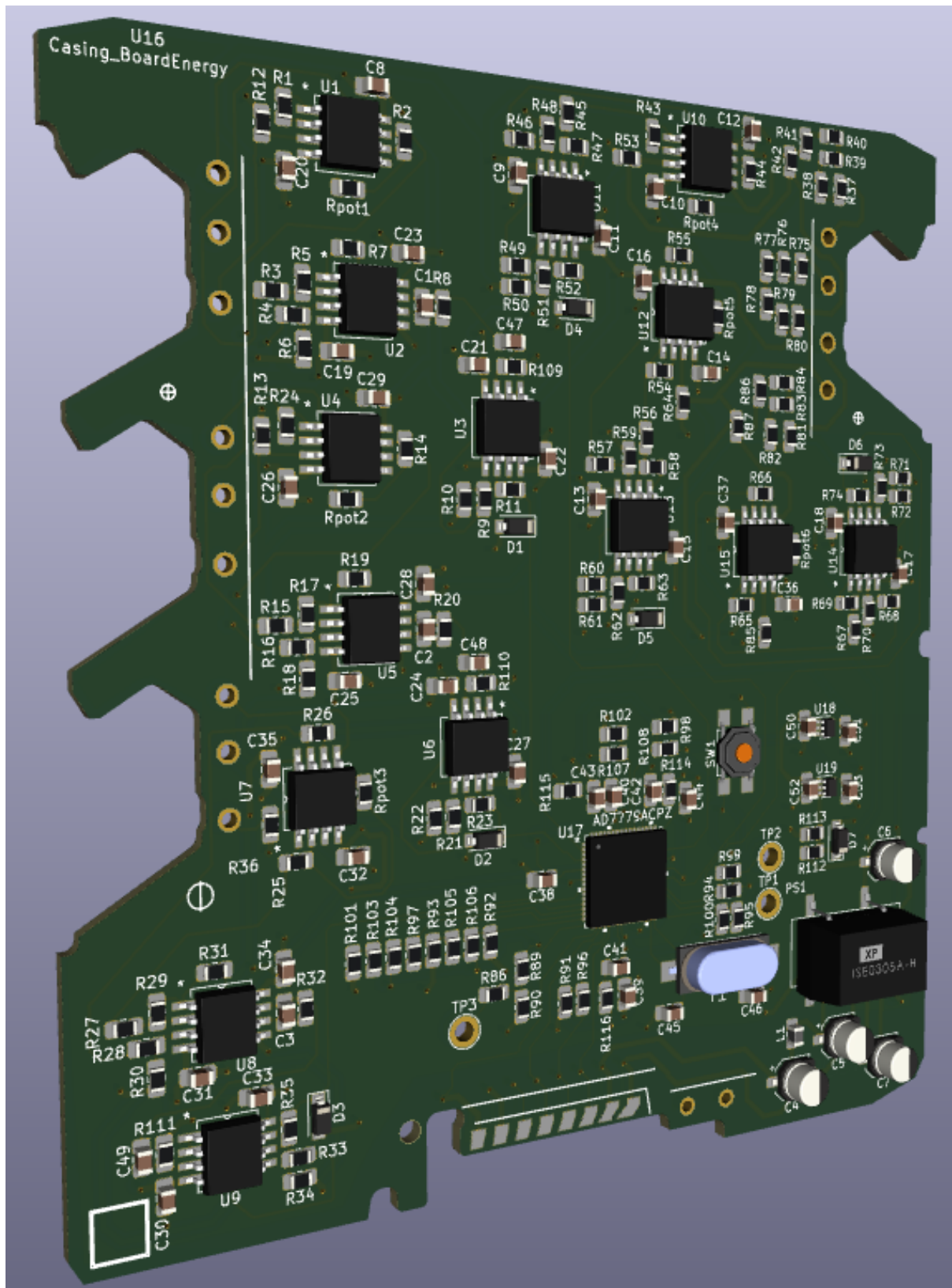


Figura F.1: Modelo 3D do mSE.

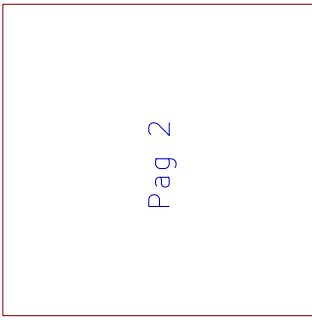
Apêndice G

Módulo de expansão de sinais de vibração

Neste apêndice apresenta-se o esquemático, o PCB e o modelo 3D do módulo de expansão de sinais de vibração, desenvolvido na aplicação Kicad. Neste módulo utiliza-se o ADC (MAX1377ATP+) e os circuitos de condicionamento dos sinais de vibração para o intervalo de tensão admissível pelo ADC (0 a 3,3 V). Este apêndice apresenta a seguinte organização:

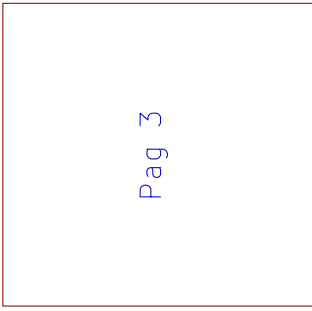
- Página 122 - Apresenta a alimentação do mSV e a alimentação (+4,5 V) para o sensor de vibração.
- Página 123 - Apresenta os circuitos de condicionamento dos sinais provenientes dos dois sensores de vibração para o intervalo admissível pelo ADC (0 a +3,3 V).
- Página 124 - Apresenta a implementação do ADC (MAX1377ATP+) de encontro às características referidas na Secção 3.5 e a alimentação analógica e digital do ADC.
- Página 125 - Apresenta o PCB do mSV.
- Página 126 - Apresenta o modelo 3D do mSV.

Cond_Circuit



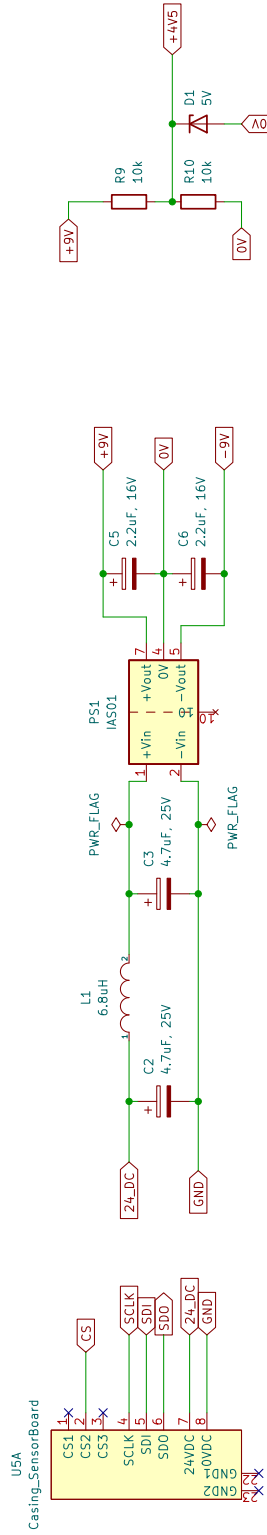
File: Cond_Circuit.kicad_sch

ADC



File: ADC.kicad_sch

Alimentação do Módulo



Sheet: /
File: IpromoSensorBoard.kicad_sch

Title:

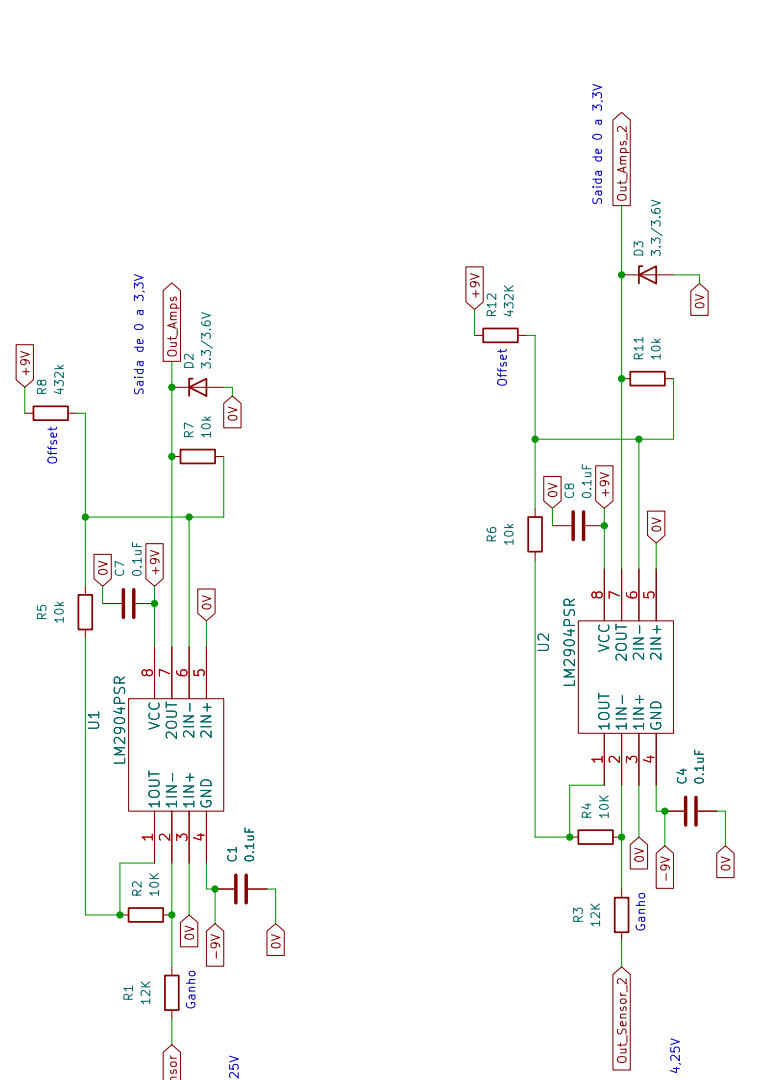
Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:

Id: 1/3

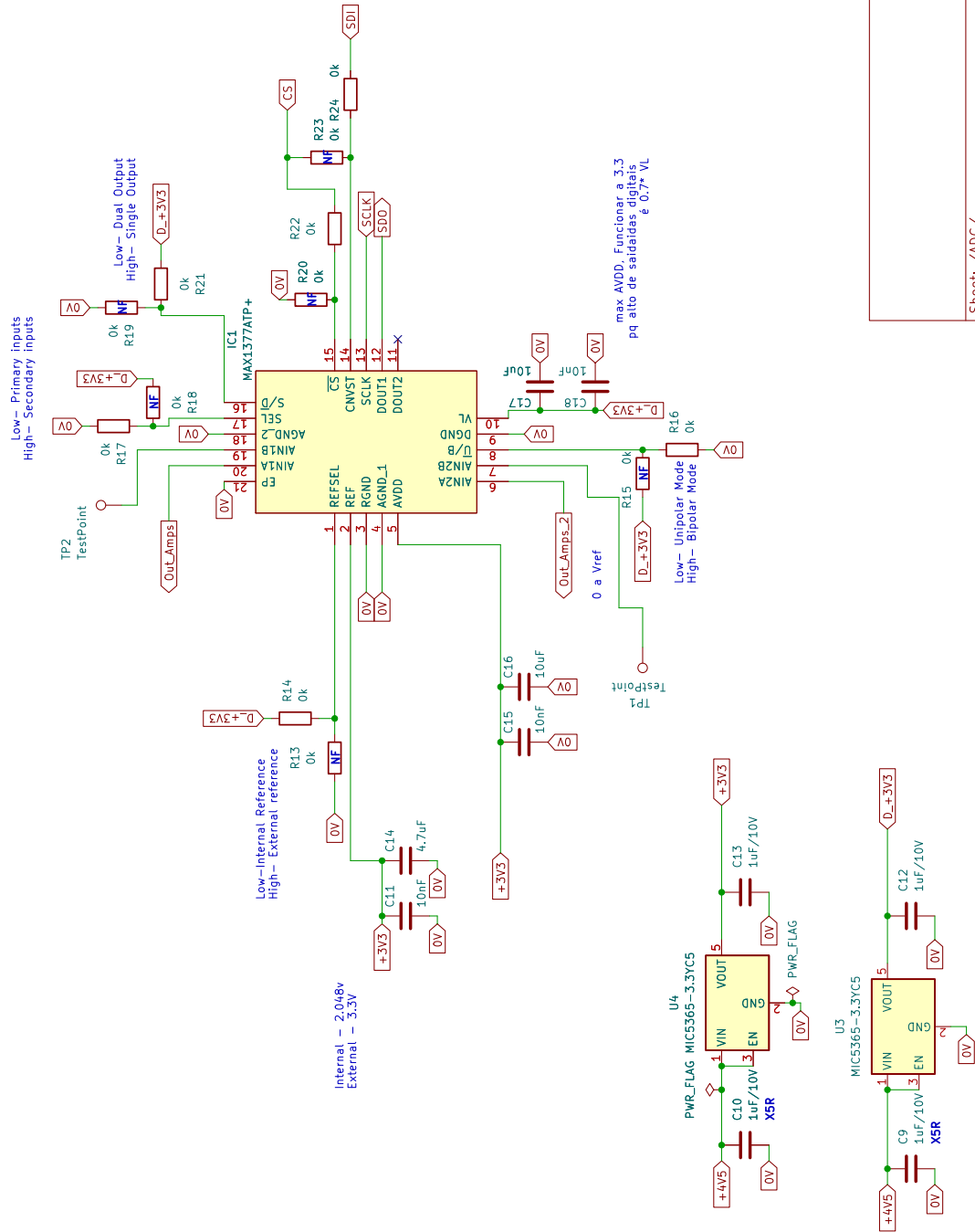
Circuitos de Condicionamento



Sheet: /Cond_Circuit/
 File: Cond_Circuit.kicad_sch
Title:
 Size: A4 Date:
 KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
 Id: 2/3

ADC SPI



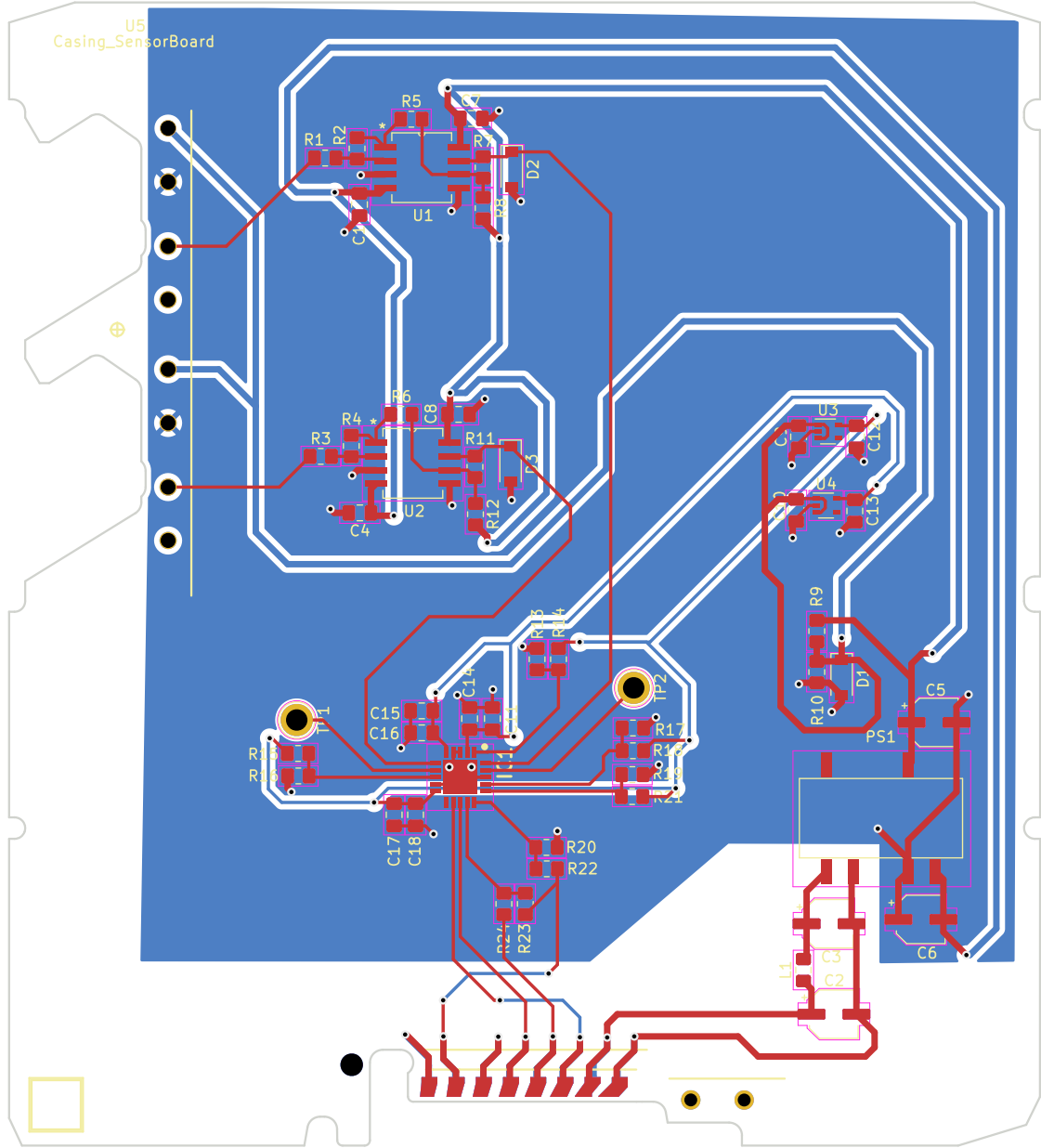
max AVDD. Funcionar a 3.3
pq alto de saidadas digitais
é 0.7* VL

Sheet: /ADC/
File: ADC.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date:
Kicad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 3/3



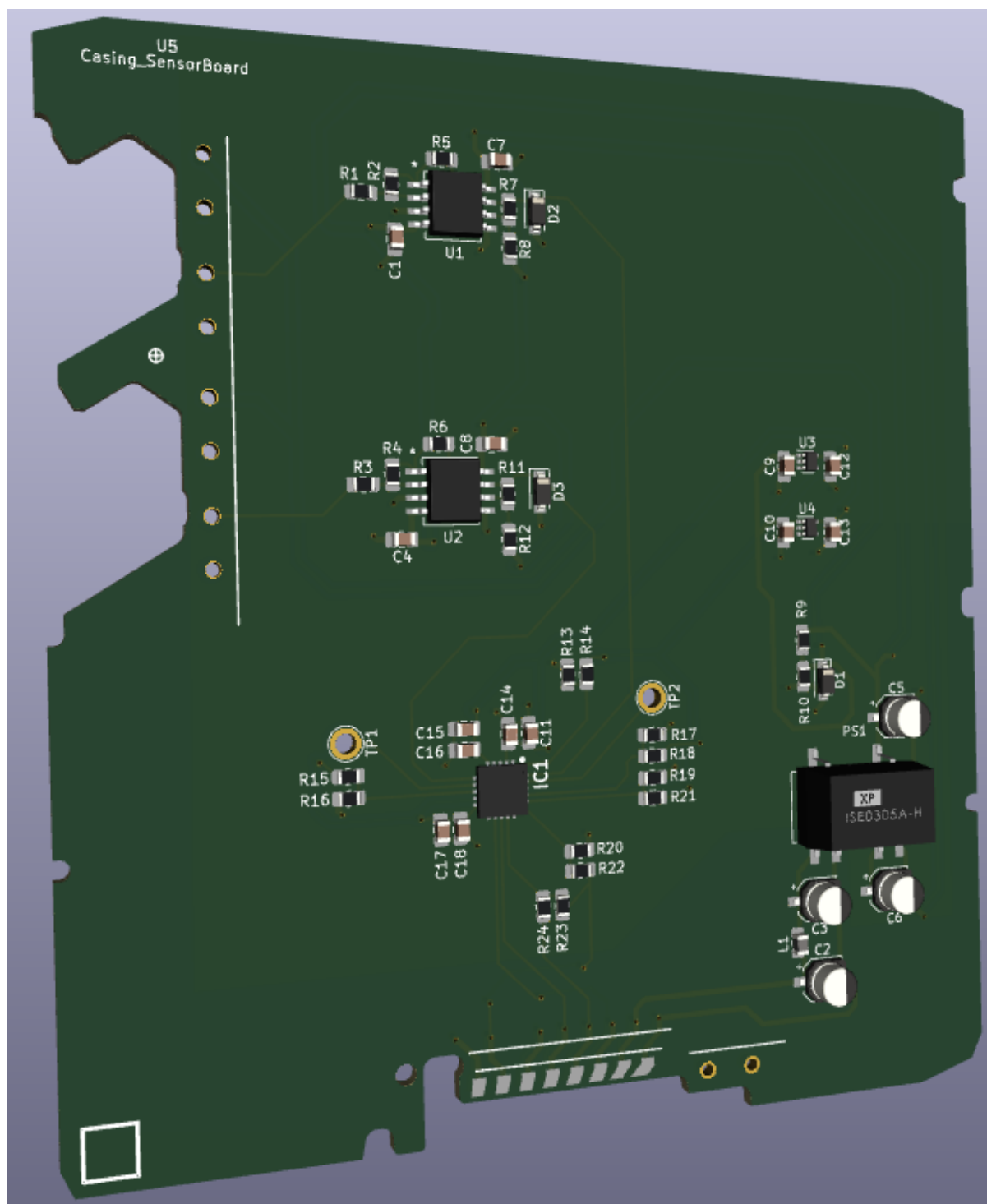


Figura G.1: Modelo 3D do mSV.