



Universidade de Aveiro  
2022

**Pedro Miguel**

**Francisco Malheiro**

**Implementação de uma solução de manutenção  
preditiva para motores de indução trifásicos  
utilizados em ambiente industrial**



Universidade de Aveiro  
2022

**Pedro Miguel**

**Francisco Malheiro**

**Implementação de uma solução de manutenção  
preditiva para motores de indução trifásicos  
utilizados em ambiente industrial**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob a orientação científica do Doutor José Alberto Gouveia Fonseca, Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e de Rui Escadas Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Miguel Armando Riem de Oliveira**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutora Fernanda Madureira Coutinho**

Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Prof. Doutor José Alberto Gouveia Fonseca**

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

**Agradecimentos /  
Acknowledgements**

Queria agradecer meus orientadores José Fonseca e Rui Escadas pela disponibilidade e ajuda prestada ao longo do desenvolvimento desta dissertação e também ao Vítor Ferreira por todo o apoio dado.

Agradeço também aos meus amigos, em particular ao César, ao Alex, à Joana e à Mariana pelo apoio e motivação dada e também aos meus pais, Hélder e Cristina, e à restante família pelo apoio constante.

**Apoio / Support**

Este trabalho é apoiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Regional do Centro (CENTRO 2020) do Portugal 2020 [Projeto DETAINER com o nº 037204 (CENTRO-01-0247-FEDER-037204)]

## Palavras-chave

Manutenção Preditiva; Indústria; Motores Elétricos; Aquisição de Dados; Monitorização; Microcontroladores

## Resumo

O presente trabalho integra-se no desenvolvimento de uma solução para permitir aplicar manutenção preditiva a motores de indução trifásicos utilizados na indústria. No início abordam-se as mais significativas técnicas de manutenção industrial utilizadas na atualidade, fazendo uma sumária comparação entre elas. Segue-se uma apresentação mais detalhada da manutenção preditiva.

Será efetuada também uma breve apresentação dos motores elétricos de indução, nomeadamente a explicação do seu funcionamento, aspetos construtivos, principais causas de falha e grandezas relevantes a medir.

A solução proposta deve permitir determinar vetores de *Park* para identificação precoce de avarias, determinando o ciclo de vida do motor antes das deficiências se tornarem destrutivas. Para isso foi referenciado um kit que permite a medição das tensões e correntes necessárias para o cálculo dos referidos vetores. Relativamente a este kit serão exploradas as suas capacidades de medição de energia e a programação do microcontrolador embutido e seus respetivos periféricos.

O kit é conectado a um motor elétrico com variador de velocidade, com o intuito de obter dados sobre as suas tensões e correntes. Os dados obtidos são transferidos por uma interface série para um computador. Tal serve de preparação para a utilização de comunicações sem fios tolerantes a falhas desenvolvidas no âmbito do projeto Detainer o qual suporta este trabalho.

No trabalho estão incluídos detalhes sobre o processo prático efetuado com base nesse kit será, sendo referidos os vários testes e os resultados obtidos.

**Keywords**

Predictive Maintenance; Industry; Electric Motors; Data Acquisition; Monitoring; Microcontrollers

**Abstract**

This work is part of the development of a solution to allow predictive maintenance of three-phase induction motors used in industry. The most significant industrial maintenance techniques currently used are discussed, making a brief comparison between them. A more detailed presentation of predictive maintenance follows.

A short presentation of electric motors will also be performed, including an explanation of their operation, constructive aspects, main cause of failures and relevant quantities to measure.

The proposed solution must allow determining Park vectors for early identification of failures, determining the engine's life cycle before the deficiencies become destructive. For that it will be introduced a kit that allows the measure of voltages and currents which are necessary for the estimation of said vectors. Regarding this kit it will be explored its capabilities of measuring energy and the programming of the embedded microcontroller and its respective peripheral devices.

The kit is connected to an electric motor and respective inverter, in order to obtain data on its voltages and currents. The acquired data is transferred via a serial interface to a computer. This serves as a preparation for the use of wireless communications technology developed within the scope of the Detainer project which supports this work.

This work also includes details on the practical process carried on based on this kit, with reference to several tests and detailed results.

# Conteúdo

<b>1 – Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 – Motivação .....	1
1.2 – Objetivos .....	2
<b>2 – Estado de Arte</b> .....	<b>3</b>
2.1 – Introdução .....	3
2.2 – Manutenção Industrial .....	3
2.2.2 – Exemplo 1 – Solução da empresa <i>ATS</i> num transformador .....	5
2.2.3 – Exemplo 2 – <i>Wind Farms</i> com <i>Microsoft Azure</i> .....	6
2.2.4 – Exemplo 3 – Indústrias de Extração .....	6
2.2.5 – Métodos de Monitorização .....	7
2.3 – Motores de Indução .....	8
2.3.1 – Aspectos Construtivos e Princípio de Funcionamento .....	8
2.3.2 – Comparação de Motores .....	11
2.3.3 – Vibração e Temperatura .....	11
2.3.4 – Grandezas Elétricas .....	13
2.3.5 – Sensor de Temperatura e Vibração .....	13
2.4 – Medidor de Corrente, Tensão e Potência da Texas Instruments .....	16
2.4.1 – Descrição e Funcionalidades .....	16
2.4.2 – Processo <i>Foreground</i> .....	19
2.4.3 – Processo <i>Background</i> .....	22
2.4.4 – Visão Geral .....	24
<b>3 – Implementação do <i>Set-up</i> Experimental</b> .....	<b>28</b>
3.1 – Periféricos utilizados .....	28
3.1.1 – Conversores analógico-digital sigma delta .....	28

3.1.2 – Setup experimental dos conversores analógico-digital sigma delta .....	32
3.1.3 – Porta série UART.....	33
3.1.4 – Setup experimental da porta série UART .....	35
3.2 – Configuração dos registos dos periféricos utilizados.....	36
3.2.1 – Conversores analógico-digital sigma delta.....	36
3.2.2 – Porta série UART.....	42
<b>4 – Ensaaios Experimentais .....</b>	<b>46</b>
4.1 – Resultados obtidos nos conversores analógico-digital <i>sigma delta</i> para o reóstato..	46
4.2 – Resultados obtidos nos conversores analógico-digital <i>sigma delta</i> para o motor.....	57
4.3 – Resultados obtidos na porta série UART .....	61
4.4 – Representação de transmissão de dados no <i>display</i> LCD .....	64
<b>5 – Conclusão e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>69</b>



# Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição temporal das tarefas do projeto.....	2
Figura 2 - Tempos de produção, paragem, reparação e preparação para os 3 tipos de manutenção [4].....	4
Figura 3 - Custos anuais da manutenção de 100 turbinas para os 3 tipos de manutenção [4].....	6
Figura 4 – Motor elétrico de indução e seus componentes [9].....	8
Figura 5 - Secção da chapa do estator (A) e o estator com enrolamentos (B). ....	9
Figura 6 - Modelo do estator e da gaiola de esquilo (A) e visualização do estator, gaiola de esquilo e chapa do rotor (B). ....	9
Figura 7 - Representação do rotor e estator com 2 polos (A) e visualização dos enrolamentos no estator (B).....	10
Figura 8 - Princípio de funcionamento de um motor elétrico.....	10
Figura 9 - Resultados obtidos na análise dos vetores de <i>Park</i> para um motor funcional (A) e para um motor defeituoso (B) [11]. ....	13
Figura 10 - Sensor de temperatura e vibração da Banner [12]. ....	14
Figura 11 – Avaliação de funcionamento de máquinas segundo a norma ISO 10816 [12]. ....	14
Figura 12 - Representação dos dois eixos utilizados para a medição da vibração [12]. ....	15
Figura 13 - Circuito divisor de tensão dos conversores de tensão [13]. ....	17
Figura 14 – Circuito de proteção dos conversores de corrente [13]. ....	18
Figura 15 - Representação das ligações elétricas para a medição da tensão e da corrente para uma fase [13]. ....	18
Figura 16 - Representação das ligações elétricas para a medição da tensão e da corrente para 3 fases [13]. ....	19
Figura 17 – Diagrama de blocos do funcionamento do processo <i>foreground</i> [13]. ....	20
Figura 18 – Diagrama de blocos do funcionamento do processo <i>background</i> [13]. ....	23
Figura 19 – Diagrama de blocos do funcionamento do processo de geração de pulsos [13]. ....	24
Figura 20 - Representação frontal do kit (A) e representação dos periféricos (B) [13]. ....	25
Figura 21 - Entradas para a tensão das 3 fases e do neutro [13]. ....	25
Figura 22 - Entradas para a corrente das 3 fases e tensão do neutro [13]. ....	25
Figura 23 - Representação no LCD do valor da frequência para a fase A [13]. ....	26

Figura 24 - Diagramas de blocos para o funcionamento futuro do projeto (cima) e o funcionamento desta prova de conceito (baixo).....	28
Figura 25 - Funcionamento do filtro digital do conversor sigma delta.....	29
Figura 26 - Funcionamento de 3 conversores com configurações diferentes.....	30
Figura 27 - Funcionamento de 2 conversores agrupados, com configurações diferentes.....	31
Figura 28 - Funcionamento de 1 conversor com atraso de conversão aplicado.....	31
Figura 29 - Funcionamento de 1 conversor com atraso (cima) e de 1 conversor sem atraso (baixo).....	32
Figura 30 - Esquema das ligações elétricas utilizado para a medição da tensão e da corrente no estator.....	33
Figura 31 - Formato da mensagem de envio das amostras dos conversores.....	36
Figura 32 – Setup experimental para medição da tensão e da corrente no reóstato.....	46
Figura 33 - Ligações elétricas para a fase 1.....	47
Figura 34 - Valores obtidos para a tensão da fase 1 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).....	47
Figura 35 - Valores obtidos para a corrente da fase 1 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).....	48
Figura 36 - Ligações elétricas para a fase 2.....	49
Figura 37 - Ligações elétricas para a fase 3.....	49
Figura 38 - Valores obtidos para a tensão da fase 2 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).....	50
Figura 39 - Valores obtidos para a corrente da fase 2 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).....	50
Figura 40 - Valores obtidos para a tensão da fase 3 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).....	51
Figura 41 - Valores obtidos para a corrente da fase 3 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).....	51
Figura 42 – Valores obtidos para a tensão da fase 1 em conversão contínua.....	52
Figura 43 - Valores obtidos para a corrente da fase 1 em conversão contínua.....	52
Figura 44 - Valores obtidos para a tensão da fase 2 em conversão contínua.....	53
Figura 45 - Valores obtidos para a corrente da fase 2 em conversão contínua.....	53
Figura 46 - Valores obtidos para a tensão da fase 3 em conversão contínua.....	54

Figura 47 - Valores obtidos para a corrente da fase 3 em conversão contínua. ....	54
Figura 48 - Ligações elétricas para as 3 fases. ....	55
Figura 49 - Valores de tensão obtidos para as 3 fases. ....	56
Figura 50 - Valores de corrente obtidos para as 3 fases. ....	56
Figura 51 - <i>Setup</i> experimental para medição da tensão e corrente do motor. ....	57
Figura 52 - Ligações elétricas do motor aos conversores do kit. ....	58
Figura 53 - Valores obtidos para as tensões das 3 fases do motor para uma frequência de 15 Hz. .....	58
Figura 54 - Valores obtidos para as correntes das 3 fases do motor para uma frequência de 15 Hz. ....	59
Figura 55 - Valores obtidos para as tensões das 3 fases do motor para uma frequência de 25 Hz. .....	60
Figura 56 - Valores obtidos para as correntes das 3 fases do motor para uma frequência de 25 Hz. ....	60
Figura 57 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 0 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita). ....	61
Figura 58 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 1 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita). ....	62
Figura 59 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 2 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita). ....	62
Figura 60 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 4 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita). ....	63
Figura 61 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 5 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita). ....	63
Figura 62 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 6 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita). ....	64
Figura 63 - Representação de envio de dados no LCD. ....	64
Figura 64 - Representação do estado da transmissão de dados no kit – parte 1. ....	65
Figura 65 - Representação do estado da transmissão de dados no kit - parte 2. ....	65

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação das características de alguns motores elétricos. ....	11
Tabela 2 - Descrição das várias opções de montagem do sensor [12]. ....	15
Tabela 3 - Registos do sensor, descrição e gama de valores [12]. ....	16
Tabela 4 - Símbolos utilizados no LCD e sua representação [13]. ....	26
Tabela 5 - Output do filtro digital e valor dos registos de memória do conversor <i>sigma delta</i> para várias configurações. ....	30
Tabela 6 - Valor do registo UCBRsX para várias partes fracionárias de N. ....	34
Tabela 7 - Valor de vários registos e erros associados para várias <i>baudrates</i> . ....	35
Tabela 8 - Descrição dos bits do registo SD24BCTL0. ....	38
Tabela 9 - Descrição dos bits do registo SD24BCTL1. ....	39
Tabela 10 - Descrição dos bits do registo SD24CTL1 - continuação. ....	39
Tabela 11 - Descrição dos bits do registo SD24BCCTLx. ....	41
Tabela 12 - Descrição dos bits do registo SD24BCCTLx - continuação. ....	41
Tabela 13 - Descrição dos bits do registo UCA0CTLW0. ....	43
Tabela 14 - Descrição dos bits do registo UCA0CTLW0 - continuação. ....	44
Tabela 15 - Descrição dos bits do registo UCA0MCTLW. ....	44

# Acrónimos

<b>ACLK</b>	<i>Auxiliary Clock</i>
<b>ASCII</b>	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
<b>ADC</b>	<i>Analog To Digital Converter</i>
<b>CSA</b>	<i>Current Signature Analysis</i>
<b>EPVA</b>	<i>Extended Park's Vector Approach</i>
<b>ESA</b>	<i>Electrical Signature Analysis</i>
<b>eUSCI</b>	<i>Universal Serial Communication Interface</i>
<b>IIOT</b>	<i>Industrial Internet Of Things</i>
<b>IOT</b>	<i>Internet Of Things</i>
<b>IPSA</b>	<i>Instantaneous Power Signature Analysis</i>
<b>ISM</b>	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
<b>LCD</b>	<i>Liquid Crystal Display</i>
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i>
<b>LSB</b>	<i>Least Significant Bit</i>
<b>MSB</b>	<i>Most Significant Bit</i>
<b>OSR</b>	<i>Oversampling Ratio</i>
<b>SMCLK</b>	<i>Sub-main Clock</i>
<b>SPI</b>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<b>UART</b>	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
<b>VSA</b>	<i>Voltage Signature Analysis</i>

# 1– Introdução

## 1.1 – Motivação

Com o aparecimento da indústria 4.0, cada vez mais empresas têm desenvolvido estratégias de inovação, enquadradas nesta quarta revolução industrial. A procura do aumento da produtividade e da otimização dos processos fabris tem levado as empresas a integrar dispositivos e sistemas *embedded* que beneficiam da tecnologia IOT (*Internet of Things*), para comunicarem entre si e agilizarem os processos. Uma área de bastante interesse para aplicação destas tecnologias na indústria é a manutenção.

Normalmente, a manutenção efetuada é preventiva ou corretiva, duas opções que não são otimizadas e onde podem ser reduzidos custos e implementadas soluções de monitorização. Com esta necessidade, surgiu uma nova vertente da manutenção, a manutenção preditiva. Este novo método, ainda recente na indústria, visa otimizar a manutenção existente atualmente, tomando partido das ferramentas da indústria 4.0 e IIOT (*Industrial Internet of Things*), para implementar soluções de monitorização constante e em tempo real dos equipamentos.

A partir desta monitorização será possível prever eventuais anomalias e agendar uma intervenção ao equipamento, de forma a que esta tenha o menor impacto na produção. Assim, consegue-se um nível de eficiência superior, prevendo a necessidade de manutenção e permitindo a redução dos tempos de paragem, redução de custos de avaria e um aumento do tempo de vida útil dos equipamentos.

A monitorização será facilmente implementável em vários dispositivos, tirando partido da comunicação por redes sem fios. Esta comunicação deverá garantir a transmissão de informação de forma segura.

Este trabalho está integrado no projeto DETAINER (CENTRO-01-0247-FEDER-037204), no qual se exploram casos de uso para a patente "*Method and Apparatus for the Deterministic Capture of a Communication Channel Shared Among Contention-Based Technologies*". Esta solução permite a transmissão de informação de forma determinística e em tempo-real em ambientes onde um excesso de redes de comunicação provoca a impossibilidade de acesso ao meio, comprometendo a transmissão de dados.

## 1.2 – Objetivos

A manutenção preditiva tem como principal objetivo prever a necessidade de manutenção dos equipamentos antes deles avariarem. Para isso é necessário dotá-los de um conjunto de sensores que permitam a monitorização e análise constante. Por conseguinte, passa a ser possível agendar a intervenção, preparando-a de forma a que o impacto na produção seja o menor possível. A manutenção preditiva acaba por apresentar um nível de eficiência superior já que os dados do estado atual do equipamento permitem que a manutenção seja levada a cabo nos momentos cruciais, maximizando a sua vida útil e minimizando o número de intervenções, e, consequentemente, de paragens.

A interligação entre os vários dispositivos/sensores a colocar nos equipamentos representa um desafio para muitas empresas, sendo por vezes difícil ou até mesmo impossível passar as cablagens necessárias à comunicação de dados. Nesses casos, a solução passa pela utilização de tecnologias de comunicação sem fios adaptadas ao ambiente industrial.

Neste contexto, pretende-se estudar a possibilidade de integração da tecnologia patenteada pela *MicroIO* e Universidade de Aveiro que permite a transferência de dados em *hard real time* em ambientes saturados na banda ISM dos 2.4 GHz. O trabalho centrar-se-á em motores de indução e implica a instalação nos mesmos de sensores de vibração e de sensores para medir as grandezas elétricas do motor com vista a determinar falhas a partir dos vetores de *Park*. Existe um kit de desenvolvimento para esta última vertente.

No cronograma da Figura 1 está representada a distribuição das várias tarefas efetuadas no decorrer do projeto.

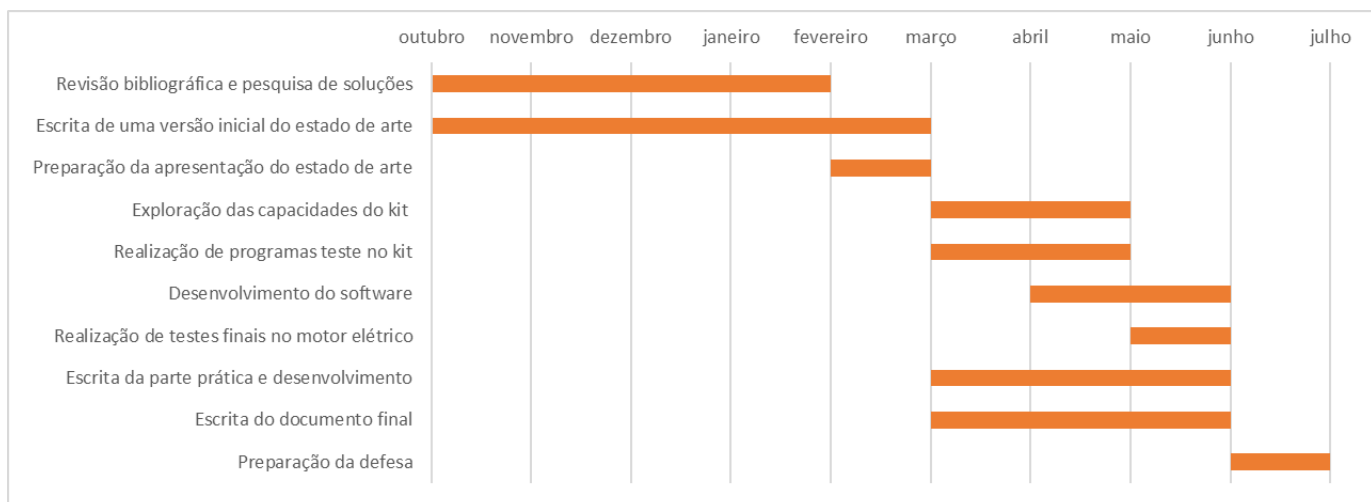


Figura 1 - Distribuição temporal das tarefas do projeto.

# 2 – Estado de Arte

## 2.1 – Introdução

Este capítulo é dedicado a uma breve abordagem à indústria 4.0, com foco na manutenção preditiva de motores. Serão referidos os vários tipos de manutenção existentes na indústria, alguns exemplos de aplicações e vários métodos de monitorização da manutenção.

Também será efetuada uma breve abordagem aos motores elétricos e seu funcionamento, às características de interesse a medir num motor, e a um sensor de medição de algumas dessas características.

Finalmente, será também analisado o kit de medição da *Texas Instruments*, referindo as suas principais funcionalidades e métodos de funcionamento.

## 2.2 – Manutenção Industrial

A manutenção industrial é um processo que visa garantir o bom funcionamento de máquinas na indústria. Tem como objetivo reduzir os tempos de paragem de uma fábrica, aumentar o tempo de produção e aumentar a sua eficácia.

Consiste na reparação ou substituição de componentes/máquinas, controlo dos equipamentos, infraestruturas e o controlo/prevenção de avarias.

### 2.2.1 – Tipos de manutenção

A manutenção industrial pode ser separada em vários tipos, entre os quais:

- Manutenção corretiva;
- Manutenção preventiva;
- Manutenção preditiva.

O foco deste projeto será na manutenção preditiva

#### **Manutenção Corretiva**

Consiste na reparação ou substituição de uma máquina após uma avaria. Apresenta-se como um método bastante ineficaz, que apresenta grandes custos e grandes tempos de paragem. É o método menos utilizado na indústria [1].

#### **Manutenção Preventiva**

É um método que consiste em manutenções regulares e planeadas, no mesmo intervalo de tempo. Tem como objetivo prevenir avarias com manutenções regulares [1]. Estas manutenções são planeadas tendo como base o histórico dos equipamentos, recomendações do fabricante e expectativas do tempo de vida, sendo efetuada mesmo que não sejam detetados problemas. Exige



um tempo de paragem das máquinas planeado que, apesar de ser inconveniente, é bastante inferior ao da manutenção corretiva. É bastante utilizada pelas indústrias por ser eficaz. No entanto apresenta a desvantagem de ser feita manutenção mesmo que não seja necessária num certo equipamento.

No entanto apresenta a desvantagem de ser feita manutenção mesmo que não seja necessária num certo equipamento [1].

### Manutenção Preditiva

Este método consiste na recolha e análise de dados em tempo real de uma máquina. Tem como objetivo prever uma falha no seu estado inicial e atuar sobre ela de forma a ser realizada a manutenção mais eficiente e permitir a otimização do ciclo de vida do equipamento, antes da sua avaria, reduzindo consideravelmente os custos [1]. É realizada sem tempo de paragem da máquina. Caso seja necessário efetuar a paragem de uma máquina, o tempo correspondente é normalmente bastante inferior ao dos outros métodos. Esta abordagem é relativamente recente na indústria e está em crescimento, embora seja mais complexa e tenha de recorrer a tecnologia avançada de tratamento e recolha de dados e a inteligência artificial [2].

As soluções são baseadas na aquisição e transformação de dados, monitorização e avaliação de vários aspetos importantes para o bom funcionamento de um equipamento. Estas soluções incluem técnicas de teste, medição e recolha de dados em tempo real, via redes sem fios.

Estima-se uma redução dos custos de manutenção de 25-30%, redução do tempo de paragem em 35-45% e uma diminuição de paragens por avaria de 70-75% [3].

É um método relativamente caro e complexo de implementar, mas que apresenta grandes reduções de custo a longo prazo, sendo o seu custo total significativamente inferior aos outros tipos de manutenção [2].

Na Figura 2 é apresentada uma comparação dos tempos de planeamento e de paragem para os vários tipos de manutenção.

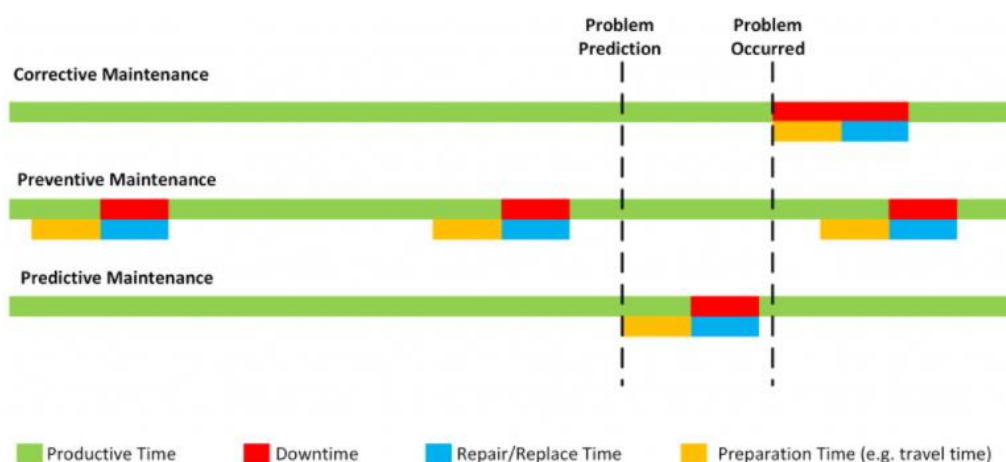


Figura 2 - Tempos de produção, paragem, reparação e preparação para os 3 tipos de manutenção [4].

É possível observar que a manutenção corretiva apresenta o maior tempo de paragem. A manutenção preventiva, apesar de apresentar um tempo de paragem inferior à corretiva, é efetuada periodicamente. A manutenção preditiva é efetuada somente quando necessário, apresentando assim os menores tempos de paragem.

De seguida são apresentados alguns exemplos da aplicação da manutenção preditiva. A escolha destes exemplos permite reforçar as vantagens deste tipo de aplicação, nomeadamente a redução significativa dos custos para todos exemplos indicados.

No primeiro exemplo observa-se a redução de custos e tempos de paragem com a deteção de uma falha numa fase inicial.

No segundo exemplo observa-se também uma redução de custos, em comparação com os outros tipos de manutenção, mas também se verifica uma maior facilidade de monitorização, através da monitorização remota de locais de difícil acesso.

No terceiro exemplo observa-se a importância da utilização da manutenção preditiva na prevenção de falhas em indústrias que envolvem máquinas bastante complexas em ambientes remotos e em que os tempos de paragem originam perdas de lucro bastante elevadas.

### **2.2.2 – Exemplo 1 – Solução da empresa *ATS* num transformador**

Este exemplo apresenta um fabricante de produtos de isolamento a altas temperaturas, o qual contratou serviços da empresa *ATS* para a manutenção de equipamentos que atuam em condições extremas.

Os técnicos efetuaram medições a todos os equipamentos periodicamente. Foi utilizado um sistema que permite a leitura de infravermelhos para avaliar a temperatura dos transformadores (cujo acesso não é direto) e verificou-se que um dos transformadores apresentava uma temperatura bastante superior à normal. O transformador em causa alimentava toda uma linha de produção e a sua avaria implicaria a paragem de grande parte da fábrica [5].

Após planeamento e inspeção ao transformador, observou-se que o transformador perdera óleo mineral utilizado no seu sistema de arrefecimento, o que causou o degradamento dos seus enrolamentos. A sua manutenção foi efetuada numa pausa planeada, não apresentando nenhum tempo de paragem.

Caso tivesse existido avaria no transformador, foi estimado um tempo de paragem de pelo menos 12 horas. Também foi estimada uma poupança de 43.000€ com a prevenção da avaria e não existiu nenhuma perda material [5].

### 2.2.3 – Exemplo 2 – Wind Farms com Microsoft Azure

Este exemplo é referente à indústria das eólicas. As eólicas estão localizadas em locais isolados e bastante afastados das cidades ou de difícil acesso, sendo muito cara a realização de manutenção permanente nestas localizações. Mesmo para pequenas falhas estes custos são bastante elevados.

O uso da manutenção preditiva permite estimar o tempo de vida dos equipamentos e realizar manutenções somente quando a probabilidade de falha for significativa. O processo consiste na instalação de sensores IOT nas turbinas, enviando os dados para uma *cloud* para posterior análise e armazenamento de histórico, emissão de relatórios e aplicação de *machine learning* [4].

Considerando o caso de 100 turbinas e experiência anterior, foram determinados os custos para a manutenção corretiva, preventiva e preditiva. Observou-se que, comparando a manutenção preventiva com a preditiva, esta última apresentou menos 79% de custos [4]. Na Figura 3 é possível observar a comparação dos vários custos para os 3 tipos de manutenção.

	Corrective Maintenance	Preventive Maintenance	Predictive Maintenance
number of devices (wind turbines)	100	100	100
probability of failure of the device without preventive/predictive actions per year	5.00%	5.00%	5.00%
probability of failure of the device with preventive/predictive actions per year	5.00%	1.00%	0.50%
number of unpredicted failures per year	5	1	0.5
number of preventive inspections per device per year	0	6	0
total number of inspections per year	0	600	25
average cost of inspecting one device	\$100	\$100	\$100
average cost of downtime during planned inspection	N/A	\$200	\$200
average cost of parts replacement after the failure	\$100,000	\$100,000	\$100,000
average cost of downtime after the failure	\$400	\$400	\$400
annual cost of inspections	\$0	\$60,000	\$2,500
annual cost of downtime during inspections	\$0	\$120,000	\$5,000
annual cost of parts replacement after the failure	\$500,000	\$100,000	\$50,000
annual cost of downtime after the failure	\$2,000	\$400	\$200
<b>total annual cost</b>	<b>\$502,000</b>	<b>\$280,400</b>	<b>\$57,700</b>
cost savings vs Preventive Maintenance			\$222,700
% cost savings vs Preventive Maintenance			79%

assumption about machine learning algorithm effectiveness:  
 \* precision = 20%  
 \* recall = 90%

Figura 3 - Custos anuais da manutenção de 100 turbinas para os 3 tipos de manutenção [4].

### 2.2.4 – Exemplo 3 – Indústrias de Extração

As indústrias de extração (mineiras, petrolíferas, etc) apresentam requisitos de manutenção bastante específicos, muito frequentemente em locais bastante remotos. A sua difícil localização implica o envio de equipas de manutenção para o local, provocando grandes gastos diretos e nos tempos de deslocamentos.

Alguns dos equipamentos destas indústrias são bastante grandes e complexos e o seu mau funcionamento pode causar grandes prejuízos. A manutenção preditiva tem grande valor para estas indústrias, complementando a monitorização remota com o planeamento da manutenção, bem como a diminuição dos tempos de paragem.

Nestas indústrias os tempos de paragem implicam perdas bastante grandes:

- As indústrias petrolíferas podem retirar mais de um milhão de dólares por dia em petróleo [6];
- A maior máquina de mineração pode escavar por dia minério com o valor de 5 milhões de dólares [6].

Portanto, caso haja alguma avaria em alguma máquina, o custo associado pode atingir valores dos milhares, dezenas ou centenas de milhares de euros ou dólares por hora, em redução de produção [6].

## 2.2.5 – Métodos de Monitorização

Existem várias técnicas para efetuar a monitorização dos equipamentos, mas que podem ser separadas em dois tipos principais:

- Monitorização Invasiva
- Monitorização Não invasiva

### Monitorização Invasiva

A monitorização invasiva é ideal para o diagnóstico de efeitos localizados e distribuídos [7].

Apresenta a desvantagem de utilizar sensores caros e da necessidade da instalação dos sensores no equipamento, não sendo sempre possível ter acesso ao equipamento de forma correta para obter resultados precisos.

Alguns exemplos são:

- Análise de emissões acústicas;
- Análise sonora;
- Análise térmica;
- Análise das vibrações;
- Análise química.

### Monitorização Não Invasiva

A monitorização não invasiva não utiliza sensores implantados diretamente no equipamento e, portanto, não necessita de acesso direto ao mesmo para ser implementada. Permite a monitorização de equipamentos que estão localizados em zonas de acesso mais difícil [7].

Alguns exemplos são:

- Análise da corrente e tensão de alimentação do motor;
- Análise da corrente (MCSA);
- Análise da corrente do estator através da análise dos vetores de *Park*;
- Análise de consumo instantânea (IPA).

## 2.3 – Motores de Indução

Os motores de indução são uma máquina elétrica bastante utilizada na indústria, por serem relativamente simples, robustos e de fabrico económico. Apresentam um estator e um rotor separados por um entreferro. O rotor é normalmente apoiado por rolamentos [8].

Um motor de indução distingue-se de outros tipos de motores porque no estator e no rotor existem enrolamentos onde circula corrente alternada. A corrente dos enrolamentos do estator é proveniente da tensão de alimentação e no rotor a corrente é originada pelas tensões nele induzidas, sendo este o motivo da designação de máquina de indução.

Os motores de indução podem ser classificados em monofásicos e polifásicos. No âmbito deste projeto serão somente referenciados os motores trifásicos. Os motores de indução podem também ser classificados como motores síncronos e motores assíncronos. Na Figura 4 estão representados os vários componentes de um motor de indução.

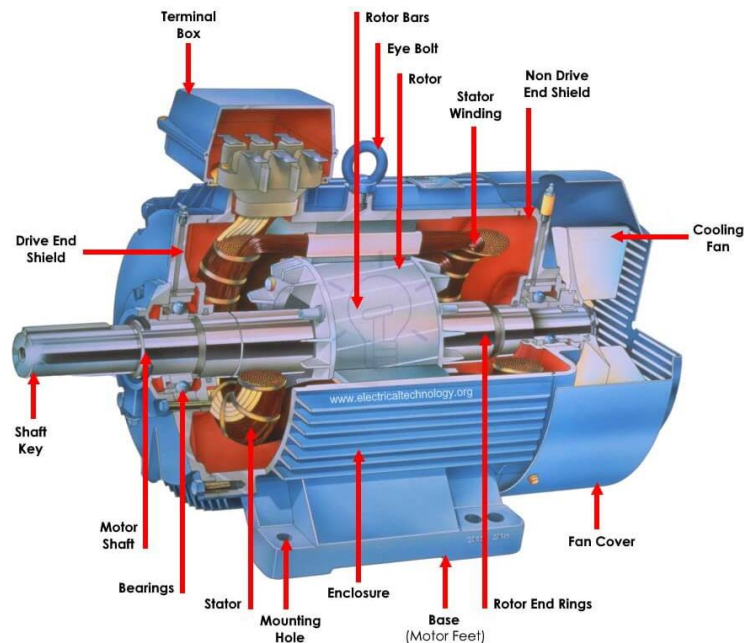


Figura 4 – Motor elétrico de indução e seus componentes [9].

### 2.3.1 – Aspectos Construtivos e Princípio de Funcionamento

Os motores de indução são constituídos por componentes, entre os quais se destacam:

- Estator;
- Enrolamentos do estator;
- Rotor;
- Entreferros.

O estator é composto por um conjunto de chapas de aço, com ranhuras, onde são inseridos os enrolamentos. Na Figura 5 observa-se o desenho da secção de uma chapa do estator com enrolamentos.

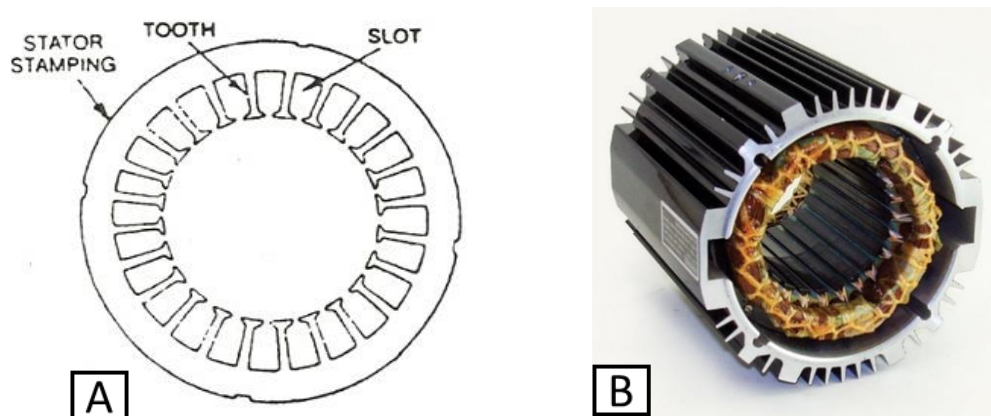


Figura 5 - Secção da chapa do estator (A) e o estator com enrolamentos (B).

O rotor também é constituído por chapas de aço com ranhuras onde são inseridos os condutores. Este pode ser de dois tipos:

- Gaiola de esquilo: é constituído por barras de cobre ou alumínio, inseridas em ranhuras de ferro, que estão curto-circuitadas nos topos por anéis do mesmo material das barras.
- Rotor bobinado: o rotor apresenta um enrolamento idêntico ao do estator e é inserido em ranhuras, de forma análoga à do estator. Muitas vezes apresentam três anéis que permitem controlar a corrente no exterior.

Na Figura 6 são apresentados o rotor e a gaiola de esquilo.

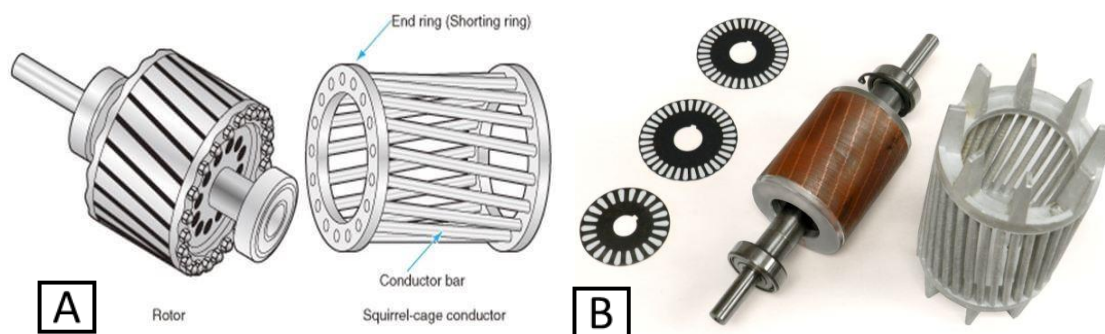


Figura 6 - Modelo do estator e da gaiola de esquilo (A) e visualização do estator, gaiola de esquilo e chapa do rotor (B).

Os enrolamentos do estator são distribuídos em pares de polos, sendo a respetiva configuração variável conforme a aplicação do motor. Este método é habitualmente utilizado para permitir um melhor uso do ferro e do cobre e para controlar a velocidade de rotação. Na Figura 7 estão representados um rotor e estator com 2 polos e os respetivos enrolamentos.



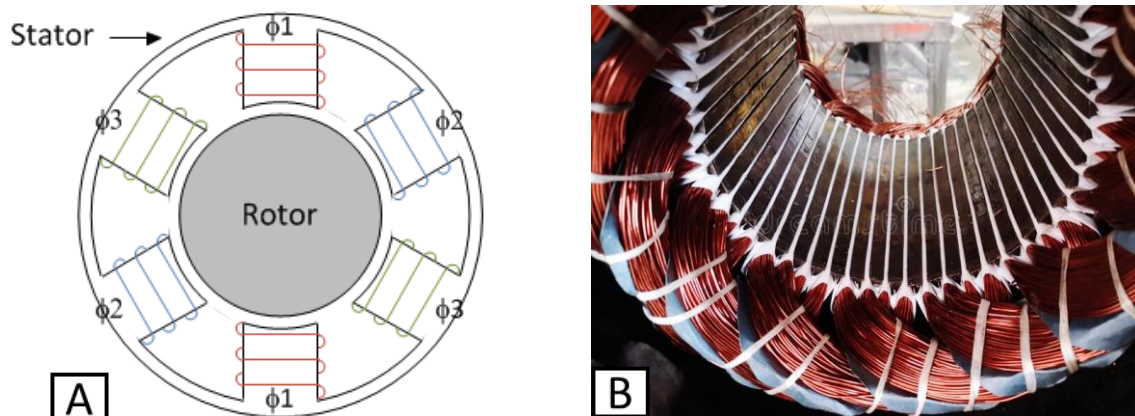


Figura 7 - Representação do rotor e estator com 2 polos (A) e visualização dos enrolamentos no estator (B).

O entreferro serve para separar o estator do rotor. Nos motores de indução a distância dos entreferros entre o estator e o rotor é uniforme.

Considerando um motor trifásico, em que os enrolamentos do estator são alimentados por um sistema de tensões trifásico (cujas correntes estão desfasadas  $120^\circ$  entre si), vai ser criado um campo magnético girante que irá atravessar o circuito do rotor. Vão ser induzidas tensões nos condutores do rotor que permitem que circulem correntes proporcionais à tensão induzida. Estas correntes vão interagir com o campo magnético girante, originando forças nos condutores do rotor. Estas forças dão origem ao binário mecânico. O rotor vai girar no sentido do campo girante e a sua velocidade será sempre ligeiramente inferior à do campo girante – motor assíncrono. Na Figura 8 está representado o funcionamento explicado anteriormente.

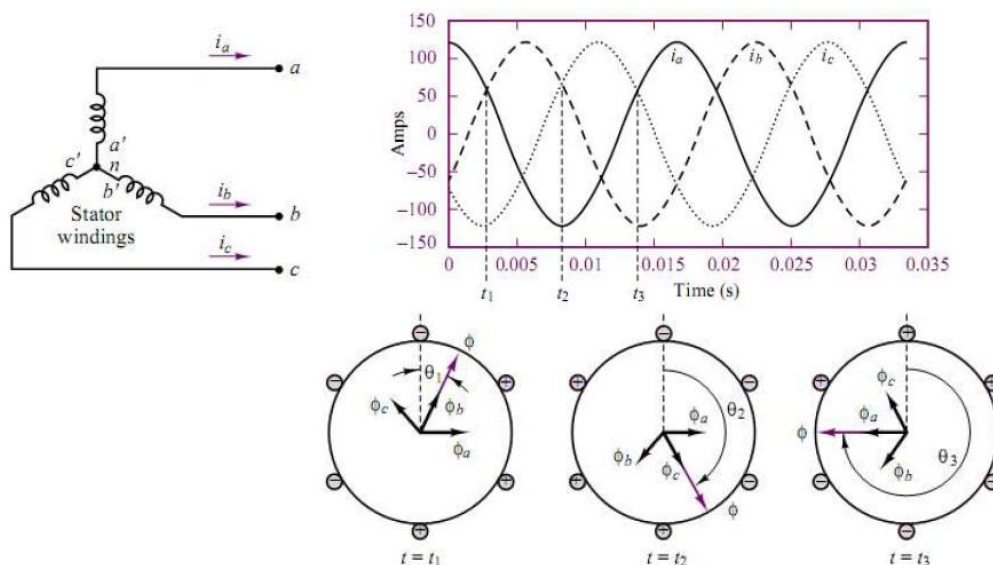


Figura 8 - Princípio de funcionamento de um motor elétrico.

## 2.3.2 – Comparação de Motores

O trabalho descrito nesta dissertação permite ser aplicado a uma grande variedade de motores de indução trifásicos, desde os motores mais pequenos a grandes motores de elevada potência. Na Tabela 1 são apresentados e comparados alguns motores de várias dimensões e potências em que se pode integrar a solução proposta neste projeto.

**Tabela 1 - Comparação das características de alguns motores elétricos.**

Marca	Mini Motor	Siemens	ABB
Referência	AM 330M3T	1LE1004-1DA3	3GBA281270-F
Site	<a href="https://www.minimotor.com/en/products/am-threephase-mini-motor/">https://www.minimotor.com/en/products/am-threephase-mini-motor/</a>	<a href="https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_1026989/v1/Motors-D81.1-complete-English-06-2020.pdf">https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_1026989/v1/Motors-D81.1-complete-English-06-2020.pdf</a>	<a href="https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108196&amp;LanguageCode=en&amp;DocumentPartId=&amp;Action=Launch">https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108196&amp;LanguageCode=en&amp;DocumentPartId=&amp;Action=Launch</a>
Potência (W)	180	15.000	90.000
Velocidade nominal (rpm)	2.700	3.000	2.970
Torque nominal (Nm)	0,65	48	289
Tensão (V)	Estrela: 400 Triângulo: 230	Estrela: 400 Triângulo: 230	400 V
Corrente (A)	Estrela: 0,52 Estrela: 0,9	26 A a 400 V	152
Outros:	2 pólos Rotor gaiola de esquilo Enrolamentos classe F Proteção IP65 Travão eletromagnético Encoder Tamanho 330 M	2 pólos Rotor gaiola de esquilo Fator de potência 0,9 Tamanho 160 M Peso 98 kg Ventilação própria	2 pólos Fator de potência 0,91 Tamanho 280 SMG Peso 576 kg

Para avaliar o estado de vida do motor, será necessário medir e analisar algumas grandezas. Estas grandezas são mecânicas, sendo um bom indicador do estado da máquina elétrica. As grandezas a medir serão então:

- Vibração;
- Temperatura.

Também serão analisadas algumas grandezas elétricas que, juntamente com as mecânicas, permitem uma melhor avaliação do estado do motor. Estas são:

- Tensão no estator;
- Corrente no estator;
- Potência.

## 2.3.3 – Vibração e Temperatura

### Vibração

A análise de vibrações é uma das técnicas mais usadas na manutenção preditiva de equipamentos rotativos na indústria. A vibração é um dos primeiros indicadores do estado de vida de uma máquina.

Todos os equipamentos rotativos geram um sinal de frequência único. Estes sinais são normalmente lidos em gráficos amplitude/tempo, permitindo obter a sua forma de onda. Sinais individuais combinados formam uma forma de onda complexa, apresentando a vibração geral da



máquina. O reconhecimento de padrões nas formas de onda é fundamental na análise das vibrações. As 4 razões mais comuns que causam vibrações em excesso são:

- Desalinhamento;
- Folgas;
- Falha no rolamento;
- Desequilíbrio.

As vibrações podem ser medidas no veio ou na caixa do motor. É recomendado obter medidas para os dois casos. As medidas devem ser efetuadas nos mesmos locais do motor, durante o mesmo tempo de operação, e com carga e velocidades semelhantes. As condições de velocidade máxima ou carga máxima apresentam as melhores condições de monitorização. No entanto, caso não seja possível, 80% da velocidade é suficiente para obter valores satisfatórios.

Mais de metade das falhas em motores devem-se ao mau funcionamento do rolamento, resultando em vibrações excessivas antes da falha. Motores que operem em ciclos variáveis podem desenvolver problemas causados por tensão acumulada no rotor, a qual é descarregada pelo rolamento até ao estator, danificando o rolamento [7].

As falhas no estator são identificadas pela qualidade do isolamento dos enrolamentos e das fases do motor. As bobinas do estator podem-se mover durante a operação do motor, especialmente no seu arranque. No arranque, a corrente nas bobinas está no seu ponto mais elevado, resultando em forças eletromagnéticas bastante elevadas, fazendo com que os enrolamentos vibrem a 2 vezes a frequência da linha. Estas vibrações fazem as bobinas moverem-se, resultando em danos no estator, rotor ou outros componentes internos.

O desalinhamento e falha nos rolamentos também podem fazer com que o motor choque contra o estator, danificando o isolamento dos enrolamentos e podendo causar curto-circuitos nos enrolamentos, provocando um aumento excessivo de temperatura no motor e danos ao estator ou rotor.

## **Temperatura**

Uma grande parte das falhas de motores deve-se a problemas de isolamento nos enrolamentos de cada fase do estator [7]. Esta falha, num sistema trifásico equilibrado, causa a circulação de correntes elevadas nos enrolamentos, causando um aumento excessivo de temperatura nas zonas de falha. O calor é proporcional ao quadrado da corrente e, se o valor limite for ultrapassado, o motor pode ser destruído [7].

Os materiais utilizados para isolamento elétrico são danificados em situações de excesso de temperatura, cargas elevadas, esforços mecânicos ou tensões transientes. No entanto, a degradação por excesso de temperatura é a principal causa de degradação do isolamento do estator. O isolamento deteriora-se rapidamente acima do limite de temperatura. É considerado que, por cada 10 °C acima do limite de temperatura, o tempo de vida do motor é reduzido a metade [7].

### 2.3.4 – Grandezas Elétricas

A análise das grandezas elétricas de um motor é crucial para avaliar o estado da máquina elétrica. Estas grandezas normalmente são a corrente e tensão no estator e a potência. A variação destas grandezas geralmente é analisada e comparada com padrões de erro.

Existem vários métodos de análise ESA (*Electrical Signature Analysis*), entre os quais CSA (*Current Signature Analysis*), VSA (*Voltage Signature Analysis*), EPVA (*Extended Park's Vector Approach*), IPSA (*Instantaneous Power Signature Analysis*) [10]. A vantagem destes métodos consiste na utilização de métodos não invasivos, não sendo necessária a instalação de sensores em partes rotativas, e o facto de poder ser aplicável a qualquer motor de indução. Também apresenta uma boa capacidade de monitorização, bem como a redução da exposição humana a eventuais riscos. Estes métodos apresentam sensibilidade aos defeitos mecânicos do motor, e devem ser utilizados simultaneamente com os métodos mecânicos para aumentar a eficácia da monitorização.

Para além da análise da tensão e corrente do estator, o foco da análise está baseado na utilização dos vetores de *Park*. Esta análise consiste na monitorização das correntes do estator e posterior análise computacional. É possível distinguir um motor funcional de um motor defeituoso através dos vetores de *Park* da corrente do estator. No caso do motor funcional, os vetores de *Park* representam um padrão circular, enquanto que num motor defeituoso os vetores de *Park* representam um padrão elíptico, mais distorcido [11]. O defeito pode ser determinado através das características da elipse. Na Figura 9 estão representados os resultados obtidos pela análise dos vetores de *Park* para um motor funcional e para um motor defeituoso.

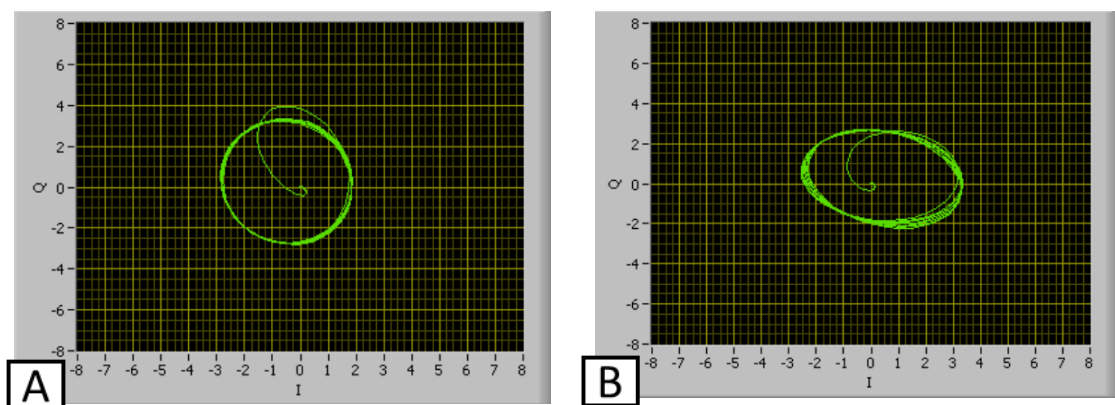


Figura 9 - Resultados obtidos na análise dos vetores de *Park* para um motor funcional (A) e para um motor defeituoso (B) [11].

### 2.3.5 – Sensor de Temperatura e Vibração

O sensor de vibrações e temperatura da *Banner* é um dispositivo utilizado em várias máquinas rotativas, para identificar e prever falhas. Apresenta deteção da vibração em 2 eixos e

medições precisas da temperatura e da vibração. Funciona como *slave* Modbus via RS-485 [12]. O sensor está representado na Figura 10.



Figura 10 - Sensor de temperatura e vibração da Banner [12].

As características deste sensor são:

- Tensão de alimentação: 3.6 – 5.5 V dc ou 10 – 24 V dc
- Corrente de 8.8 mA a 24 V dc
- Comunicação RS-485: *Baudrates* de 9.6k, 19.2k(*default*) ou 38.4k bits/s. Mensagem com 8 data bits, sem paridade(*default*) e 1 stop bit. Paridade par ou ímpar disponível
- Gama de temperatura entre -40 °C e 105 °C, com uma resolução de 1 °C e precisão de  $\pm 3$  °C

As características para a vibração são:

- Ressonância da base de 4,5 kHz nominal
- Gama entre 0 e 46 mm/s
- Precisão de  $\pm 10\%$  a 25 °C
- Frequência de amostragem de 20 kHz (*default*)
- Duração de amostra de 0.4 segundos (*default*)

Este sensor segue a norma a ISO 10816, que descreve indicações gerais para a avaliação da vibração de máquinas em partes não rotativas. Estabelece os procedimentos para a medição e classificação da vibração mecânica de vários equipamentos [12]. Na Figura 11 estão representadas as várias categorias para diferentes classes de máquinas.

Machine		Class I Small Machines	Class II Medium Machines	Class III Large Rigid Foundation	Class IV Large Soft Foundation
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	1.10	28.0		unacceptable	
	1.77	45.9			

Figura 11 – Avaliação de funcionamento de máquinas segundo a norma ISO 10816 [12].

## Instalação do sensor

Para efetuar medições de vibração corretamente, o eixo X deve estar alinhado com o veio do motor, ou axialmente, e o eixo Z deve ser colocado no motor, ou radialmente [12]. Na Figura 12 estão representados os dois eixos em relação ao sensor.

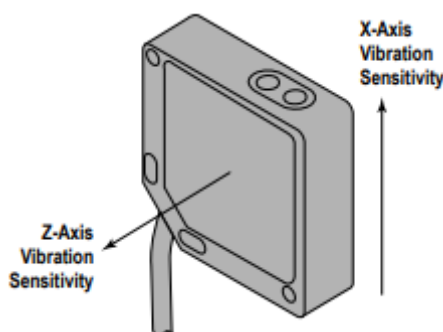


Figura 12 - Representação dos dois eixos utilizados para a medição da vibração [12].

Para obter os melhores resultados, o sensor deve ser instalado o mais próximo possível do rolamento do motor. Não sendo possível, deve então ser instalado numa superfície que esteja conectada com as vibrações características do motor. O uso de proteções ou montagens flexíveis pode afetar a qualidade da detecção de certas vibrações [12]. Na Tabela 2 são apresentadas e descritas várias opções de montagem do sensor, da menos eficaz para a mais eficaz.

Tabela 2 - Descrição das várias opções de montagem do sensor [12].

Mounting Options	Effectiveness	Description
<b>BWA-HW-057</b> Thermally Conductive Adhesive tape	Least effective	Often provides a more than sufficient mounting type but does introduce some additional flex that reduces accuracy
<b>BWA-BK-001</b> Flat magnet sensor bracket		Gives a solid, strong, and adjustable mount to a motor, but with a motor's curved surface it may not provide the best connection if the motor is too small for the magnet to get a full connection with the motor housing.  Magnet mounts are susceptible to accidentally rotation or change in sensor location if an outside force bumps or moves the sensor. This can lead to a change in sensor information that differs from the time-trended data from the previous location.
<b>BWA-BK-008</b> Curved surface magnet attached to sensor bracket via ¼-28 bolt		Curved surface magnet mounts may provide a stronger mount to smaller curved motor surfaces than a flat magnet mount and need to be oriented in the correct direction for the strongest mount.  If the magnet feels loose, rotate the magnet 45° or 90° and check again for the strongest connection. Magnet mounts are susceptible to accidentally rotation or change in sensor location if an outside force bumps or moves the sensor. This can lead to a change in sensor information that differs from the time-trended data from the previous location.

Mounting Options	Effectiveness	Description
<b>BWA-BK-002</b> or <b>BWA-BK-005</b> Flat bracket epoxied to motor and sensor screwed to bracket  Recommend using an epoxy designed for accelerometer mounting, such as Loctite Depend 330 and 7388 activator.		Epoxying a bracket to a motor provides a permanent installation of the bracket to which the sensor can be attached.  This more rigid mounting solution ensures some of the best sensor accuracy and frequency response, but is not flexible for future adjustments.
<b>BWA-BK-002</b> or <b>BWA-BK-005</b> Flat bracket with direct screw mount to motor and sensor	Most effective	When available, directly mounting the bracket to the motor using a ¼-28 bolt provides a rigid surface with the highest sensor accuracy and frequency response.  This mounting option offers flexibility for future sensor and bracket movement.

À partida, são efetuadas medições a cada 5 segundos. Este valor pode ser alterado através do *software* do sensor. Valores de temperatura acima e abaixo dos limites máximo e mínimo terão

o valor do registo máximo e mínimo, respetivamente. Na Tabela 3 são apresentados os vários registos do sensor e o seu respetivo valor mínimo e máximo.

Tabela 3 - Registos do sensor, descrição e gama de valores [12].

Modbus Register Alias Address	Modbus Register Address	Description	I/O Range		Holding Register Representation	
			Min	Max	Min (dec)	Max (dec)
45201	42401	Z-Axis RMS Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45202	42403	Z-Axis RMS Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45203	40049	Temperature (°F) <sup>3</sup>	-327.68	327.67	-32768	32767

Modbus Register Alias Address	Modbus Register Address	Description	I/O Range		Holding Register Representation	
			Min	Max	Min (dec)	Max (dec)
45204	40043	Temperature (°C) <sup>3</sup>	-327.68	327.67	-32768	32767
45205	42451	X-Axis RMS Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45206	42453	X-Axis RMS Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45207	42407	Z-Axis Peak Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45208	42457	X-Axis Peak Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45209	42405	Z-Axis Peak Velocity Component Frequency (Hz) <sup>4, 5</sup>	0	6553.5	0	65535
45210	42455	X-Axis Peak Velocity Component Frequency (Hz) <sup>4, 5</sup>	0	6553.5	0	65535
45211	42406	Z-Axis RMS Acceleration (G) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45212	42456	X-Axis RMS Acceleration (G) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45213	42409	Z-Axis Kurtosis <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45214	42459	X-Axis Kurtosis <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45215	42408	Z-Axis Crest Factor <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45216	42458	X-Axis Crest Factor <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45217	42402	Z-Axis Peak Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45218	42404	Z-Axis Peak Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45219	42452	X-Axis Peak Velocity (in/sec) <sup>1, 5</sup>	0	6.5535	0	65535
45220	42454	X-Axis Peak Velocity (mm/sec) <sup>2, 5</sup>	0	65.535	0	65535
45221	42410	Z-Axis High-Frequency RMS Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
45222	42460	X-Axis High-Frequency RMS Acceleration (G) <sup>2, 6</sup>	0	65.535	0	65535
	46101	Baud	0=9.6k, 1=19.2k (default), 2=38.4k			
	46102	Parity	0=none (default), 1=odd, 2=even			
	46103	Modbus Slave Address	1 (default) through 247			
	42601	Rotational Speed (RPM) (default = 1725 RPM) -- Used in vibration spectral band measurements	0	65535	0	65535
	42602	Rotational Speed (Hz) (default = 29 Hz) -- Used in vibration spectral band measurements	0	65535	0	65535

## 2.4 – Medidor de Corrente, Tensão e Potência da Texas Instruments

### 2.4.1 – Descrição e Funcionalidades

O EVM430-F67791A é um módulo de medição de grandezas elétricas permitindo a análise de sinais trifásicos. É baseado no microcontrolador MSP430F67791A. Este kit foi desenvolvido para aplicações de baixo consumo e com o objetivo de efetuar medições de potências tensões e correntes em ambiente industrial. Estão integrados vários periféricos que complementam as funcionalidades disponíveis do microcontrolador. Apresenta 7 inputs que permitem efetuar a medição de 3 tensões e 3 correntes, um para cada fase, e 1 para efetuar medição da tensão no

neutro, ou seja, 4 conversores de tensão e 3 conversores de corrente. Algumas funcionalidades do kit são:

- Aplicação em tempo real;
- *Software* de metrologia próprio;
- Fontes de alimentação isoladas e capacitivas equipadas;
- *Display* LCD de 160 segmentos;
- Calibração e apresentação de resultados via RS-232;
- 6 interfaces de comunicação série universal eUSCI
- ADC de 10 bits com 6 canais externos e 2 internos;
- 7 conversores *sigma delta* de 24 bits;
- *Clock* interno de 25 MHz;
- CPU de 32 bits;
- Suporta tensões AC de 120/230 V a 50/60 Hz;
- Suporte para vários sensores.

A medição das correntes e das tensões realiza-se através do módulo SD24, que contém 7 conversores *sigma delta*. A distribuição de cada conversor é a seguinte:

- Conversor 0: A0.0+ e A0.0- → Tensão V1
- Conversor 1: A1.0+ e A1.0- → Tensão V2
- Conversor 2: A2.0+ e A2.0- → Tensão V3
- Conversor 3: A3.0+ e A3.0- → Tensão Neutro
- Conversor 4: A4.0+ e A4.0- → Corrente I1
- Conversor 5: A5.0+ e A5.0- → Corrente I2
- Conversor 6: A6.0+ e A6.0- → Corrente I3

O conversor 3 é habitualmente utilizado para medir a tensão do neutro. Neste trabalho a medição da tensão do neutro não é relevante, e, portanto, este conversor não será utilizado.

A tensão de cada conversor não deve exceder  $\pm 930\text{mV}$ , quando o seu ganho é unitário. O kit disponibiliza *hardware* que permite a ligação fácil e rápida de tensões e correntes alternadas diretamente ao motor. Cada conversor de tensão está conectado a um circuito de segurança seguido de um divisor resistivo. Este circuito reduz a tensão, tipicamente de 230 V, para uma gama de valores inferior a 930 mV. Este divisor resistivo diminui o valor da tensão de 230 V de pico para 779 mV de pico, garantindo assim uma margem de segurança superior a 15% e permitindo medições seguras durante períodos de picos de tensões. O circuito implementado está representado na Figura 13.

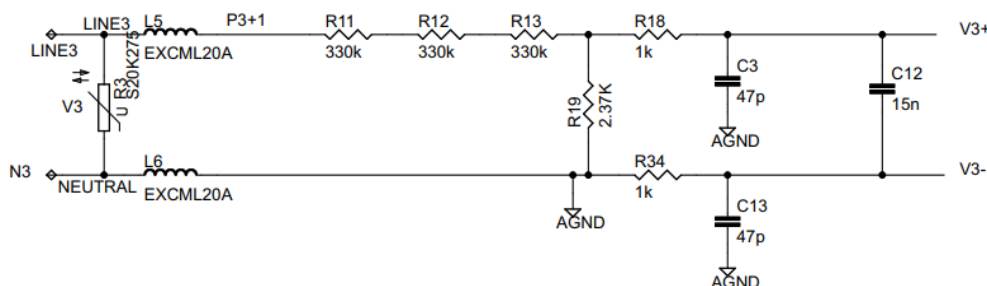


Figura 13 - Circuito divisor de tensão dos conversores de tensão [13].

Cada conversor de corrente está conectado a um transformador de corrente que garante que a tensão do conversor não ultrapasse os 930 mV. O rácio do transformador de corrente implementado neste kit é de 2000:1, permitindo a medição segura de correntes até 100 A. O circuito implementado está representado na Figura 14.

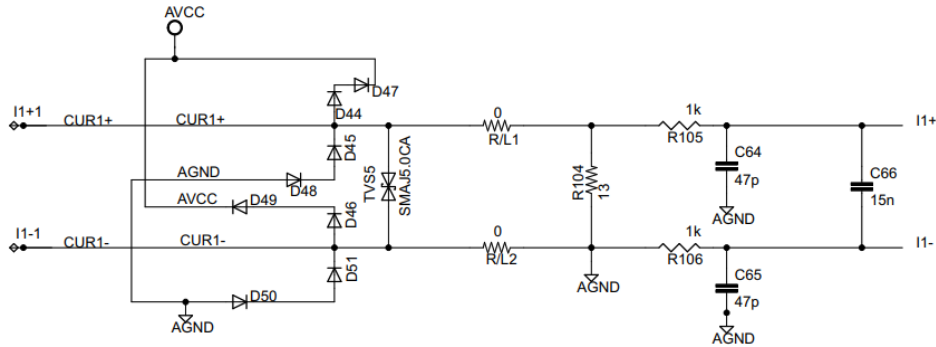


Figura 14 – Circuito de proteção dos conversores de corrente [13].

Na Figura 15 está representado o esquema elétrico para a medição da tensão e corrente para uma fase.

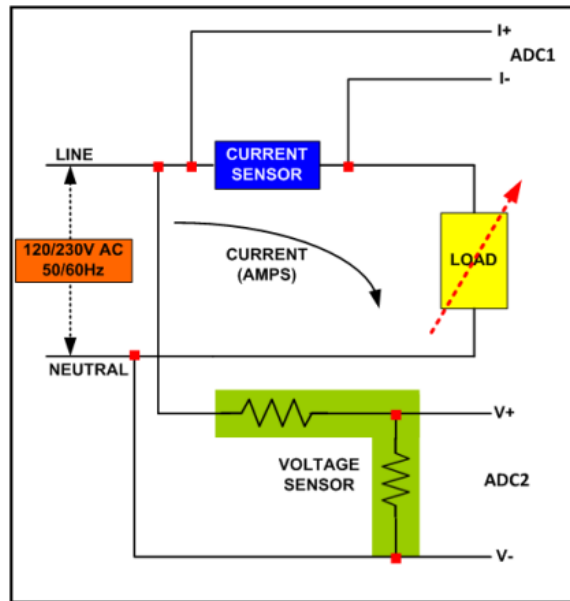


Figura 15 - Representação das ligações elétricas para a medição da tensão e da corrente para uma fase [13].

Na Figura 16 está representado o esquema elétrico para a medição das tensões e das correntes das 3 fases, associado a cada conversor do kit.

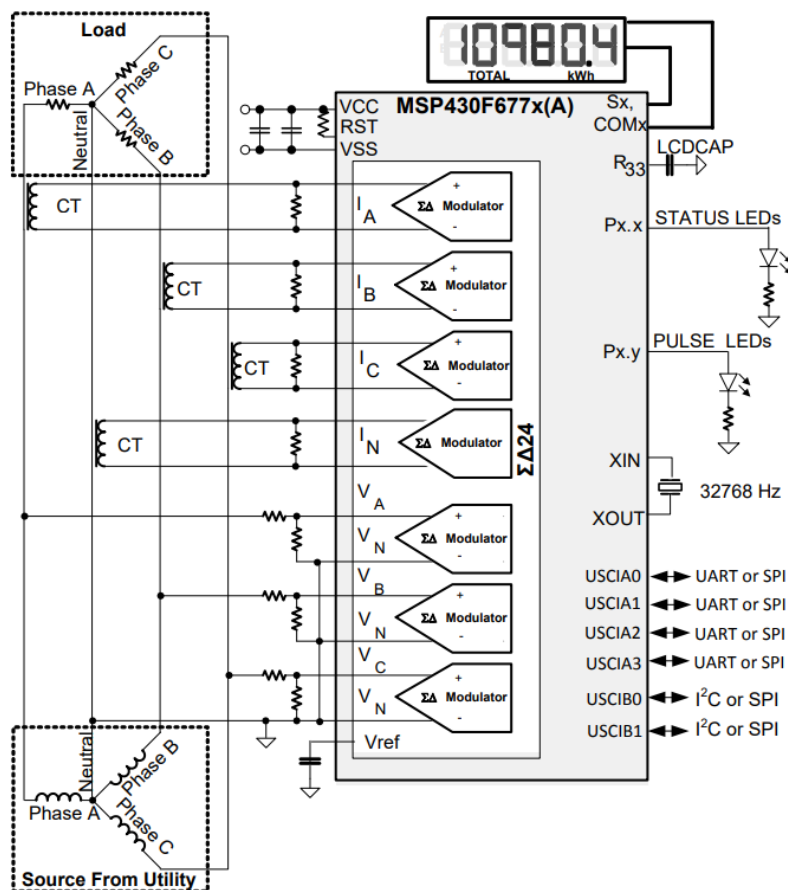


Figura 16 - Representação das ligações elétricas para a medição da tensão e da corrente para 3 fases [13].

A empresa que desenvolveu o kit, a *Texas Instruments*, disponibiliza um programa que permite efetuar facilmente a leitura das tensões e correntes, calcular potências e frequências. O programa é fornecido para o SDK da *IAR Systems*, software utilizado para a programação de aplicações embutidas. O programa é alterável e consiste principalmente em dois processos: o processo *foreground* e o processo *background*.

### 2.4.2 – Processo *Foreground*

O processo *foreground* é responsável pela inicialização do software e hardware do kit. Após o *setup* do hardware, este processo aguarda que o processo *background* obtenha todas as medições para realizar o cálculo de vários parâmetros, com base nas medidas obtidas. Os parâmetros calculados são: correntes e tensões RMS para cada fase, a potência ativa, a potência reativa, a energia acumulada, a frequência e o fator de potência.

Com todos os parâmetros calculados, o processo *foreground* também é responsável por apresentar os resultados no display LCD. Na Figura 17 está representado o fluxograma do funcionamento do processo *foreground*.



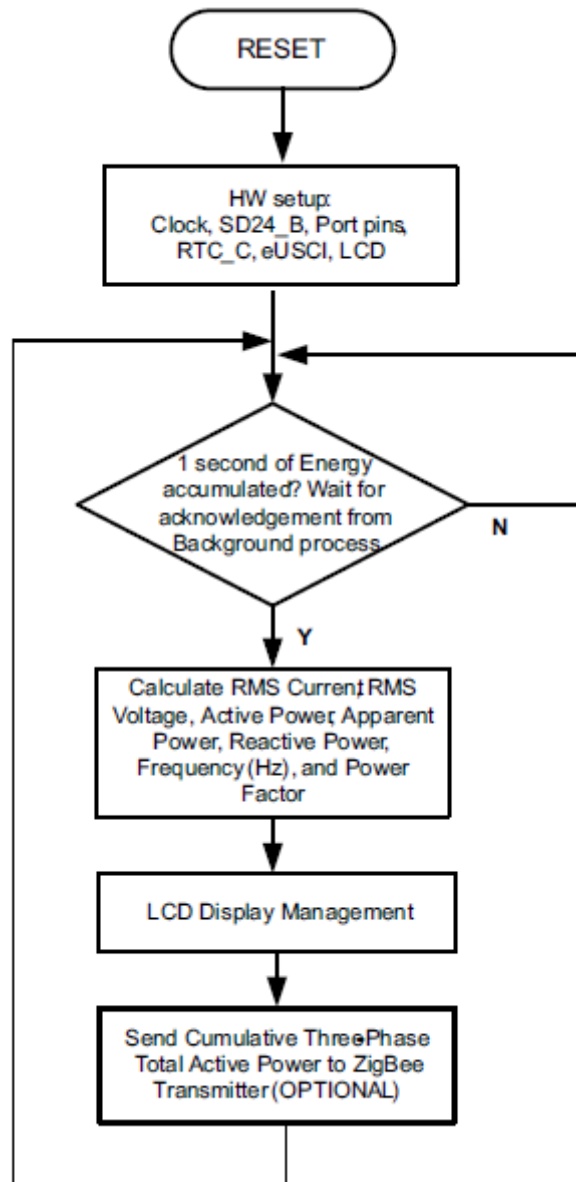


Figura 17 – Diagrama de blocos do funcionamento do processo *Foreground* [13].

De seguida são apresentadas as fórmulas utilizadas para o cálculo dos parâmetros referidos anteriormente.

**Tensão RMS:**

$$V_{RMS,ph} = K_{v,ph} * \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{Sample\ count} v_{ph}(n) * v_{ph}(n)}{Sample\ count}}$$

### Corrente RMS:

$$I_{RMS,ph} = K_{i,ph} * \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{Sample\ count} i_{ph}(n) * i_{ph}(n)}{Sample\ count}}$$

Em que:

- Ph é a fase;
- V<sub>ph</sub>(n) é a amostra da tensão no instante n;
- I<sub>ph</sub>(n) é a amostra da corrente no instante n;
- *Sample count* é o número de amostras;
- K<sub>v,ph</sub> é o fator de escala para a tensão;
- K<sub>i,ph</sub> é o fator de escala para a corrente.

### Potência Ativa:

$$P_{ACT,ph} = K_{ACT,ph} \frac{\sum_{n=1}^{Sample\ count} v(n) \times i_{ph}(n)}{Sample\ count}$$

### Potência Reativa:

$$P_{REACT,ph} = K_{REACT,ph} \frac{\sum_{n=1}^{Sample\ count} v_{90}(n) \times i_{ph}(n)}{Sample\ count}$$

Em que:

- V<sub>90,ph</sub>(n) é a amostra da tensão no instante n, deslocada 90°;
- K<sub>ACT,ph</sub> é o fator de escala para a potência ativa;
- K<sub>REACT,ph</sub> é o fator de escala para a potência reativa.

### Energia Ativa e Reativa:

$$E_{ACT,ph} = P_{ACT,ph} \times SampleCount$$

$$E_{REACT,ph} = P_{REACT,ph} \times SampleCount$$

Na energia reativa, é utilizado um desfasamento de 90° para permitir uma medição precisa da potência reativa para correntes muito baixas

### Potência Aparente:

$$P_{APP,ph} = \sqrt{P_{ACT,ph}^2 + P_{REACT,ph}^2}$$

**Frequência:**

$$Frequency (Hz) = \frac{Sampling Rate (samples / second)}{Frequency (samples / cycle)}$$

**Fator de potência:**

$$Internal Representation of Power Factor = \begin{cases} \frac{P_{Act}}{P_{Apparent}}, & \text{if capacitive load} \\ -\frac{P_{Act}}{P_{Apparent}}, & \text{if inductive load} \end{cases}$$

O fator de potência é positivo para uma carga capacitiva e negativo para uma carga negativa.

### **2.4.3 – Processo *Background***

O processo *background* é responsável por gerir a temporização de eventos críticos no software e pela recolha das amostras de tensão e de corrente para cada fase.

As amostras são recolhidas utilizando interrupções para garantir a obtenção de valores corretos. Serão utilizadas amostras de 16 bits para as tensões e amostras de 24 bits para as correntes. As tensões são posteriormente acumuladas (soma de valores) em registos de 48 bits e as correntes são acumuladas em registos de 64 bits. As potências são também acumuladas em registos de 64 bits.

Após a obtenção de amostras equivalentes a 1 segundo, este processo envia um *trigger* ao processo *foreground* para iniciar o cálculo dos parâmetros pretendidos.

Este processo também efetua o cálculo de pulsos de energia, frequência das amostras e determinação do avanço/recuo da corrente. Na Figura 18 está representado o fluxograma do funcionamento do processo *background*.

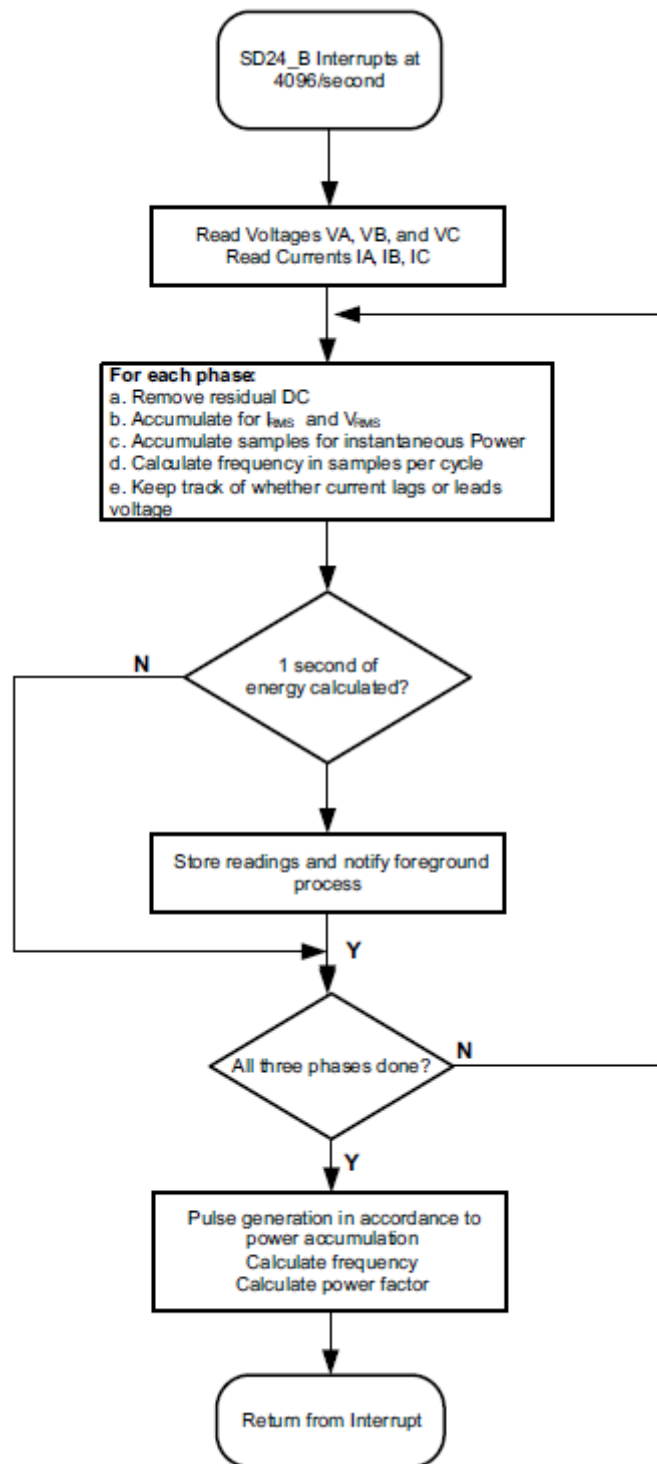


Figura 18 – Diagrama de blocos do funcionamento do processo *background* [13].

A energia consumida é medida em pulsos kilowatt-hora (kWh) e permite a calibração de sistemas de medição precisa. Este processo é responsável por gerar pulsos proporcionais à energia consumida, sendo crucial uma geração de pulsos precisa e com baixo *jitter*.

Os pulsos são gerados usando potência geral acumulada durante 1 segundo, calculada pelo processo *foreground*. Quando a energia acumulada ultrapassa um certo limite, é gerado um

pulso, e a energia acima deste limite é guardada e é adicionada nova energia por cima no próximo ciclo. Na Figura 19 está representado o fluxograma do funcionamento da geração dos pulsos.

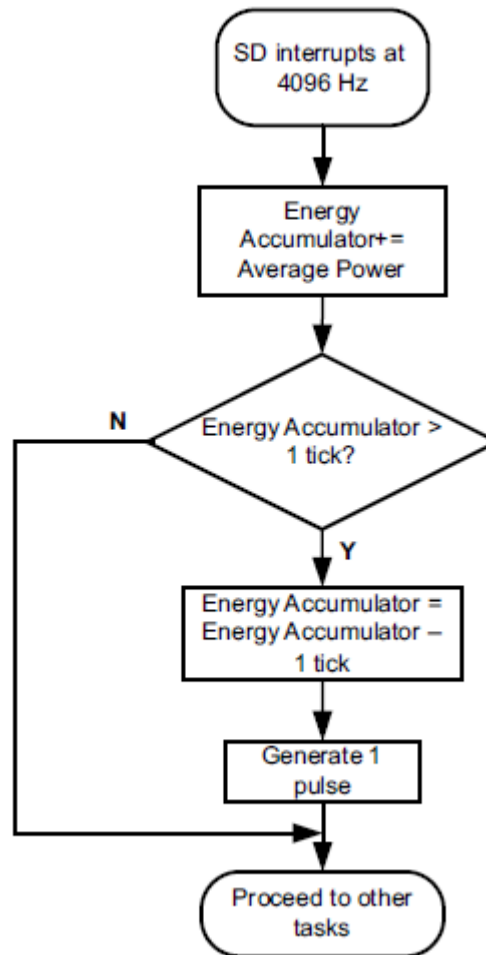


Figura 19 – Diagrama de blocos do funcionamento do processo de geração de pulsos [13].

#### 2.4.4 – Visão Geral

Como foi referido anteriormente, o kit apresenta vários periféricos que complementam algumas das funcionalidades do microcontrolador. Um desses periféricos consiste no conjunto de circuitos aplicados aos conversores, referidos anteriormente. Outros periféricos presentes são: módulo RS-232 isolado, conector RF, fonte de alimentação capacitiva, fonte de alimentação de *switching*, *display* LCD, entre outros. Na Figura 20 está representada a vista frontal do kit e a representação dos seus periféricos.

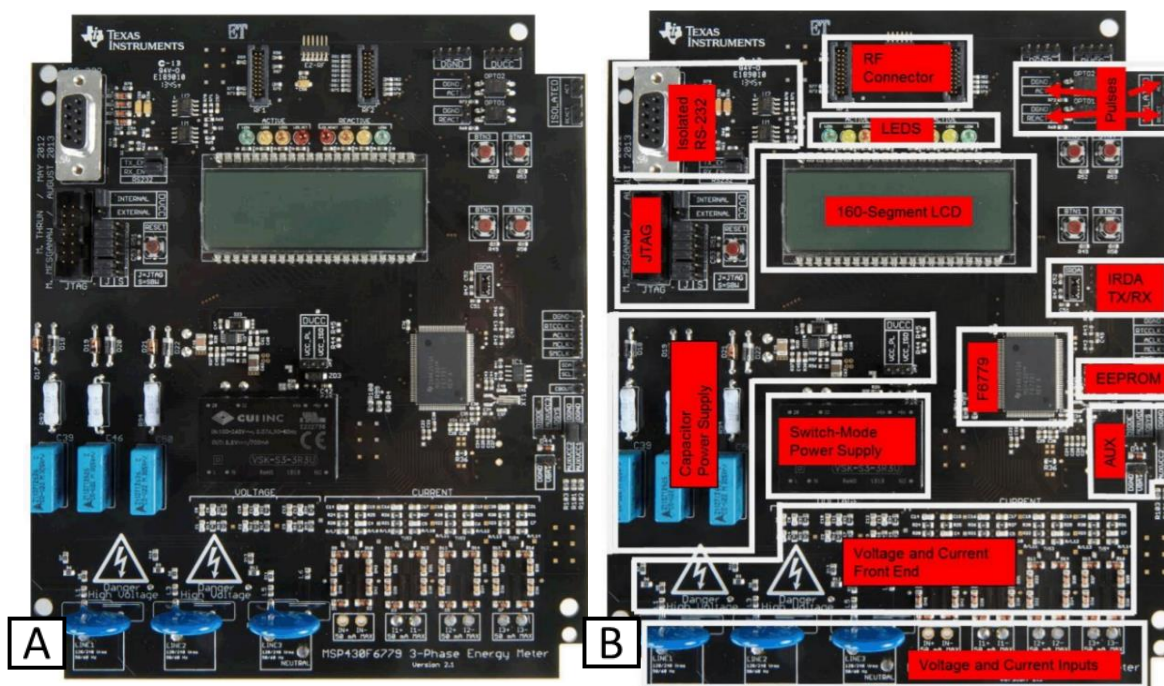


Figura 20 - Representação frontal do kit (A) e representação dos periféricos (B) [13].

Na Figura 21 estão representadas as entradas para a tensão de cada fase e do neutro.

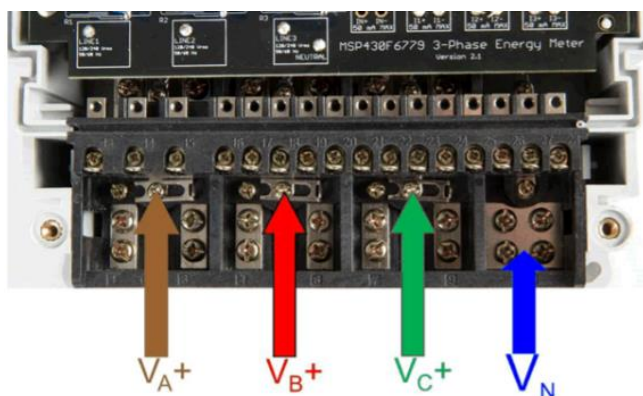


Figura 21 - Entradas para a tensão das 3 fases e do neutro [13].

Na Figura 22 estão representadas as entradas para a corrente de cada fase e novamente a tensão do neutro

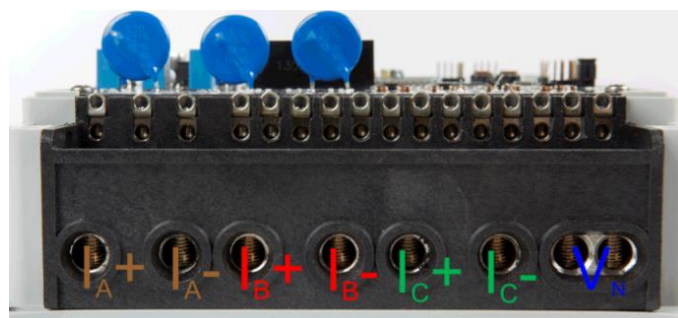


Figura 22 - Entradas para a corrente das 3 fases e tensão do neutro [13].

O programa fornecido permite apresentar várias representações no *display* LCD para os vários parâmetros calculados e várias fases. Na Tabela 4 estão representados os vários símbolos e a medida que estes representam.

Tabela 4 - Símbolos utilizados no LCD e sua representação [13].

Parameter Name	Symbol	Units	Comments
Voltage	V	Volts (V)	-
Current	I	Amps (A)	-
Active Power	P	Watt (W)	-
Reactive Power	Q	Volt-Ampere Reactive (var)	-
Apparent Power	S	Volt-Ampere (VA)	-
Frequency	F	Hertz (Hz)	-
Power Factor	PF AL	Constant between 0 and 1	The characters PF are used if the load is determined to be a capacitive load. The characters AL are used if the load is determined to be an inductive load.
Total Consumed Active Energy	E	100 "Tick"	Every 10 ticks increments the tenths place by 1.
Total Consumed Reactive Energy	Q	100 "Tick"	Every 10 ticks increments the tenths place by 1.

Na Figura 23 é possível observar a representação do valor obtido da frequência para a fase A no display LCD.

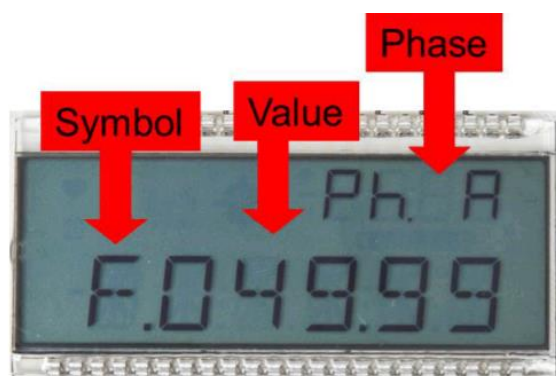


Figura 23 - Representação no LCD do valor da frequência para a fase A [13].

Apesar de ser fornecido o programa pela *Texas Instruments*, o foco do projeto será na criação de código de raiz, permitindo a customização do funcionamento do kit para poderem ser determinados posteriormente vetores de *Park* dos motores sob observação.

O programa em questão irá recolher amostras de tensão e de corrente para cada fase e enviá-las por porta série. No entanto, numa fase inicial vão ser explorados alguns periféricos do microcontrolador, nomeadamente o seu funcionamento e a programação dos seus registos, para um melhor entendimento do funcionamento deste microcontrolador e de microcontroladores em geral.

A programação do microcontrolador não será efetuada através do SDK *IAR Systems* mas sim através do SDK da *Texas Instruments*, o *CCS (Code Composer Studio)*. Este *software* contém bibliotecas com os registos de todos os microcontroladores da Texas, facilitando assim a programação dos seus dispositivos. Permite também efetuar o *debug* do microcontrolador e aceder aos vários registos que este disponibiliza, gerar gráficos e bastantes outras funcionalidades, apresentando-se assim como uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento do projeto.



## 3 – Implementação do *Set-up* Experimental

Este capítulo é referente à implementação prática da solução proposta. Pretende-se analisar as tensões e correntes de alimentação do motor recorrendo ao kit da Texas. O kit permite analisar a tensão e a corrente de cada fase individualmente. Estes dados serão posteriormente enviados para um computador através de comunicação *wireless*.

Na implementação experimental no âmbito deste projeto não será utilizada a comunicação *wireless*, mas sim comunicação série através de uma das portas série do kit. Os testes iniciais serão efetuados num reóstato que estará conectado aos conversores do kit para verificar se o comportamento das várias medidas de tensão e corrente é semelhante entre conversores. Após esta primeira fase, o kit será conectado a um motor e vão ser recolhidos os valores de tensão e corrente de cada fase. Na Figura 24 está representado o diagrama de blocos do *set-up* futuro e do *set-up* de teste utilizado nesta prova de conceito.

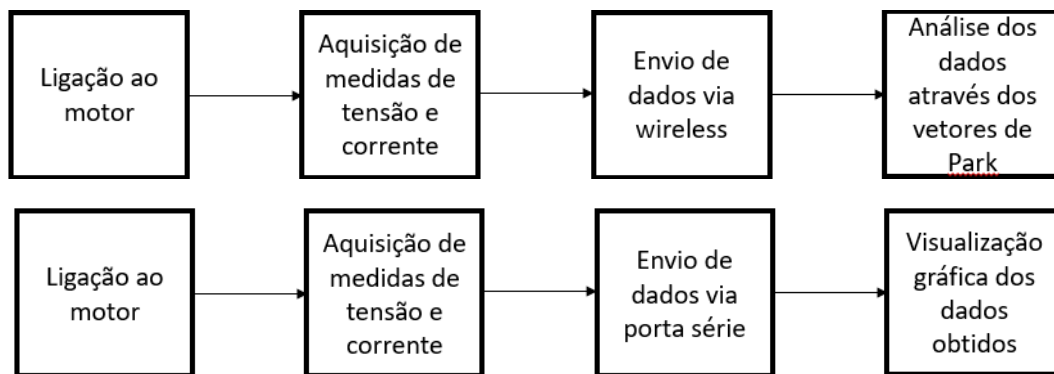


Figura 24 - Diagramas de blocos para o funcionamento futuro do projeto (cima) e o funcionamento desta prova de conceito (baixo).

### 3.1 – Periféricos utilizados

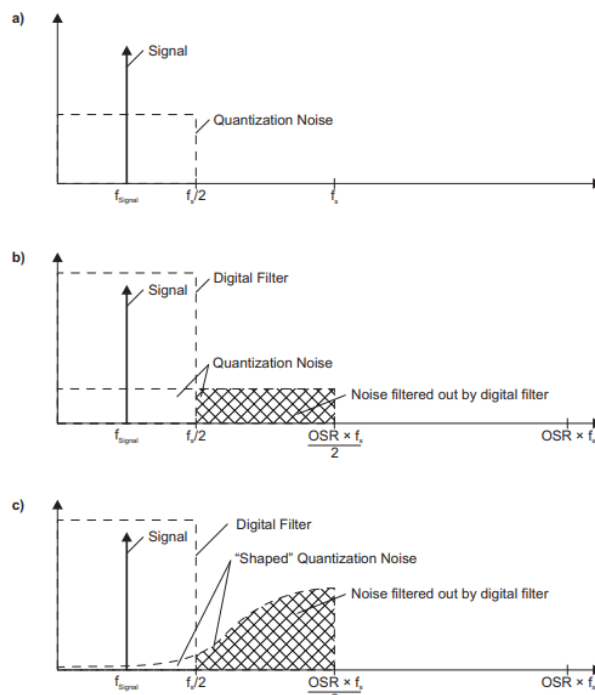
De modo a recolher os dados pretendidos, será necessária a utilização de alguns dos periféricos do microcontrolador. Os periféricos utilizados serão os conversores analógico-digital *sigma delta* (SD24B), porta série UART (eUSCI) e o display LCD (LCD\_C).

#### 3.1.1 – Conversores analógico-digital *sigma delta*

O microcontrolador apresenta vários conversores, podendo efetuar até 7 conversões diferentes. O kit vem equipado com *hardware* que permite a utilização de 4 conversores para leitura de tensões e 3 conversores para a leitura de correntes. O módulo SD24\_B é um conversor analógico para digital *sigma delta* múltiplo. As suas funcionalidades incluem:

- Arquitetura *sigma delta* de segunda ordem;
- Até 8 conversores independentes;
- Inputs diferenciais;
- Ganho variável.

O conversor analógico digital *sigma delta* consiste em duas partes: a parte analógica (modulador) e a parte digital (filtro de decimação). O modulador fornece um fluxo de bits para o filtro digital. O filtro digital efetua a média desse fluxo de bits, em relação a um certo número de bits especificado (OSR – *oversampling ratio*), e fornece amostras a um ritmo inferior ao do modulador. Efetuar a média permite aumentar o desempenho da conversão e reduzir ruído. Na Figura 25 está representado o funcionamento do filtro digital.



**Figura 25 - Funcionamento do filtro digital do conversor sigma delta.**

A conversão analógica para digital é efetuada por um modulador *sigma delta* de 1 bit. Um comparador de 1 bit, integrado no modulador quantifica o sinal de *input* com a frequência do modulador  $f_M$ .

Este módulo permite utilizar referência interna ou externa. A referência interna tem o valor fixo de 1.2 V e é utilizada por todos os conversores quando o registo SD24REFS = 1. Caso se utilize referência externa (SD24REFS = 0), deve ser aplicada a tensão pretendida no pino VREF.

Quando um conversor não estiver a converter será automaticamente desativado até ser iniciada uma nova conversão.

O *input* de cada conversor é configurado através do registo SD24BINCTLx. A configuração é independente para cada conversor. O ganho de cada conversor é configurável entre 8 ganhos diferentes.

O valor do *output* do filtro digital SINC3, FS, está dependente do OSR utilizado e é dado por:

$$FS = 2^{3 \times \log_2(OSR)}$$

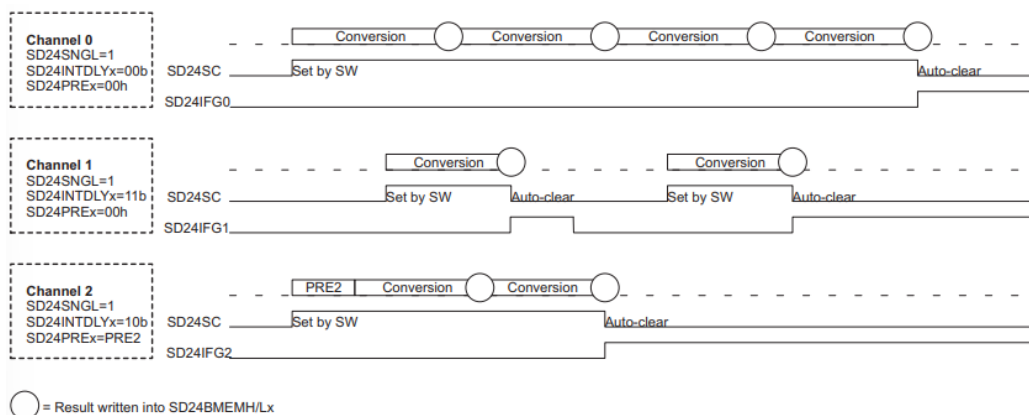
No modo *offset* binário o *output* do filtro toma como valor mínimo 0 e o valor máximo FS, variando então entre 0 e FS, enquanto que, no modo complemento para dois, o *output* toma como valor mínimo -FS e valor máximo FS, variando então entre -FS e FS. Os valores obtidos podem também ser alinhados à esquerda ou à direita, através do registo SD24ALGN. Os seus valores são escritos nos registos SD24BMEMLx e SD24BMEMHx. Na Tabela 5 estão representados os vários valores do filtro digital em vários formatos para um OSR de 256.

**Tabela 5 - Output do filtro digital e valor dos registos de memória do conversor *sigma delta* para várias configurações.**

SD24DFx	SD24ALGN	Format	Analog Input	Filter Output (hex)	SD24BMEMHx SD24BMEMLx (hex)
00b	0	Bipolar offset binary, right aligned	+V <sub>FSR</sub>	0FF FFFF	00FF FFFF
			0 V	080 0000	0080 0000
			-V <sub>FSR</sub>	000 0000	0000 0000
00b	1	Bipolar offset binary, left aligned	+V <sub>FSR</sub>	0FF FFFF	FFFF FF00
			0 V	080 0000	8000 0000
			-V <sub>FSR</sub>	000 0000	0000 0000
01b	0	Bipolar twos complement, right aligned	+V <sub>FSR</sub>	00FF FFFF	00FF FFFF
			0 V	0000 0000	0000 0000
			-V <sub>FSR</sub>	FF00 0000	FF00 0000
01b	1	Bipolar twos complement, left aligned	+V <sub>FSR</sub>	00FF FFFF	7FFF FF80
			0 V	0000 0000	0000 0000
			-V <sub>FSR</sub>	FF00 0000	8000 0000

Cada conversor apresenta dois modos de conversão: conversão única e conversão contínua. O modo é escolhido através do bit SD24SNGL.

No modo de conversão única (SD24SNGL = 0), a conversão é iniciada ativando o bit SD24SC. Este bit é desativado automaticamente após cada conversão, ou seja, quando a *flag* de fim de conversão do conversor é ativada. Desativar o bit SD24SC antes da conversão estar concluída faz com que o conversor interrompa a conversão e desligue. Na Figura 26 estão representadas as *timelines* que representam o funcionamento da conversão de 3 conversores com configurações diferentes, no modo de conversão única.



**Figura 26 - Funcionamento de 3 conversores com configurações diferentes.**

No modo de conversão contínua (SD24SNGL = 0), a conversão é iniciada através do bit SD24SC e continua indefinidamente até este bit ser desativado.

Os conversores podem também ser agrupados, partilhando o mesmo *trigger* de início de conversão. Existem 4 *triggers* internos e 3 externos disponíveis. Os bits SD24SCSx permitem escolher o grupo de cada conversor. Os conversores do mesmo grupo devem ter o mesmo valor nestes bits. A conversão pode ser iniciada através de *software*, ativando o bit SD24GRPxSC, ou através de um *trigger* externo. O início de conversão do grupo ativa o bit SD24SC de cada conversor. Desativando este bit o conversor correspondente interrompe imediatamente a conversão deste. Ativar o bit SD24SC de um conversor do grupo inicia imediatamente a conversão neste conversor, independentemente do *trigger* da conversão do grupo. Na Figura 27 está representado o funcionamento da conversão de 2 conversores, agrupados no grupo 0, com configurações diferentes.

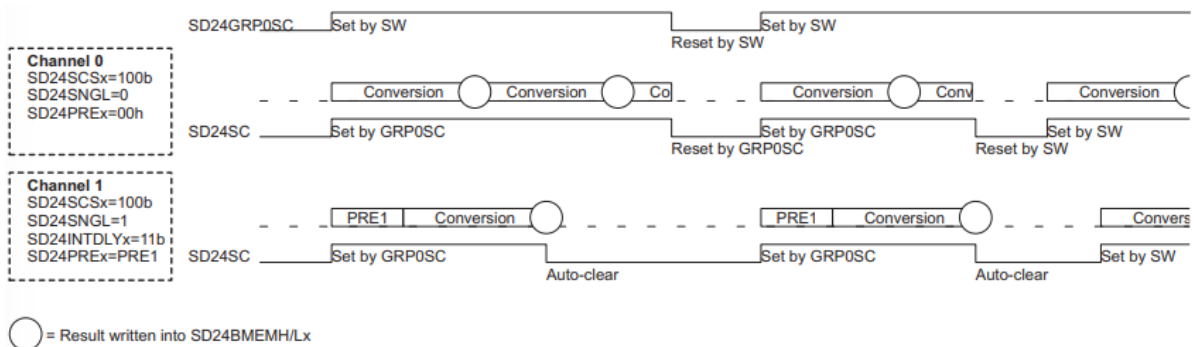


Figura 27 - Funcionamento de 2 conversores agrupados, com configurações diferentes.

Quando vários conversores estão agrupados é possível atrasar o tempo de conversão de um ou vários dos conversores através do registo SD24BPREx. Através deste registo, o tempo de decimação do filtro digital é aumentado uma vez pelo número especificado de ciclos do  $f_M$ . Portanto, o seu valor está dependente do OSR, podendo variar entre o mínimo 0 e o valor máximo o qual corresponde ao valor do registo SD24BOSRx (OSR – 1). Na Figura 28 está representado o funcionamento da conversão com atraso, para um OSR de 32.

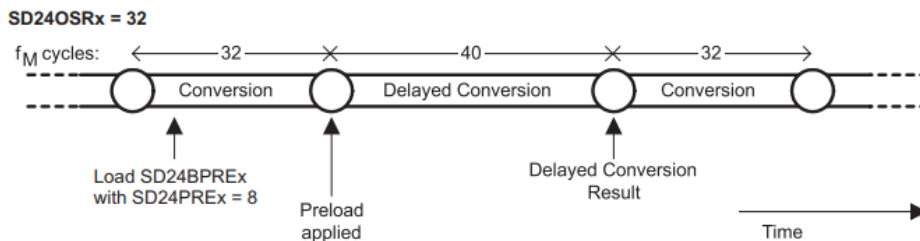


Figura 28 - Funcionamento de 1 conversor com atraso de conversão aplicado.

O atraso é aplicado no início do próximo ciclo de conversão, após a escrita do respetivo registo. As conversões seguintes já não têm atraso. Após escrita no registo SD24BPREx, a próxima escrita neste registo não deve ocorrer antes do ciclo atual de conversão estar concluído.

Na Figura 29 está representado o funcionamento de 2 conversores, o de cima com atraso e o de baixo sem atraso, para um OSR de 32.

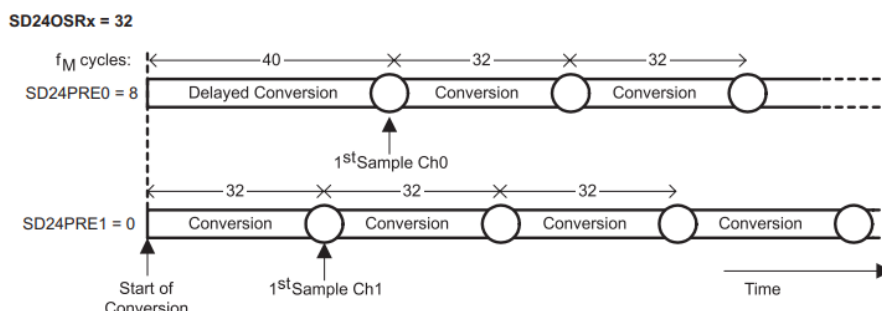


Figura 29 - Funcionamento de 1 conversor com atraso (cima) e de 1 conversor sem atraso (baixo).

### 3.1.2 – Setup experimental dos conversores analógico-digital sigma delta

Os conversores de tensão estão conectados a um divisor resistivo, permitindo a leitura de valores de tensão até 230 V alternados, sendo que este valor apresenta uma margem de segurança de 15% em relação ao valor máximo de tensão admissível à entrada do conversor, de modo a protegê-lo contra picos de tensão.

Os conversores de corrente estão conectados a um transformador de corrente, permitindo a leitura de valores de corrente até 100 A.

Pretende-se então utilizar 6 conversores, 3 conversores de tensão e 3 conversores de corrente. Os conversores de tensão serão os conversores 0, 1 e 2 (para as tensões V1, V2 e V3, respetivamente) e os conversores de corrente serão os conversores 4, 5 e 6 (para as correntes I1, I2 e I3, respetivamente). O conversor 3, que serve para medir a tensão do neutro, não será utilizado. Inicialmente os sinais a medir são sinais sinusoidais com uma frequência de 50 Hz, obtidos através de um reóstato. Posteriormente serão medidos os sinais das 3 fases de um motor de indução. Serão recolhidas várias amostras dos sinais no espaço de tempo ligeiramente superior a 2 períodos destes sinais.

O número de amostras recolhidas está dependente da parametrização do módulo da ADC. Utilizando um *clock* com uma frequência de 1.048576 MHz e um OSR pré-definido de 256, a frequência de amostragem será:

$$f = \frac{f_{ADC}}{OSR} = \frac{1.048576 \times 10^6}{256} = 4096 \text{ Hz}$$

Portanto serão obtidas 4096 amostras por segundo ou aproximadamente 82 amostras por ciclo. Assim, os 2 períodos do sinal a amostrar vão permitir obter 164 amostras. Optou-se então por recolher periodicamente 200 amostras para cada conversor, obtendo-se 6 conjuntos de 200 amostras. Cada amostra é representada por uma quantidade de 24 bits. Os 6 conversores vão iniciar e terminar a conversão em simultâneo, de modo que todas as conversões estejam sincronizadas. Na Figura 30 está representado um esquema das ligações elétricas utilizado.

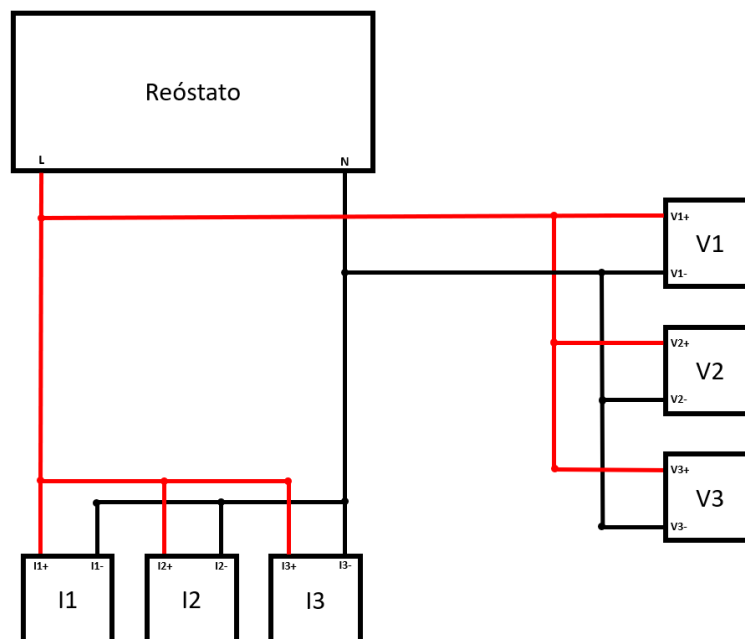


Figura 30 - Esquema das ligações elétricas utilizado para a medição da tensão e da corrente no estator.

Após a recolha de todas as amostras os conversores serão desativados, seguindo-se o envio das mesmas via porta série. Quando todas as amostras forem enviadas, os conversores serão ativados novamente.

### 3.1.3 – Porta série UART

O microcontrolador permite o envio de dados por comunicação série através de dois protocolos de comunicação: SPI ou UART. Será utilizado o protocolo de comunicação série UART. A porta série será utilizada para enviar os 6 conjuntos de amostras obtidos pelos conversores da ADC envio esse efetuado após o fim das conversões. A comunicação UART é assíncrona, e algumas das suas funcionalidades neste microcontrolador são:

- Mensagem, de 7 ou 8 bits, com paridade par, ímpar ou sem paridade;
- Registos de *buffer* separados e independentes para a receção e para a transmissão;
- Envio de LBS ou MSB em primeiro lugar, na receção e envio;
- *Baudrate* programável;
- Capacidade de gerar interrupções.

No modo UART, a porta série transmite ou recebe caracteres de forma assíncrona a outro dispositivo. O intervalo de tempo para cada caracter baseia-se na *baudrate* seleccionada na eUSCI\_A. As funções de transmissão e receção utilizam a mesma *baudrate*.

A unidade atómica de transmissão em UART é um caracter. O formato de cada caracter UART consiste num *start* bit, seguido de 7 ou 8 data bits, seguido de 1 bit de paridade (par, ímpar ou sem paridade), e finalmente 1 ou 2 stop bits. Tipicamente a comunicação UART exige o envio do LSB primeiro.

A geração da *baudrate* pode ser automática ou manual. É possível gerar *baudrates* a partir de *clocks* de baixa frequência, reduzindo o consumo de energia. O gerador da *baudrate* utiliza um *prescaler* e um modulador para gerar intervalos do *clock*. Para calcular corretamente as definições da *baudrate*, é necessário calcular N, sendo:

$$N = \frac{f_{BRCLK}}{\text{baudrate}}$$

O registo UCBRx corresponderá à parte inteira de N.

O registo UCBSx corresponde à parte fracionária de N, sendo o seu valor obtido pela comparação do valor fracionário a valores tabelados. Os valores estão representados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Valor do registo UCBSx para várias partes fracionárias de N.**

Fractional Portion of N	UCBSx <sup>(1)</sup>	Fractional Portion of N	UCBSx <sup>(1)</sup>
0.0000	0x00	0.5002	0xAA
0.0529	0x01	0.5715	0x6B
0.0715	0x02	0.6003	0xAD
0.0835	0x04	0.6254	0xB5
0.1001	0x08	0.6432	0xB6
0.1252	0x10	0.6667	0xD6
0.1430	0x20	0.7001	0xB7
0.1670	0x11	0.7147	0xBB
0.2147	0x21	0.7503	0xDD
0.2224	0x22	0.7861	0xED
0.2503	0x44	0.8004	0xEE
0.3000	0x25	0.8333	0xBF
0.3335	0x49	0.8464	0xDF
0.3575	0x4A	0.8572	0xEF
0.3753	0x52	0.8751	0xF7
0.4003	0x92	0.9004	0xFB
0.4286	0x53	0.9170	0xFD
0.4378	0x55	0.9288	0xFE

É fornecida no *datasheet* do microcontrolador uma tabela que apresenta os valores que devem ser utilizados nos vários registos para obter as várias *baudrates* com base nas frequências de *clock* utilizadas. O erro da transmissão e receção é também apresentado. Um excerto dessa tabela está representado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valor de vários registos e erros associados para várias *baudrates*.

BRCLK	Baud Rate	UCOS16	UCBRx	UCBRFx	UCBRx <sup>(2)</sup>	TX Error <sup>(2)</sup> (%)		RX Error <sup>(2)</sup> (%)	
						neg	pos	neg	pos
32768	1200	1	1	11	0x25	-2.29	2.25	-2.56	5.35
32768	2400	0	13	-	0xB6	-3.12	3.91	-5.52	8.84
32768	4800	0	6	-	0xEE	-7.62	8.98	-21	10.25
32768	9600	0	3	-	0x92	-17.19	16.02	-23.24	37.3
1000000	9600	1	6	8	0x20	-0.48	0.64	-1.04	1.04
1000000	19200	1	3	4	0x2	-0.8	0.96	-1.84	1.84
1000000	38400	1	1	10	0x0	0	1.76	0	3.44
1000000	57600	0	17	-	0x4A	-2.72	2.56	-3.76	7.28
1000000	115200	0	8	-	0xD6	-7.36	5.6	-17.04	6.96
1048576	9600	1	6	13	0x22	-0.46	0.42	-0.48	1.23
1048576	19200	1	3	6	0xAD	-0.88	0.83	-2.36	1.18
1048576	38400	1	1	11	0x25	-2.29	2.25	-2.56	5.35
1048576	57600	0	18	-	0x11	-2	3.37	-5.31	5.55
1048576	115200	0	9	-	0x08	-5.37	4.49	-5.93	14.92
4000000	9600	1	26	0	0xB6	-0.08	0.16	-0.28	0.2
4000000	19200	1	13	0	0x84	-0.32	0.32	-0.64	0.48
4000000	38400	1	6	8	0x20	-0.48	0.64	-1.04	1.04
4000000	57600	1	4	5	0x55	-0.8	0.64	-1.12	1.76
4000000	115200	1	2	2	0xBB	-1.44	1.28	-3.92	1.68
4000000	230400	0	17	-	0x4A	-2.72	2.56	-3.76	7.28
4194304	9600	1	27	4	0xFB	-0.11	0.1	-0.33	0
4194304	19200	1	13	10	0x55	-0.21	0.21	-0.55	0.33
4194304	38400	1	6	13	0x22	-0.46	0.42	-0.48	1.23
4194304	57600	1	4	8	0xEE	-0.75	0.74	-2	0.87
4194304	115200	1	2	4	0x92	-1.62	1.37	-3.56	2.06
4194304	230400	0	18	-	0x11	-2	3.37	-5.31	5.55
8000000	9600	1	52	1	0x49	-0.08	0.04	-0.1	0.14
8000000	19200	1	26	0	0xB6	-0.08	0.16	-0.28	0.2
8000000	38400	1	13	0	0x84	-0.32	0.32	-0.64	0.48
8000000	57600	1	8	10	0xF7	-0.32	0.32	-1	0.36
8000000	115200	1	4	5	0x55	-0.8	0.64	-1.12	1.76
8000000	230400	1	2	2	0xBB	-1.44	1.28	-3.92	1.68
8000000	460800	0	17	-	0x4A	-2.72	2.56	-3.76	7.28
8388608	9600	1	54	9	0xEE	-0.06	0.06	-0.11	0.13
8388608	19200	1	27	4	0xFB	-0.11	0.1	-0.33	0
8388608	38400	1	13	10	0x55	-0.21	0.21	-0.55	0.33
8388608	57600	1	9	1	0xB5	-0.31	0.31	-0.53	0.78
8388608	115200	1	4	8	0xEE	-0.75	0.74	-2	0.87
8388608	230400	1	2	4	0x92	-1.62	1.37	-3.56	2.06
8388608	460800	0	18	-	0x11	-2	3.37	-5.31	5.55
12000000	9600	1	78	2	0x0	0	0	0	0.04

### 3.1.4 – Setup experimental da porta série UART

Pretende-se efetuar o envio dos dados através da utilização de uma *baudrate* de 9600, em que cada mensagem terá 8 bits de dados, 1 stop bit e não será utilizada paridade.

Para o envio dos valores obtidos pelos conversores, convencionou-se enviar cada amostra com 4 bytes. O primeiro byte irá indicar o número da amostra e os 3 bytes seguintes indicam o valor da amostra. Para distinguir os 6 conjuntos de dados, antes do envio da primeira amostra de cada conjunto, serão enviados 4 bytes, em que os 3 primeiros caracteres tomam o valor 00h e o quarto caracter indica o número do conversor em ASCII. Ou seja, para o conversor 0 o valor destes bytes será 00000030h, para o conversor 1 será 00000031h, para o conversor 2 será 00000032h, para o conversor 4 será 00000033h, para o conversor 5 será 00000034h e para o conversor 6 será 00000035h. Na Figura 31 está representado um esquema da forma de envio das amostras, em hexadecimal.



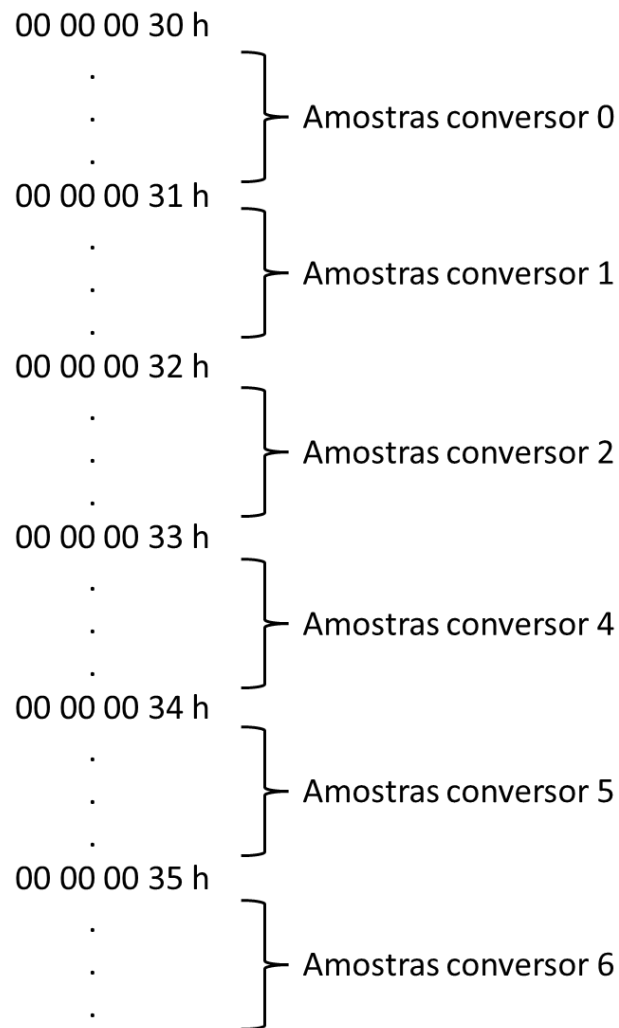


Figura 31 - Formato da mensagem de envio das amostras dos conversores.

## 3.2 – Configuração dos registos dos periféricos utilizados

De modo a obter o funcionamento desejado dos vários periféricos é necessária a configuração de vários registos associados a cada periférico. Vão ser identificados os vários registos, explicado o seu funcionamento e a programação pretendida para o funcionamento desejado.

### 3.2.1 – Conversores analógico-digital sigma delta

Como foi referido anteriormente, pretende-se efetuar conversão nos conversores 0, 1, 2, 4, 5 e 6. Irá ser utilizado como fonte de *clock* o SMCLK. Este *clock* apresenta uma frequência de 1.048576 MHz.

Pretende-se também utilizar um OSR de 256. Com este OSR, escolhendo a representação dos valores em modo *offset* binário, o *output* do filtro digital irá variar entre 00000000h e

00FFFFFFh, sendo representado em 24 bits. O tempo de cada conversão será então de 256 ciclos de *clock*, correspondendo a um valor aproximado de 244,14  $\mu$ s.

Os conversores serão também agrupados no mesmo grupo, que será o grupo 0, de forma que as suas conversões estejam sincronizadas.

Assim será necessário programar os registos de controlo SD24BCTL0 e SD24BCTL1, os registos de controlo dos conversores SD24BCCTLx (SD24BCCTL0, SD24BCCTL1, SD24BCCTL2, SD24BCCTL4, SD24BCCTL5 e SD24BCCTL6), e o registo de ativação de interrupção SD24BIE.

Também poderá ser utilizado o registo SD24BINCTLx para definir o ganho de cada conversor e o registo SD24BOSRx para definir o OSR. Como se pretende utilizar ganho 1 e um OSR de 256, e estes valores são os valores pré-definidos, não será necessária a programação destes registos.

O conversor SD24\_B apresenta interrupções para cada conversor analógico digital. As várias interrupções estão combinadas num único vetor de interrupção SD24BIV.

Quando é efetuada uma conversão e os resultados da conversão forem escritos nos registos SD24BMEMHx e SD24MEMLx, é ativada a *flag* de interrupção SD24IFGx do respetivo conversor. Será gerada uma rotina de interrupção se as interrupções globais estiverem ativadas.

### **Registo SD24BCTL0**

Os bits 15 a 11, SD24DIVx, permitem dividir a frequência do *clock*. Não se pretende diminuir a frequência, portanto será efetuada a divisão por 1, sendo o seu valor 0000b.

Os bits 10 a 8, SD24PDIV, permitem dividir novamente a frequência do *clock*. Novamente, como não se pretende diminuir a frequência do *clock*, será efetuada a divisão por 1 e, portanto, o seu valor será 000b.

O bit 7, SD24CLKOS, permite escolher o output do *clock*. Pode ser programado para fornecer um *clock* específico para modulação Manchester ou um *clock* normal., o *modulator clock*. Vai ser utilizado este último, portanto este bit terá o valor 0.

O bit 6, SD24M4, permite definir o rácio entre este *modulator clock* e o *clock* para descodificação Manchester. Os *clocks* serão iguais e, portanto, este bit toma o valor 0.

Os bits 5 e 4, SD24SSEL, permitem escolher a fonte do *clock*. Pretende-se utilizar o SMCLK, e, portanto, estes bits terão o valor 01b.

O bit 3 é reservado e terá o seu valor a 0.

O bit 2, SD24REFS, permite escolher entre tensão de referência interna ou externa. Pretende-se utilizar a tensão de referência interna, e, portanto, este bit terá o valor 1.

O bit 1, SD24OV32, permite controlar o *overflow*, ou seja, a geração da *flag* de *overflow*. Será necessária a leitura dos registos SD24MEMx e SD24MEMHx para evitar *overflow*, ou seja, será utilizado *overflow* de 32 bits (em vez de 16 bits) e, portanto, este bit toma o valor 1.

O bit 0 é reservado e terá o seu valor a 0.

Na Tabela 8 estão representados os vários bits deste registo e a sua função.

**Tabela 8 - Descrição dos bits do registo SD24BCTL0.**

Bit	Field	Type	Reset	Description
15-11	SD24DIVx	RW	0h	SD24_B frequency divider. Together with SD24PDIVx, the SD24_B frequency $f_{SD24}$ is calculated as $f_{SD24} = f_{SD24SCLK} / [(SD24DIVx + 1) \times 2^{SD24PDIVx}]$ . 0000b = Divide by 1 0001b = Divide by 2 : 11110b = Divide by 31 11111b = Divide by 32
10-8	SD24PDIVx	RW	0h	SD24_B frequency prescaler. Together with SD24DIVx, the SD24_B frequency $f_{SD24}$ is calculated as $f_{SD24} = f_{SD24SCLK} / [(SD24DIVx + 1) \times 2^{SD24PDIVx}]$ . 000b = Divide by 1 001b = Divide by 2 010b = Divide by 4 011b = Divide by 8 100b = Divide by 16 101b = Divide by 32 110b = Divide by 64 111b = Divide by 128
7	SD24CLKOS	RW	0h	Clock output select 0b = Modulator clock, $f_M$ 1b = Manchester decoder clock, $f_{MC}$ . Depending on SD24M4, the Manchester decoder clock is equal to the modulator clock or four times the modulator clock.
6	SD24M4	RW	0h	Modulator clock to Manchester decoder clock ratio 0b = Modulator clock equals Manchester decoder clock, $f_M = f_{MC} = f_{SD24}$ 1b = Modulator clock is 1/4 of the Manchester decoder clock, $f_M = f_{MC}/4 = f_{SD24}/4$ , $f_{MC} = f_{SD24}$
5-4	SD24SSEL	RW	0h	SD24_B clock source select 00b = MCLK 01b = SMCLK 10b = ACLK 11b = External SD24_B clock (SD24CLK)
3	Reserved	R	0h	Reserved. Always reads as 0.
2	SD24REFS	RW	0h	Reference select 0b = External reference selected. Internal reference voltage buffer disabled. 1b = Internal reference from shared REF selected. This requests the reference voltage from the shared REF and buffers it internally to the SD24_B.
1	SD24OV32	RW	0h	SD24_B overflow control 0b = Overflow on 16-bit (1 word) only; that is, only one of the SD24BMEMLx and SD24BMEMHx registers must be read to prevent the overflow interrupt flag being set. 1b = Overflow on 32-bit (2 words); that is, both SD24BMEMx and SD24BMEMHx registers must be read to prevent the overflow interrupt flag being set.
0	Reserved	R	0h	Reserved. Always reads as 0.

### Registo SD24BCTL1

Os bits 15 a 12 são reservados e terão o seu valor a 0.

Os bits 11 a 8 permitem seleccionar o conversor que fará *trigger* do DMA. Como não será utilizado DMA, este valor não tem interesse e, portanto, será colocado a 0000b.

Os bits 7 a 4 são reservados e terão o seu valor a 0.

O bit 3, SD24GRP3SC, é utilizado para começar a conversão do grupo 3. Como não será utilizado o grupo 3, este bit terá sempre o valor 0.

O bit 2, SD24GRP2SC, é utilizado para começar a conversão do grupo 2. Como não será utilizado o grupo 2, este bit terá sempre o valor 0.

O bit 1, SD24GRP1SC, é utilizado para começar a conversão do grupo 1. Como não será utilizado o grupo 1, este bit terá sempre o valor 0.

O bit 0, SD24GRP0SC, é utilizado para começar a conversão do grupo 0. Este será o grupo utilizado e será necessário ativar este bit para começar a conversão nos conversores deste grupo.

Na Tabela 9 e Tabela 10 estão representados os vários bits deste registo e a sua função.

Tabela 9 - Descrição dos bits do registo SD24BCTL1.

Bit	Field	Type	Reset	Description
15	Reserved	R	0h	Reserved. Always reads as 0.
14-16	SD24MCx	RW	0h	Manchester Coding of bitstream. 00b = Bitstream synchronous to $f_m$ . Output data changes with falling clock edge, input data is captured with rising clock edge. 01b = Bitstream synchronous to $f_m$ . Output data changes with rising clock edge, input data is captured with falling clock edge. 10b = Output bitstream Manchester encoded. Input bitstream Manchester decoded with oversampling of the input signal. A logic 1 is represented by a high-low transition, a logic 0 is represented by a low-high transition. 11b = Output bitstream Manchester encoded. Input bitstream Manchester decoded with oversampling of the input signal. A logic 1 is represented by a high-low transition, a logic 0 is represented by a high-low transition.
12	SD24DI	RW	0h	Digital bitstream input 0b = Bitstream from modulator fed into digital filter 1b = External bitstream fed into digital filter. Modulator is off.
11-10	SD24DFSx	RW	0h	Digital filter select 00b = SINC3 filter 01b = Reserved (defaults to 00, SINC) 10b = Reserved (defaults to 00, SINC) 11b = Reserved (defaults to 00, SINC)
9	SD24CAL	RW	0h	Calibration 0b = Calibration disabled. 1b = Calibration enabled. With a single conversion the offset of the modulator and PGA can be measured.
8	SD24SINGL	RW	0h	Single conversion mode select 0b = Continuous conversion mode 1b = Single conversion mode
7	Reserved	R	0h	Reserved. Always reads as 0.
6	SD24ALGN	RW	0h	Data alignment 0b = Right-aligned. LSB of filter output is bit 0. 1b = Left-aligned. MSB of filter output (depending on OSR) is bit 31.
5-4	SD24DFx	RW	0h	Data format 00b = Offset binary 01b = Twos complement 10b = Reserved (defaults to 00, offset binary) 11b = Reserved (defaults to 01, twos complement)

Tabela 10 - Descrição dos bits do registo SD24CTL1 - continuação.

Bit	Field	Type	Reset	Description
3-1	SD24SCSx	RW	0h	Start of conversion select 000b = SD24SC bit 001b = External trigger 1. See the device-specific data sheet. 010b = External trigger 2. See the device-specific data sheet. 011b = External trigger 3. See the device-specific data sheet. 100b = Group 0 - Start of conversion defined by SD24GRP0SC bits in register SD24BCTL1. 101b = Group 1 - Start of conversion defined by SD24GRP1SC bits in register SD24BCTL1. 110b = Group 2 - Start of conversion defined by SD24GRP2SC bits in register SD24BCTL1. 111b = Group 3 - Start of conversion defined by SD24GRP3SC bits in register SD24BCTL1.
0	SD24SC	RW	0h	Start of conversion. Software controlled start of conversion if SD24SCS = 00b. Manual stop of conversion (independent of SD24SCS setting). If a conversion is ongoing (triggered by any source selected through SD24SCS) this is indicated by SD24SC = 1. When starting the conversion (also by setting SD24SC) this bit will only read 1 when the start of conversion was synchronization to the modulator clock and the actual conversion started. 0b = No conversion start (that is, conversion stopped) 1b = Conversion ongoing

### Registos SD24BCCTLx

Este registo está presente em cada conversor. Para configurar o respetivo conversor, o x no nome deste registo deve ser trocado pelo número do conversor. Os conversores terão todos a mesma configuração.

O bit 15 é reservado e, portanto, terá o valor 0.

Os bits 14 e 13, SD24MCx, permitem configurar a codificação Manchester. Esta será síncrona à frequência do *clock* da ADC, mudanças nos dados serão efetuadas na transição *high to low*, e a captura de dados será efetuada na transição *low to high*. Estes bits terão o valor 00b.

O bit 12, SD24DI, permite escolher o input do filtro digital. O input será o modulador e, portanto, este bit terá o valor 0.

Os bits 11 e 10, SD24DFSx, permitem escolher o filtro. Independentemente do valor destes bits será selecionado o filtro SINC3. Estes bits terão o valor 00b.

O bit 9, SD24CAL, permite selecionar se é utilizada calibração. Não será utilizada calibração, e, portanto, este bit terá o valor 0.

O bit 8, SD24ALGN, permite escolher o modo de conversão. Pretende-se utilizar o modo de conversão contínua e, portanto, este bit terá o valor 1.

O bit 7 é reservado e, portanto, terá o valor 0.

O bit 6, AS24ALGN, permite escolher o alinhamento dos dados. Será utilizado alinhamento à direita e, portanto, este bit terá o valor 0.

Os bits 5 e 4, SD24DFx, permitem escolher o tipo de formato dos dados. Pretende-se utilizar o modo offset binário e, portanto, estes bits terão o valor 00b.

Os bits 3 a 1, SD24SCSx, permitem escolher o *trigger* que começa a conversão do respetivo conversor. Pretende-se que a conversão comece ao mesmo tempo, através do agrupamento dos conversores no grupo 0, e, portanto, estes bits terão o valor 100b.

O bit 0, SD24SC, é utilizado para iniciar a conversão do respetivo conversor, caso seja utilizado como *trigger* o bit SD24SC. Como não será utilizado este bit para começar as conversões, este bit terá sempre o valor 0.

Na Tabela 11 e Tabela 12 estão representados os vários bits deste registo e a sua função.

Tabela 11 - Descrição dos bits do registo SD24BCCTLx.

Bit	Field	Type	Reset	Description
15	Reserved	R	0h	Reserved. Always reads as 0.
14-16	SD24MCx	RW	0h	Manchester Coding of bitstream. 00b = Bitstream synchronous to $f_{clk}$ . Output data changes with falling clock edge, input data is captured with rising clock edge. 01b = Bitstream synchronous to $f_{clk}$ . Output data changes with rising clock edge, input data is captured with falling clock edge. 10b = Output bitstream Manchester encoded. Input bitstream Manchester decoded with oversampling of the input signal. A logic 1 is represented by a high-low transition, a logic 0 is represented by a low-high transition. 11b = Output bitstream Manchester encoded. Input bitstream Manchester decoded with oversampling of the input signal. A logic 1 is represented by a low-high transition, a logic 0 is represented by a high-low transition.
12	SD24DI	RW	0h	Digital bitstream input 0b = Bitstream from modulator fed into digital filter 1b = External bitstream fed into digital filter. Modulator is off.
11-10	SD24DFSx	RW	0h	Digital filter select 00b = SINC3 filter 01b = Reserved (defaults to 00, SINC) 10b = Reserved (defaults to 00, SINC) 11b = Reserved (defaults to 00, SINC)
9	SD24CAL	RW	0h	Calibration 0b = Calibration disabled. 1b = Calibration enabled. With a single conversion the offset of the modulator and PGA can be measured.
8	SD24SNGL	RW	0h	Single conversion mode select 0b = Continuous conversion mode 1b = Single conversion mode
7	Reserved	R	0h	Reserved. Always reads as 0.
6	SD24ALGN	RW	0h	Data alignment 0b = Right-aligned. LSB of filter output is bit 0. 1b = Left-aligned. MSB of filter output (depending on OSR) is bit 31.
5-4	SD24DFx	RW	0h	Data format 00b = Offset binary 01b = Twos complement 10b = Reserved (defaults to 00, offset binary) 11b = Reserved (defaults to 01, twos complement)

Tabela 12 - Descrição dos bits do registo SD24BCCTLx - continuação.

Bit	Field	Type	Reset	Description
3-1	SD24SCSx	RW	0h	Start of conversion select 000b = SD24SC bit 001b = External trigger 1. See the device-specific data sheet. 010b = External trigger 2. See the device-specific data sheet. 011b = External trigger 3. See the device-specific data sheet. 100b = Group 0 - Start of conversion defined by SD24GRP0SC bits in register SD24BCTL1. 101b = Group 1 - Start of conversion defined by SD24GRP1SC bits in register SD24BCTL1. 110b = Group 2 - Start of conversion defined by SD24GRP2SC bits in register SD24BCTL1. 111b = Group 3 - Start of conversion defined by SD24GRP3SC bits in register SD24BCTL1.
0	SD24SC	RW	0h	Start of conversion. Software controlled start of conversion if SD24SCS = 00b. Manual stop of conversion (Independent of SD24SCS setting). If a conversion is ongoing (triggered by any source selected through SD24SCS) this is indicated by SD24SC = 1. When starting the conversion (also by setting SD24SC) this bit will only read 1 when the start of conversion was synchronization to the modulator clock and the actual conversion started. 0b = No conversion start (that is, conversion stopped) 1b = Conversion ongoing

### Registo SD24BIE

Este registo permite habilitar as várias interrupções do módulo SD24B. Como se pretende somente habilitar a interrupção de fim de conversão do conversor 6, será ativado o respetivo bit, o bit 6 (SD24IE6 = 1). Os restantes bits terão o valor 0 porque não se pretende utilizar mais interrupções deste módulo. O seu registo terá o valor:

UCA0BRW = 0b0000000001000000;

### 3.2.2 – Porta série UART

É necessária a programação de alguns registos da porta série para obter o funcionamento pretendido. Será utilizada a porta série eUSCI\_A0.

Será então necessário programar o registo de controlo UCA0CTLW0, o registo de controlo da modulação UCA0MCTLW e o registo de controlo da *baudrate* UCA0BRW.

Pretende-se então efetuar comunicação UART assíncrona, com uma *baudrate* de 9600, com 8 data bits, 1 stop bit, e sem paridade.

Para gerar a *baudrate* pretendida de 9600, utilizando o *clock* ACLK com a frequência de 32768 Hz, tem-se:

$$N = \frac{32768}{9600} = 3,4133$$

E, portanto, UCBRx será igual a 3.

Para a parte fracionária 0,4133, analisando a tabela, o valor de UCBSx poderá ser 0x53.

No entanto, estes valores também podem ser obtidos através da tabela que relaciona as várias *baudrates*, indicando o valor recomendado de cada registo e o erro associado à receção e transmissão. Portanto, para a *baudrate* pretendida e para a frequência do *clock* utilizada, os registos podem tomar os seguintes valores recomendados: UCOS16 = 0, UCBRx = 3 e UCBSx = 0x92

Na transmissão é gerada uma *flag* de interrupção UCTXIFG quando o buffer de transmissão UCAXTXBUF está disponível para receber um novo carácter. É feito *reset* automaticamente a esta *flag* quando é escrito um carácter no *buffer*.

Na receção é gerada uma *flag* de interrupção UCRXIFG quando o buffer de receção UCAXRXBUF recebe um carácter. É feito *reset* automaticamente a esta *flag* quando o buffer é lido.

Se as interrupções estiverem ativadas, o microcontrolador vai entrar numa rotina de interrupção.

#### Registo UCA0CTLW0

O bit 15, UCPEN, permite escolher se a paridade está ativada ou desativada. Como não se pretende utilizar paridade, este bit toma o valor 0.

O bit 14, UCPAR, permite escolher o tipo de paridade (par ou ímpar). Como não se vai utilizar paridade, este bit não é utilizado. Colocou-se o seu valor a 0.

O bit 13, UCMSB, controla a direção da transmissão e receção. Como se pretende utilizar LSB primeiro, este bit é colocado a 0.

O bit 12, UC7BIT, permite escolher o comprimento da mensagem. Como se pretende utilizar 8 data bits, este bit terá o valor 0.

O bit 11, UCSPB, permite escolher o número de stop bits. Como se pretende utilizar 1 stop bit, este bit tem o valor 0.

Os bits 10 e 9, UCMODEx, permitem escolher o modo da porta série. Como se pretende utilizar comunicação UART sem deteção automática de *baudrate*, estes bits terão o valor 00b.

O bit 8, UCSYNC, permite escolher entre o modo síncrono e assíncrono. Será utilizado o modo assíncrono e, portanto, este bit toma valor 0.

Os bits 7 e 6, UCSSELx, permitem escolher a fonte para o *clock* da eUSCI\_a. Será utilizado o *clock* ACLK e, portanto, estes bits terão o valor 01b.

Os bits 5, 4, 3, 2 e 1 terão o valor 0.

O bit 0, UCSWRST, ativa ou desativa a eUSCI\_A. Este bit deve ser inicialmente colocado a 1, ou seja, colocar a eUSCI\_A em *reset*, para efetuar a programação dos registos. Quando todos os registos estiverem devidamente programados, este bit deverá ser colocado a 0, retirando a eUSCI\_A do *reset*.

Na Tabela 13 e Tabela 14 estão representados os vários bits deste registo e a sua função.

**Tabela 13 - Descrição dos bits do registo UCA0CTLW0.**

Bit	Field	Type	Reset	Description
15	UCPEN	RW	0h	Parity enable 0b = Parity disabled 1b = Parity enabled. Parity bit is generated (UCAxTXD) and expected (UCAxRXD). In address-bit multiprocessor mode, the address bit is included in the parity calculation.
14	UCPAR	RW	0h	Parity select. UCPAR is not used when parity is disabled. 0b = Odd parity 1b = Even parity
13	UCMSB	RW	0h	MSB first select. Controls the direction of the receive and transmit shift register. 0b = LSB first 1b = MSB first
12	UC7BIT	RW	0h	Character length. Selects 7-bit or 8-bit character length. 0b = 8-bit data 1b = 7-bit data
11	UCSPB	RW	0h	Stop bit select. Number of stop bits. 0b = One stop bit 1b = Two stop bits
10-9	UCMODEx	RW	0h	eUSCI_A mode. The UCMODEx bits select the asynchronous mode when UCSYNC = 0. 00b = UART mode 01b = Idle-line multiprocessor mode 10b = Address-bit multiprocessor mode 11b = UART mode with automatic baud-rate detection
8	UCSYNC	RW	0h	Synchronous mode enable 0b = Asynchronous mode 1b = Synchronous mode
7-6	UCSSELx	RW	0h	eUSCI_A clock source select. These bits select the BRCLK source clock. 00b = UCLK 01b = ACLK 10b = SMCLK 11b = SMCLK
5	UCRXEIE	RW	0h	Receive erroneous-character interrupt enable 0b = Erroneous characters rejected and UCRXIFG is not set. 1b = Erroneous characters received set UCRXIFG.
4	UCBRKIE	RW	0h	Receive break character interrupt enable 0b = Received break characters do not set UCRXIFG. 1b = Received break characters set UCRXIFG.



**Tabela 14 - Descrição dos bits do registo UCA0CTLW0 - continuação.**

Bit	Field	Type	Reset	Description
3	UCDORM	RW	0h	Dormant. Puts eUSCI_A into sleep mode. 0b = Not dormant. All received characters set UCRXIFG. 1b = Dormant. Only characters that are preceded by an idle-line or with address bit set UCRXIFG. In UART mode with automatic baud-rate detection, only the combination of a break and synch field sets UCRXIFG.
2	UCTXADDR	RW	0h	Transmit address. Next frame to be transmitted is marked as address, depending on the selected multiprocessor mode. 0b = Next frame transmitted is data. 1b = Next frame transmitted is an address.
1	UCTXBRK	RW	0h	Transmit break. Transmits a break with the next write to the transmit buffer. In UART mode with automatic baud-rate detection, 055h must be written into UCAXTXBUF to generate the required break/synch fields. Otherwise, 0h must be written into the transmit buffer. 0b = Next frame transmitted is not a break. 1b = Next frame transmitted is a break or a break/synch.
0	UCSWRST	RW	1h	Software reset enable 0b = Disabled. eUSCI_A reset released for operation. 1b = Enabled. eUSCI_A logic held in reset state.

### Registo UCA0BRW

Este registo, calculado anteriormente ou utilizando o valor retirado pela tabela para a *baudrate* pretendida, irá tomar neste caso o valor 3. Para este valor o registo será:

UCA0BRW = 0b00000000000000011;

### Registo UCA0MCTLW

Os bits 15 a 8, UCBSRx, foram obtidos anteriormente, tomando o valor 0x92.

Os bits 7 a 4, UCBRFx, são também obtidos através da tabela. Neste caso não são utilizados, e, portanto, serão colocados a 0.

Os bits 3 a 1 são reservados, sendo colocados a 0.

O bit 0, UCOS16, ativa ou desativa o modo de *oversampling*. Neste caso não será utilizado e, portanto, terá valor 0.

Na Tabela 15 estão representados os vários bits deste registo e a sua função.

**Tabela 15 - Descrição dos bits do registo UCA0MCTLW.**

Bit	Field	Type	Reset	Description
15-8	UCBSRx	RW	0h	Second modulation stage select. These bits hold a free modulation pattern for BITCLK.
7-4	UCBRFx	RW	0h	First modulation stage select. These bits determine the modulation pattern for BITCLK16 when UCOS16 = 1. Ignored with UCOS16 = 0. The "Oversampling Baud-Rate Generation" section shows the modulation pattern.
3-1	Reserved	R	0h	Reserved
0	UCOS16	RW	0h	Oversampling mode enabled 0b = Disabled 1b = Enabled

### Registo UCA0IE

Este registo permite habilitar as várias interrupções do módulo eUSCI\_A. Como se pretende somente habilitar a interrupção para transmissão, será ativado o respetivo bit, o bit 1 (UCTXIE= 1). Os restantes bits terão o valor 0 porque não se pretende utilizar mais interrupções deste módulo. O seu registo terá o valor:

UCA0IE = 0b000000000000000010;

### **Registo P3SEL0**

Será também necessária a configuração do pino P3.1 para funcionar como output da porta série e não como porta IO. Para isso será necessário ativar o bit 1 que permite ativar a função de transmissão. O seu registo terá o valor:

```
P3SEL0 = 0b000000010;
```

## 4 – Ensaios Experimentais

Este capítulo explora os resultados obtidos após a programação dos periféricos utilizados.

Foram efetuados vários ensaios no reóstato com configurações e programações diferentes e os testes foram efetuados para a recolha de 100 amostras, por questões de conveniência na análise dos valores obtidos. No entanto, o programa funcionará corretamente para valores diferentes de amostras.

Após os ensaios no reóstato, foram efetuados ensaios num motor elétrico com as configurações cujos valores obtidos eram os mais favoráveis. O motor de teste utilizado foi o motor elétrico da empresa *Nord Drive Systems*, modelo SK 100L/SIG21 com uma potência de 3 kW. Para este caso foi recolhido um número superior de amostras.

### 4.1 – Resultados obtidos nos conversores analógico-digital *sigma delta* para o reóstato

Inicialmente, os testes nos conversores foram efetuados e agrupados por fase, ou seja, foram testados os conversores 0 e 4 (para a tensão e corrente da fase 1, respetivamente), de seguida conversores 1 e 5 (para a tensão e corrente da fase 2, respetivamente) e, finalmente, os conversores 2 e 5 (para a tensão e corrente da fase 3, respetivamente).

Esta primeira abordagem consistiu na experimentação da geração da primeira interrupção de fim de conversão, nomeadamente a primeira interrupção a ser gerada logo após a primeira conversão ou após a quarta conversão. O modo de conversão utilizado foi de conversão única. O *setup* experimental utilizado para a medição no reóstato está representado na Figura 32.

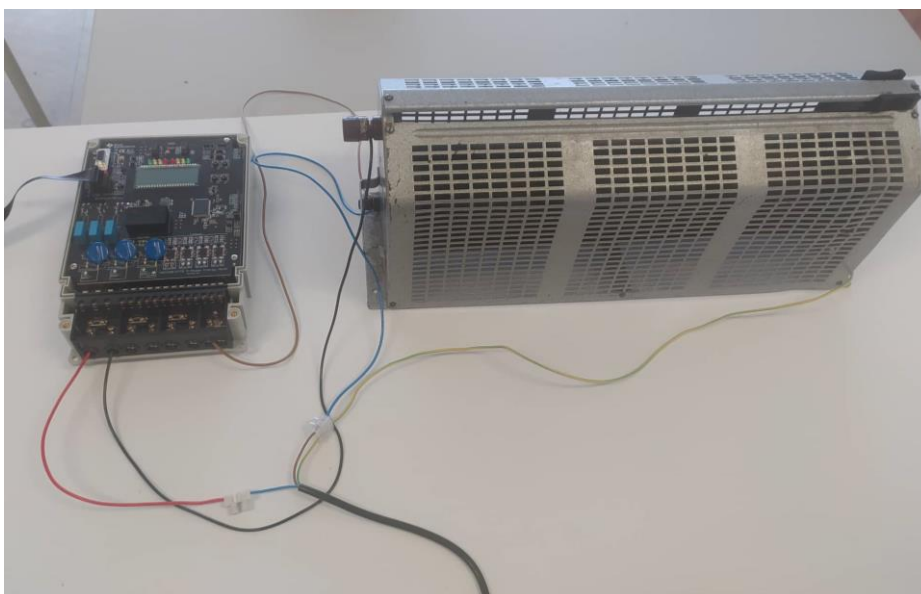


Figura 32 – Setup experimental para medição da tensão e da corrente no reóstato.

Neste caso serão efetuadas medições na fase 1. O fio vermelho representa a entrada positiva e o fio preto representa a entrada negativa do conversor de corrente. O fio castanho representa a ligação ao neutro. Também é possível observar a ligação do fio terra, a verde e amarelo, e a ligação de fios com conectores. Na Figura 33 é representada uma vista mais detalhada das ligações para a fase 1.

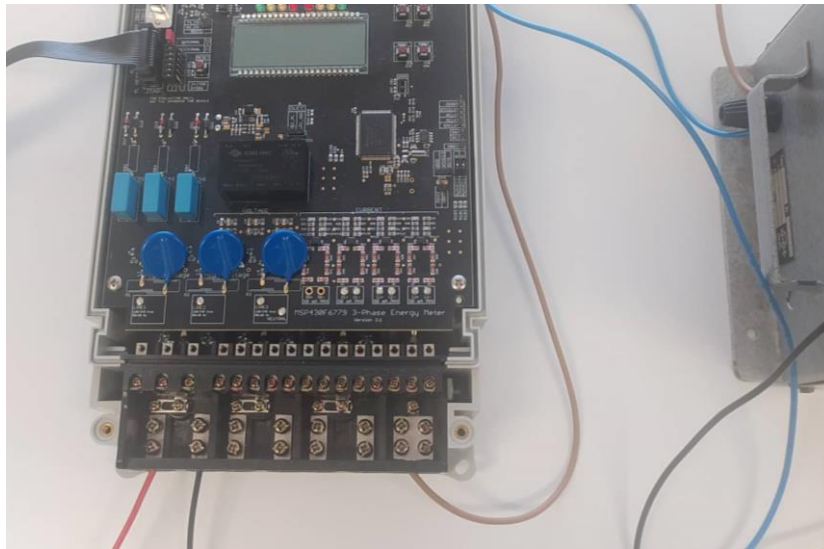


Figura 33 - Ligações elétricas para a fase 1.

Na Figura 34 e Figura 35 estão representados os gráficos para a tensão e a corrente da fase 1, respetivamente.

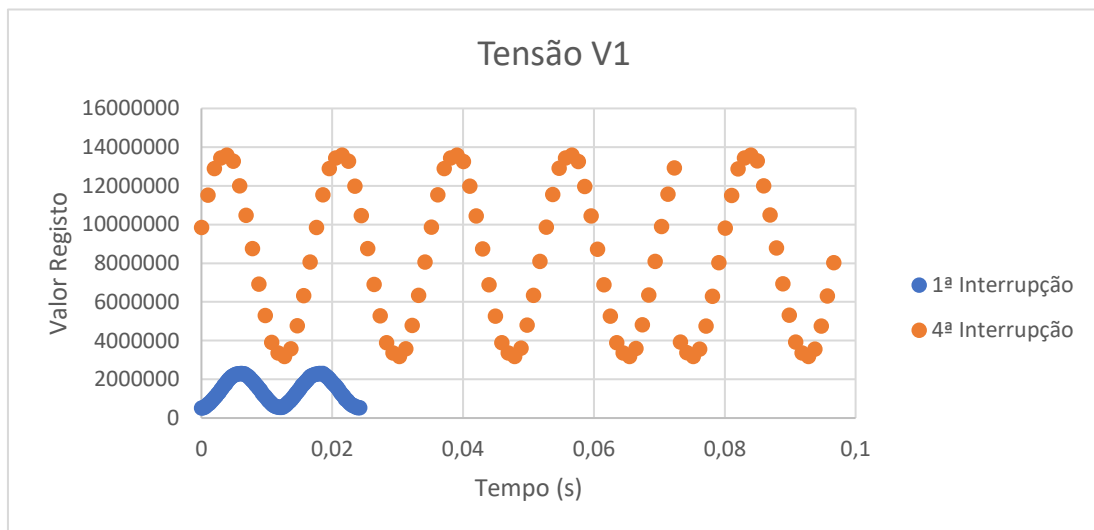
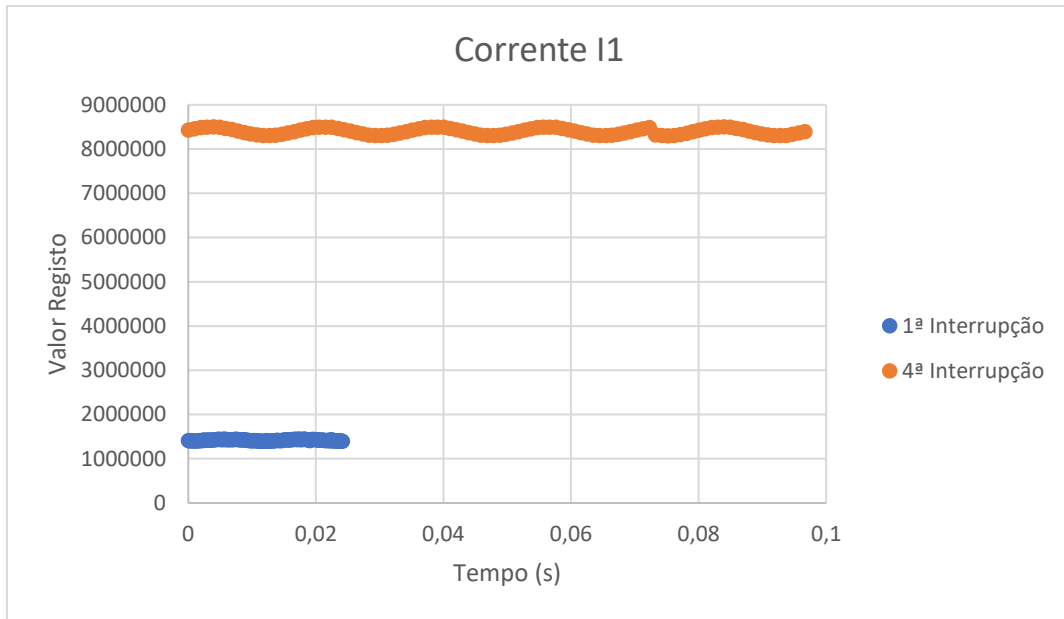


Figura 34 - Valores obtidos para a tensão da fase 1 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).



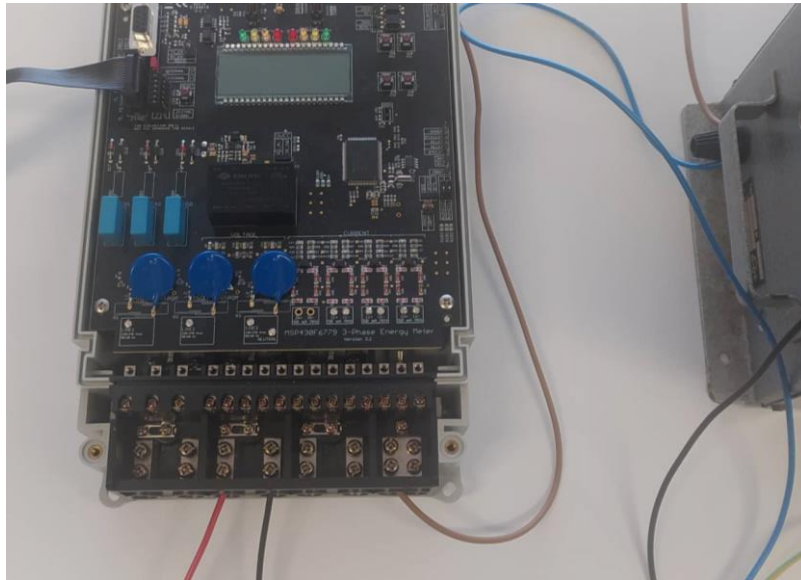
**Figura 35 - Valores obtidos para a corrente da fase 1 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).**

Pelo gráfico da tensão observa-se que as duas formas de onda apresentam amplitudes bastante diferentes. Isto deve-se ao facto de os valores do registo apresentarem uma escala de valores diferente para a primeira e a quarta interrupção. Os valores do registo esperados acontecem somente na quarta interrupção.

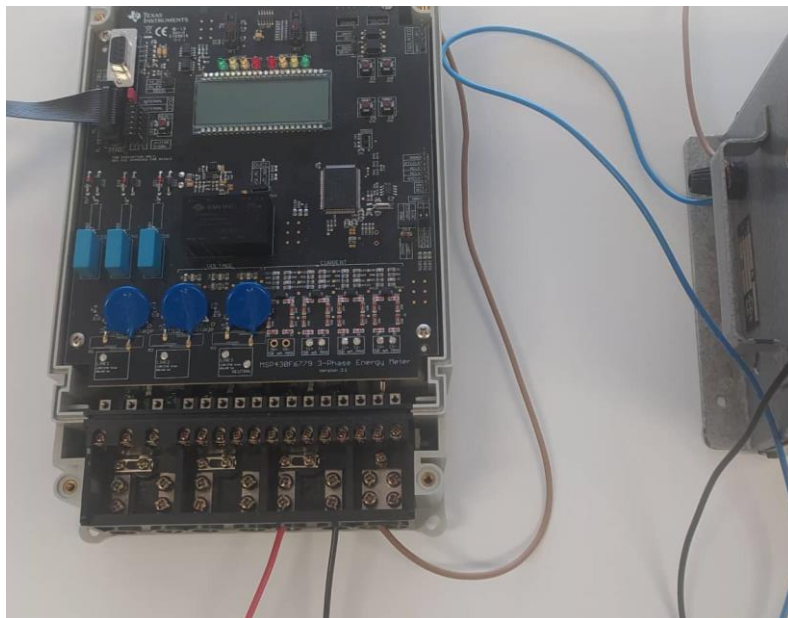
Os sinais apresentam também frequências bastante diferentes. O sinal a azul apresenta medições mais próximas e rápidas devido à geração de interrupção a cada conversão, obtendo mais conversões por período. O sinal a laranja apresenta mais períodos porque só é gerada interrupção a cada 4 conversões e, portanto, são obtidas menos conversões por período.

Observa-se também que existe uma falha no sinal a laranja, aproximadamente aos 0,07 segundos. Esta falha deve-se a um erro de *software* em que os valores são guardados constantemente numa variável com 100 posições, e esse instante corresponde ao instante em que os valores são guardados na posição 0. O mesmo acontece para o sinal a azul.

É possível observar que a situação para a corrente é igual. Isto deve-se ao facto de a tensão e a corrente estarem em fase, concluindo que os conversores estão efetivamente a funcionar em simultâneo. A mesma situação ocorre para a tensão e a corrente das fases 2 e 3. As ligações elétricas destas fases estão representadas na Figura 36 e Figura 37, respetivamente.



**Figura 36 - Ligações elétricas para a fase 2.**



**Figura 37 - Ligações elétricas para a fase 3.**

Os gráficos da tensão e da corrente da fase 2 estão representados na Figura 38 e Figura 39, respetivamente, e os gráficos da tensão e da corrente da fase 2 estão representados na Figura 40 e Figura 41.

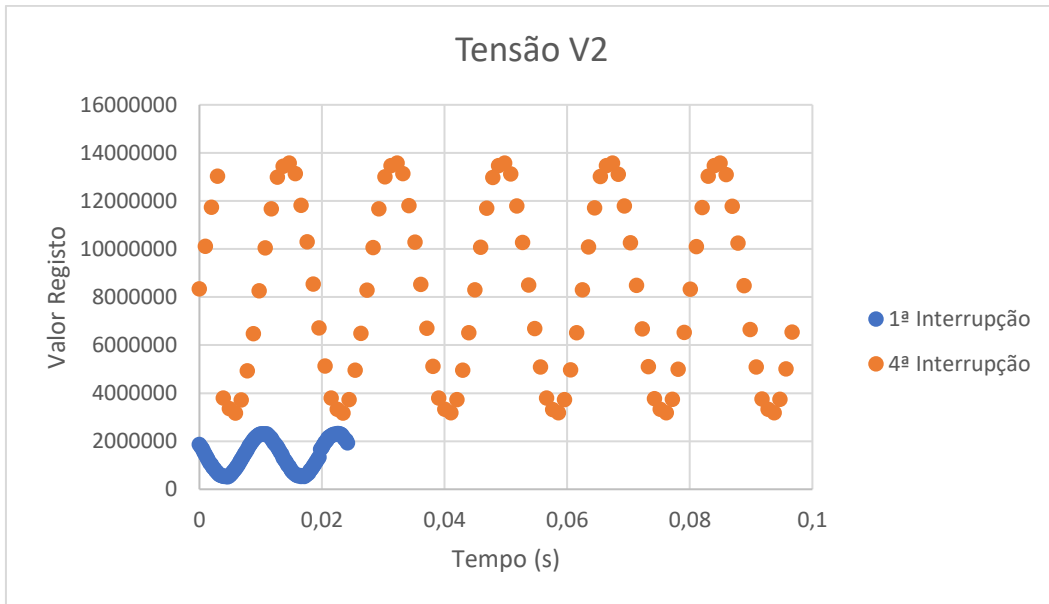


Figura 38 - Valores obtidos para a tensão da fase 2 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).

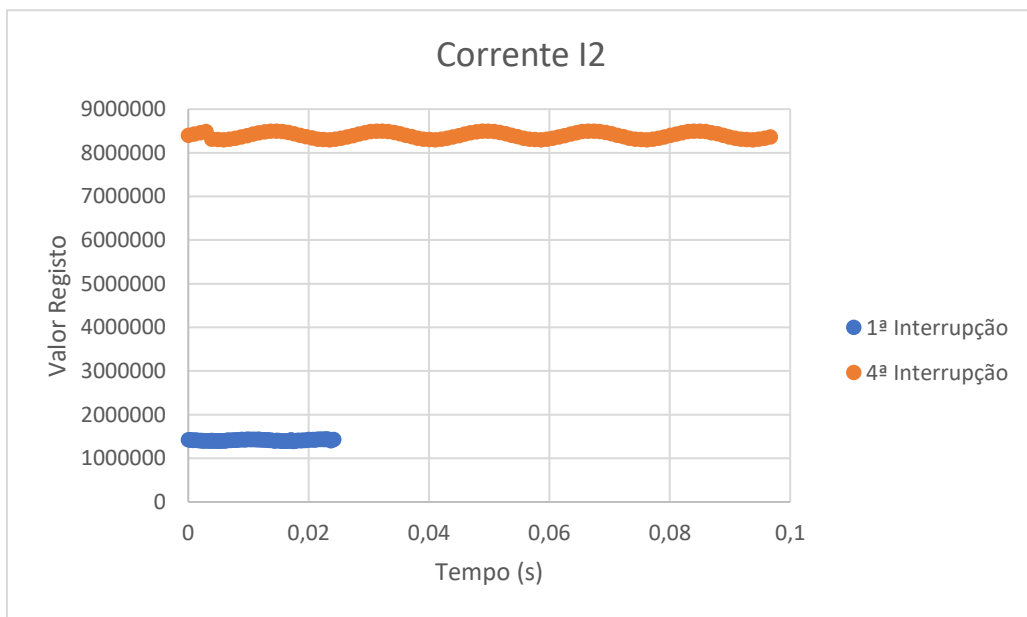


Figura 39 - Valores obtidos para a corrente da fase 2 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).

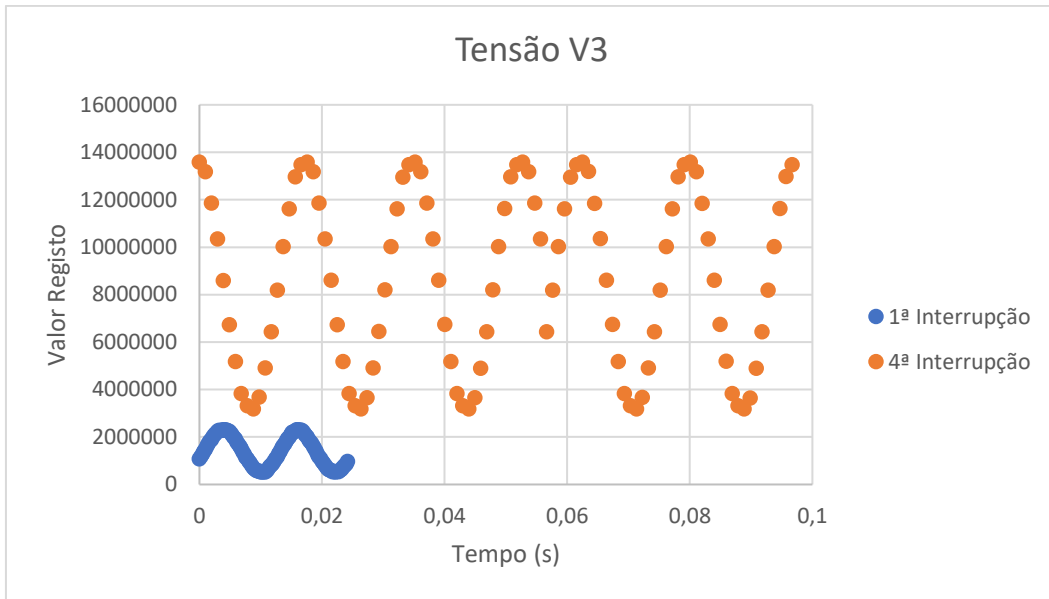


Figura 40 - Valores obtidos para a tensão da fase 3 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).

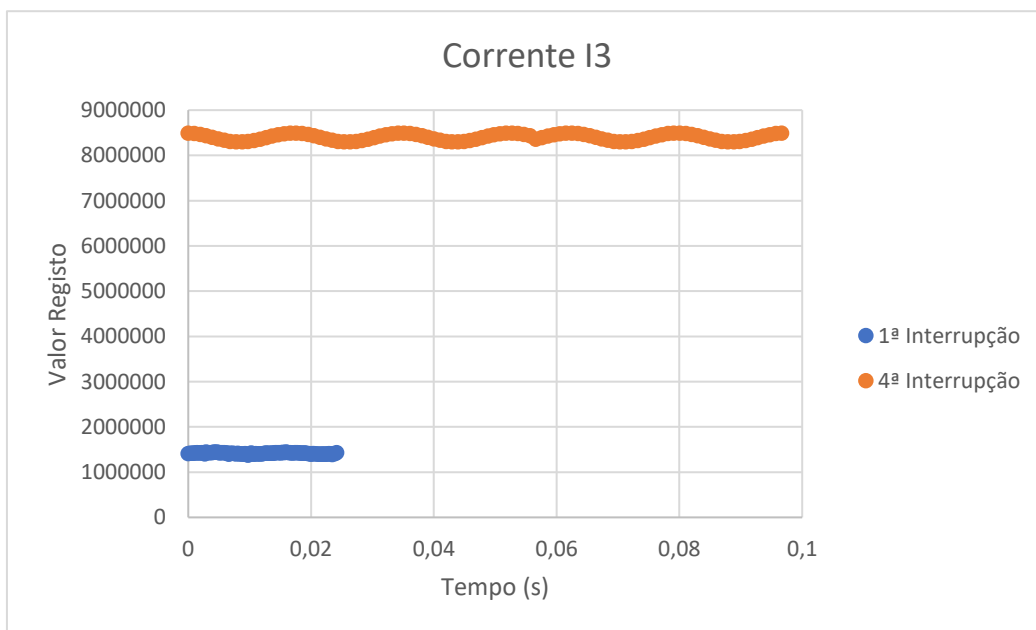
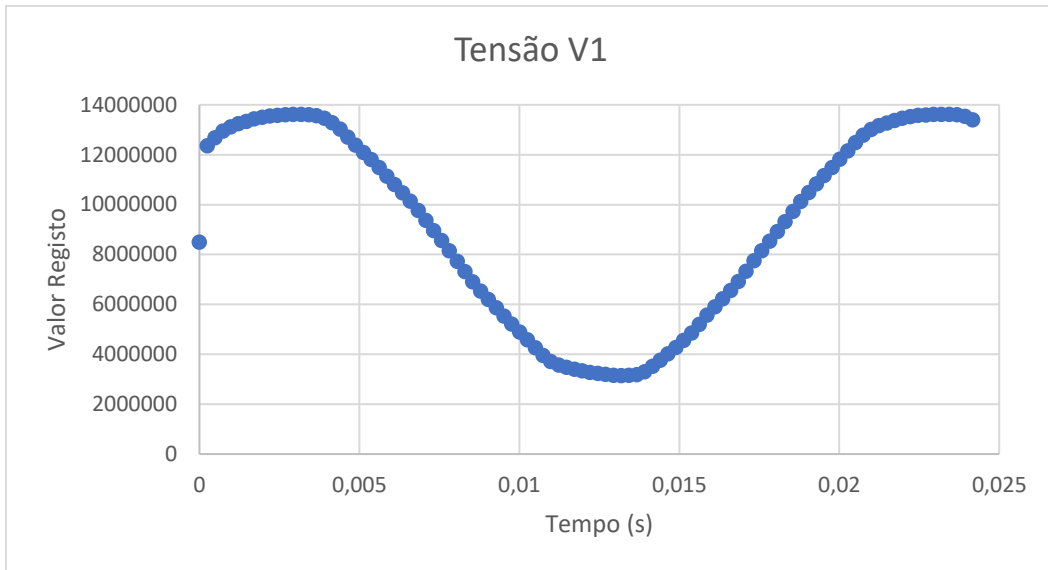


Figura 41 - Valores obtidos para a corrente da fase 3 para a 1ª interrupção (azul) e para a 4ª interrupção (laranja).

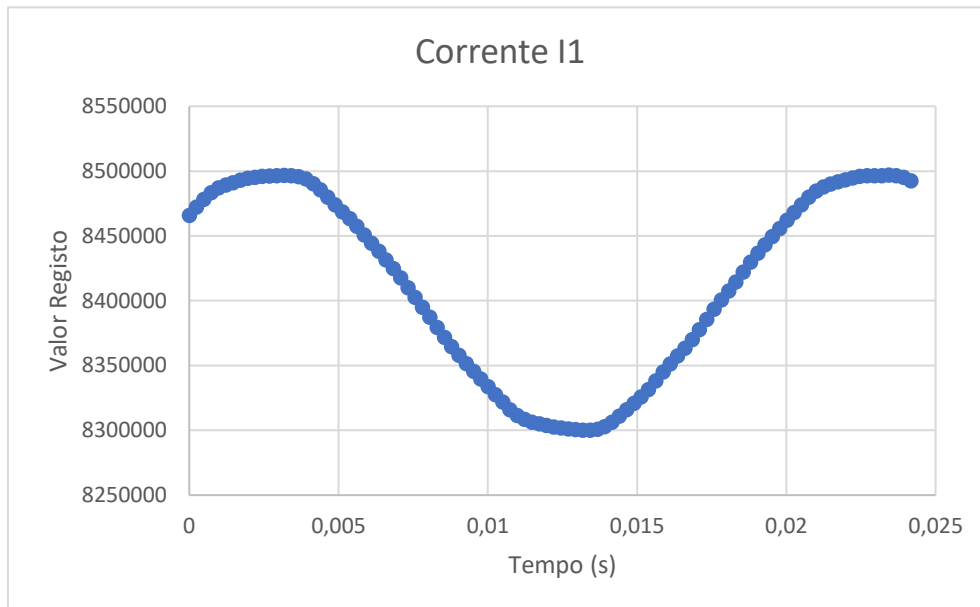
A segunda abordagem consistiu na utilização do modo conversão contínua, mas utilizando a geração de interrupção na quarta conversão. Como esta definição é só para a primeira conversão, todas as conversões seguintes vão gerar uma interrupção e, portanto, a gama de valores obtidos será a pretendida. Isto não acontecia no modo conversão única porque nesse modo é necessário iniciar constantemente a conversão via *software*, ou seja, iria ser gerada sempre uma interrupção à quarta conversão. Assim, do ponto de vista do conversor, cada conversão iria corresponder à primeira conversão e, portanto, os resultados obtidos não seriam corretos. As ligações elétricas utilizadas nesta abordagem são as mesmas utilizadas na abordagem anterior. Na Figura 42 está representado o gráfico para a tensão V1.





**Figura 42 – Valores obtidos para a tensão da fase 1 em conversão contínua.**

Analisando o gráfico observa-se que a gama de valores do registo apresenta os valores pretendidos. O sinal já não contém nenhuma quebra, devido a alterações efetuadas no *software*, onde os valores das primeiras 100 conversões são guardados numa variável e são logo representados. Verifica-se, no entanto, que a primeira amostra apresenta um valor errado, que se deve ao facto desta amostra ser obtida após a quarta interrupção. O resultado foi semelhante para a corrente da fase 1, que está representado na Figura 43.



**Figura 43 - Valores obtidos para a corrente da fase 1 em conversão contínua.**

É possível observar com mais detalhe pelos gráficos anteriores que a tensão e a corrente estão em fase.

Os gráficos das fases 2 e 3, apesar de ser utilizada a mesma abordagem, apresentam algumas quebras ao longo do tempo. Estas quebras devem-se ao facto de o *software* não estar otimizado, e, portanto, ao serem utilizados os 6 conversores em simultâneo e os seus valores guardados também em simultâneo, o programa apresenta estas quebras. Este erro pode ser contornado otimizando o *software*. Os gráficos da fase 2 estão representados na Figura 44 e Figura 45 e os gráficos da fase 3 estão representados na Figura 46 e Figura 47.

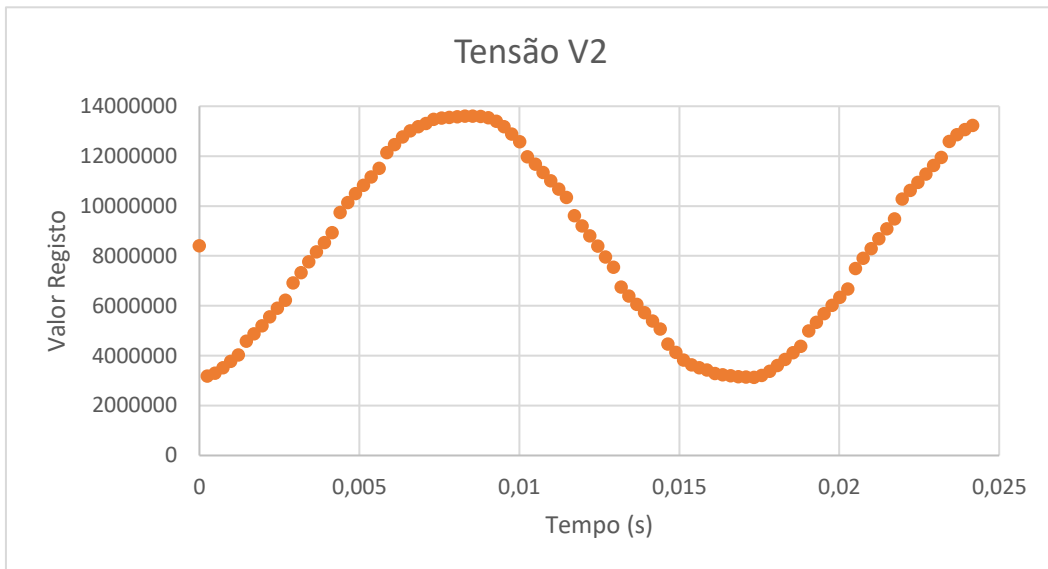


Figura 44 - Valores obtidos para a tensão da fase 2 em conversão contínua.

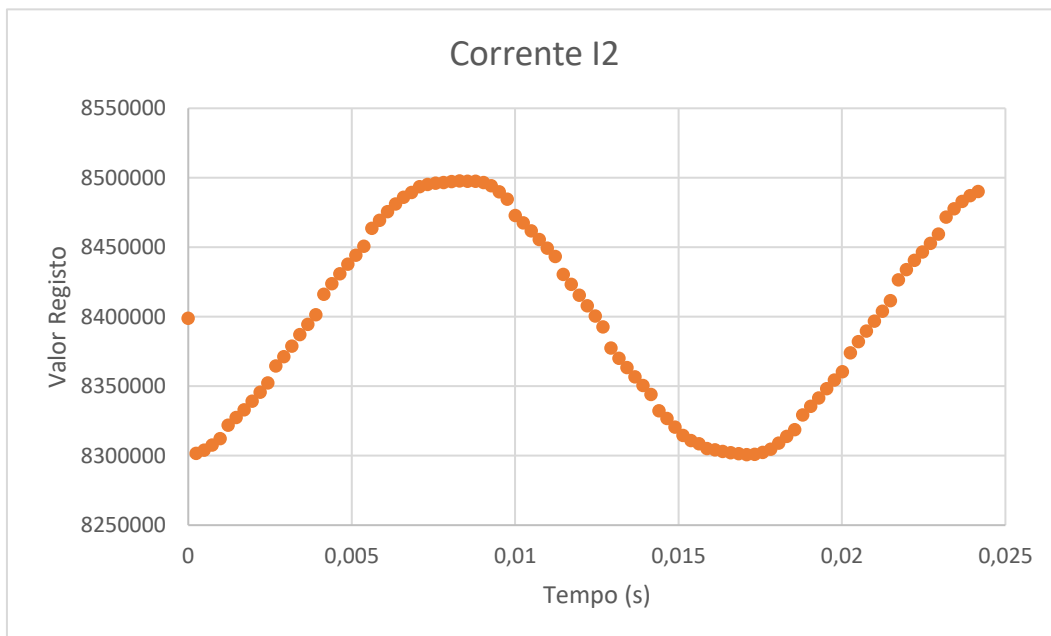
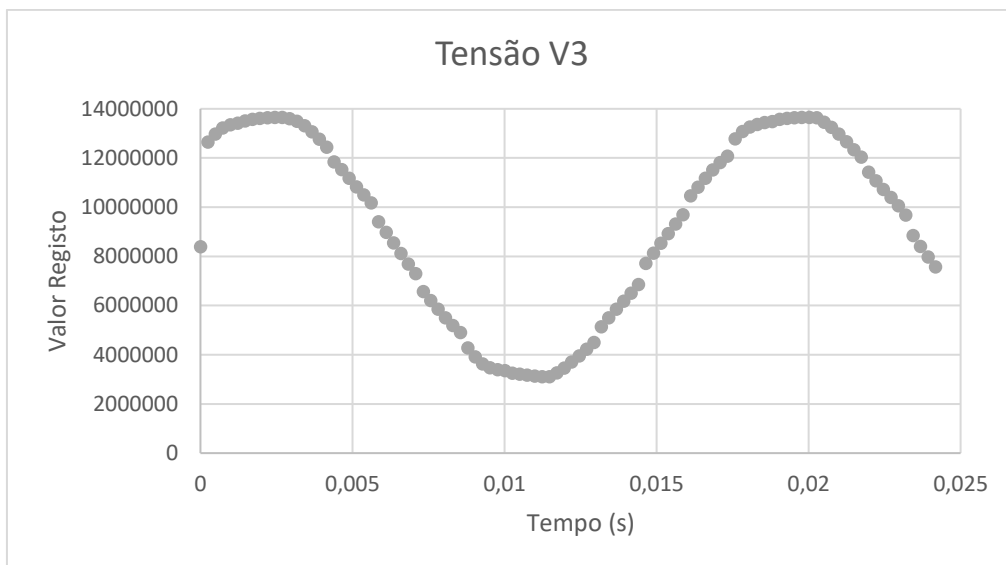
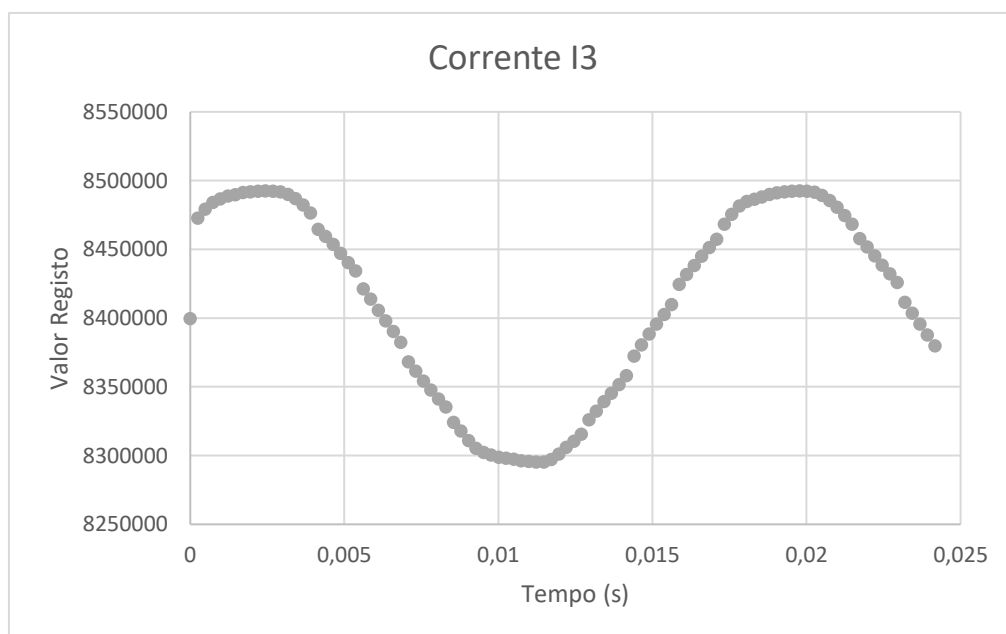


Figura 45 - Valores obtidos para a corrente da fase 2 em conversão contínua.

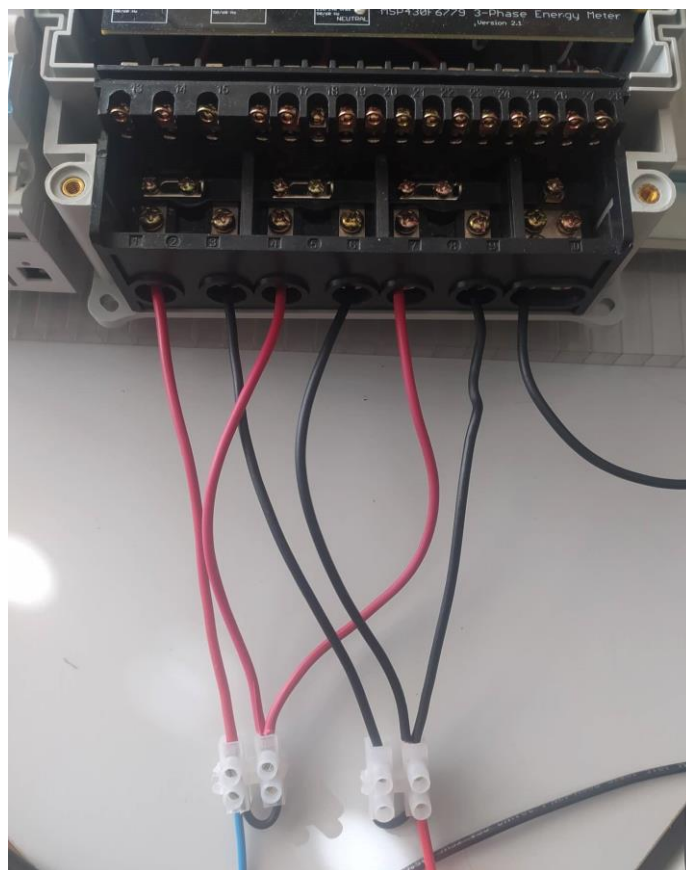


**Figura 46 - Valores obtidos para a tensão da fase 3 em conversão contínua.**



**Figura 47 - Valores obtidos para a corrente da fase 3 em conversão contínua.**

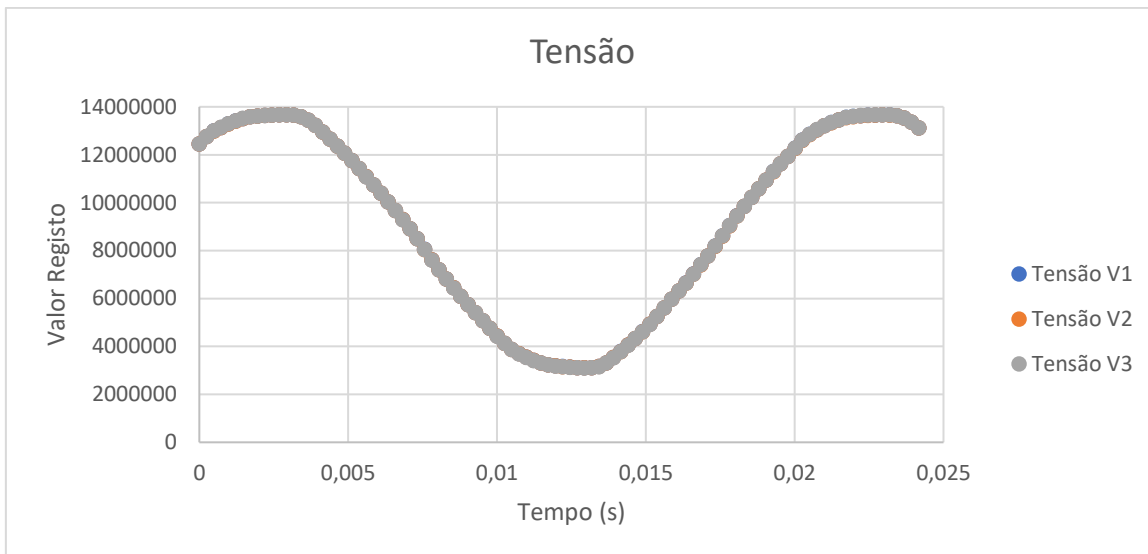
Na terceira abordagem manteve-se a utilização da conversão contínua. O *software* foi otimizado para aumentar a sua eficácia. Os 6 conversores estão conectados e a converter em simultâneo. As ligações elétricas das 3 fases estão representadas na Figura 48.



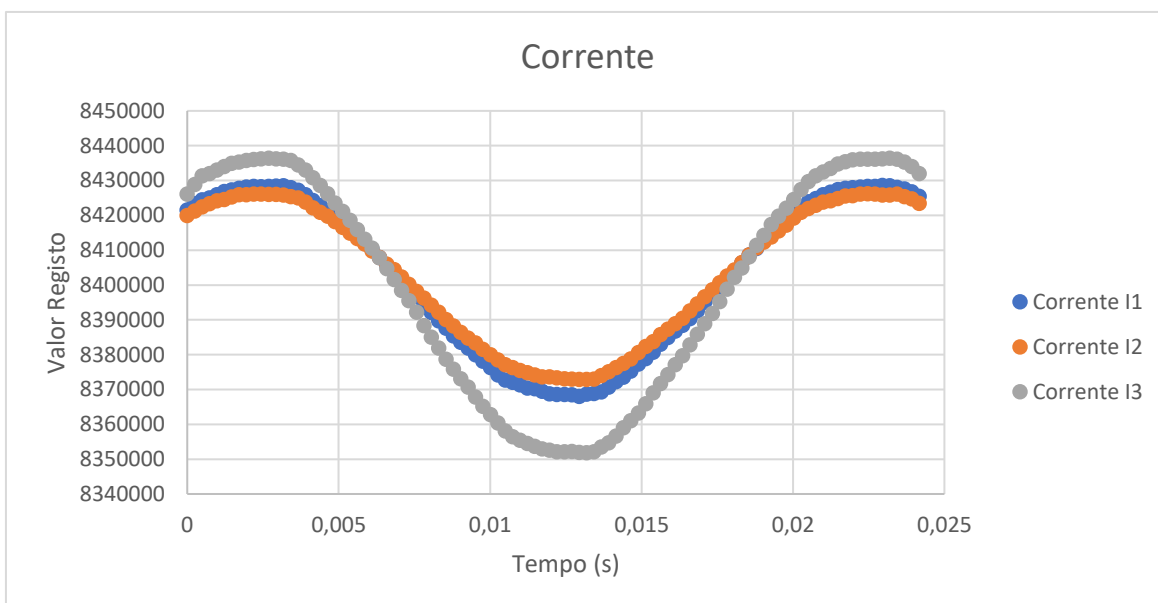
**Figura 48 - Ligações elétricas para as 3 fases.**

Os fios a vermelho representam as entradas positivas e os fios pretos as entradas negativas dos conversores de corrente. O fio preto mais à direita corresponde à ligação do neutro. Os fios azul e vermelho na zona inferior da imagem correspondem à ligação L e N do reóstato. É também possível observar as ligações efetuadas com os conectores para conseguir efetuar a medição das 3 fases em simultâneo.

O valor da primeira conversão, que gera interrupção à quarta conversão, não será guardado, ou seja, a conversão irá decorrer de forma igual, mas só serão guardados valores de conversão após a primeira conversão, garantindo que todas as conversões são obtidas com o mesmo intervalo de tempo, corrigindo o erro anterior do primeiro valor ser errado. Os valores das 3 fases foram colocados no mesmo gráfico para comparação entre fases. Na Figura 49 está representado o gráfico com as tensões das 3 fases e na Figura 50 está representado o gráfico com as correntes das 3 fases.



**Figura 49 - Valores de tensão obtidos para as 3 fases.**



**Figura 50 - Valores de corrente obtidos para as 3 fases.**

Analisando o gráfico da tensão, é possível observar que todas as amostras estão sobrepostas. Este resultado confirma que os 3 conversores utilizados para a medição da tensão estão a funcionar de igual modo, da forma pretendida.

Analisando o gráfico da corrente, é possível observar 3 formas de onda para as correntes das 3 fases. Verifica-se que todas as correntes estão em fase, o que seria de esperar, visto que a corrente medida é a mesma para os conversores. No entanto há ligeiras diferenças na amplitude dos 3 sinais que se devem certamente às ligações elétricas utilizadas para a medição da corrente que não a distribuem de forma uniforme entre as conexões. Estes valores confirmam que os 3 conversores estão a funcionar de igual modo, da forma pretendida.

## 4.2 – Resultados obtidos nos conversores analógico-digital *sigma delta* para o motor

Seguidos os ensaios no reóstato, seguiram-se então os ensaios num motor elétrico. Estes ensaios consistiram na ligação das 3 fases do motor aos 6 conversores do kit para obtenção de amostras de tensão e de corrente de cada fase. O agrupamento dos conversores por fase é igual ao agrupamento utilizado no reóstato. A obtenção destas amostras foi efetuada utilizando a versão de *software* mais otimizada para a obtenção dos melhores resultados possíveis.

As conexões elétricas utilizadas foram as mesmas que são recomendadas no *datasheet* do kit e que foram apresentadas anteriormente. No entanto, o kit está conectado entre o variador e o motor, e não diretamente ao motor. Na Figura 51 é apresentado o *setup* experimental utilizado para efetuar medições no motor.



Figura 51 - *Setup* experimental para medição da tensão e corrente do motor.

É possível ver com mais detalhe as conexões aos conversores do kit na Figura 52.

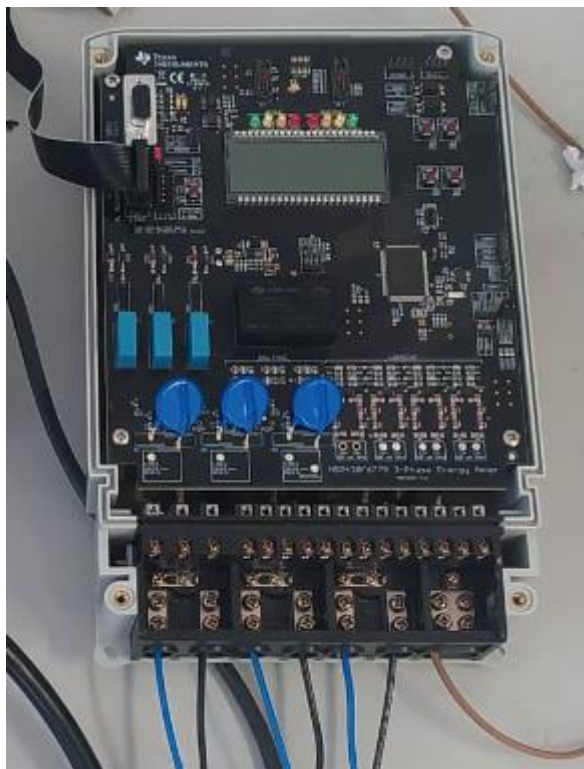


Figura 52 - Ligações elétricas do motor aos conversores do kit.

Os fios a azul e preto representam as entradas positivas e negativas dos conversores, respetivamente, e o fio a castanho representa a ligação ao neutro.

O primeiro ensaio consistiu na recolha de 500 amostras do motor quando este apresentava uma frequência de rotação de 15 Hz. Os resultados obtidos para a tensão estão representados na Figura 53 e os resultados obtidos para a corrente estão representados na Figura 54.

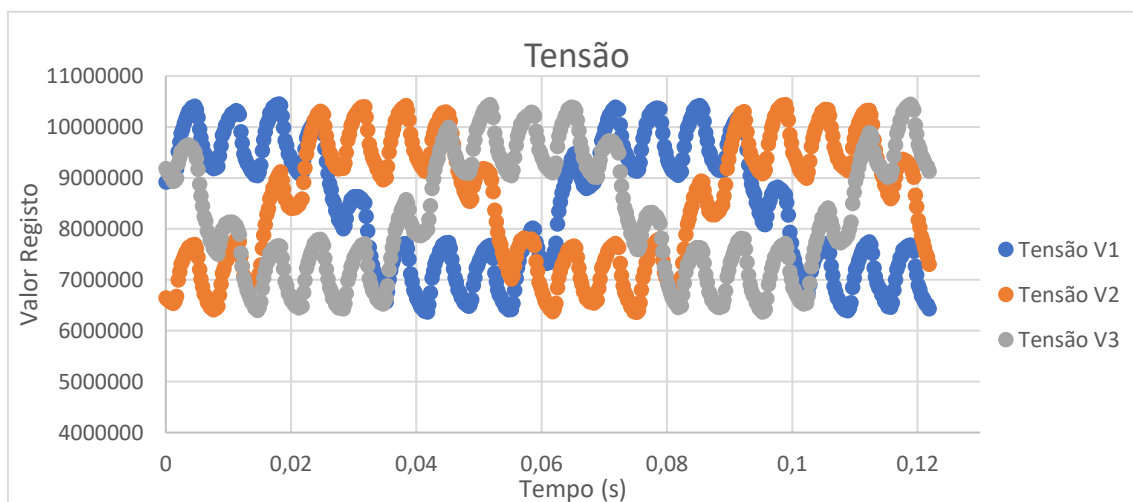
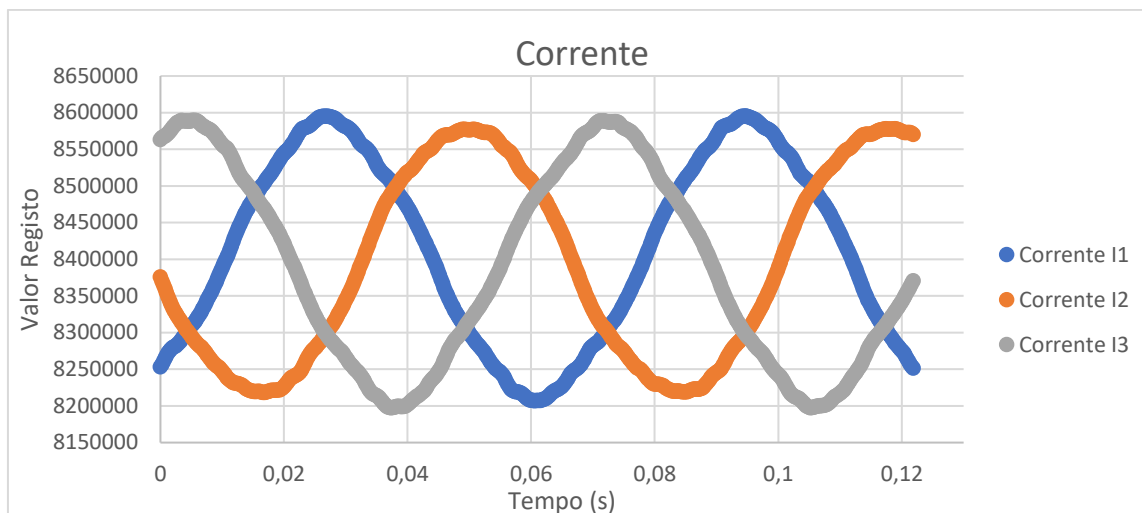


Figura 53 - Valores obtidos para as tensões das 3 fases do motor para uma frequência de 15 Hz.

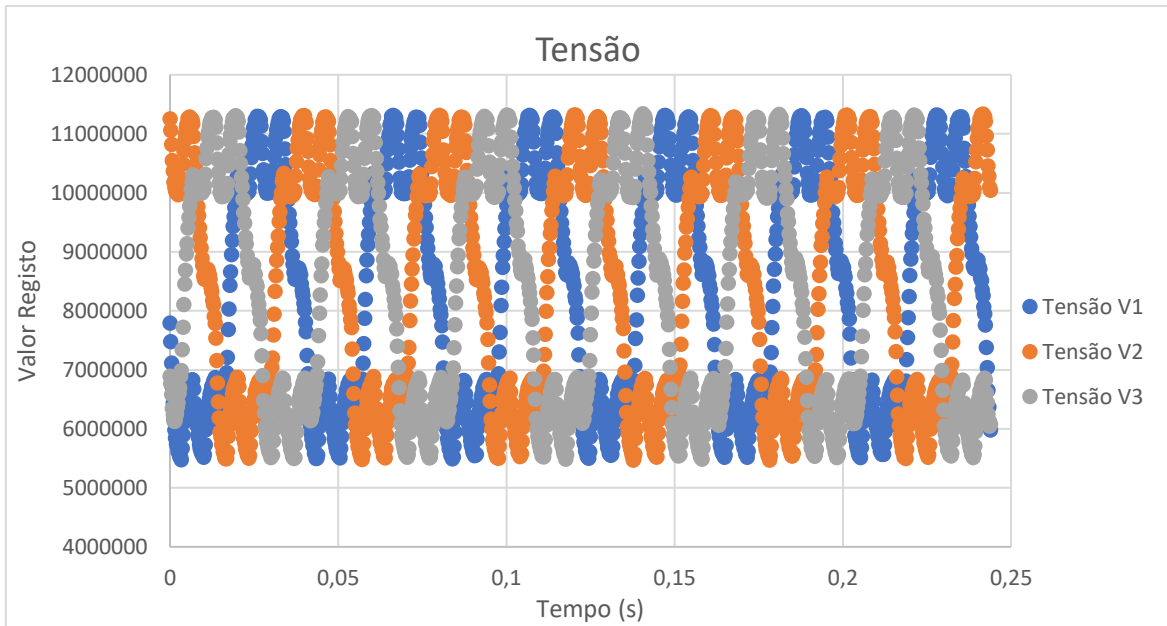


**Figura 54 - Valores obtidos para as correntes das 3 fases do motor para uma frequência de 15 Hz.**

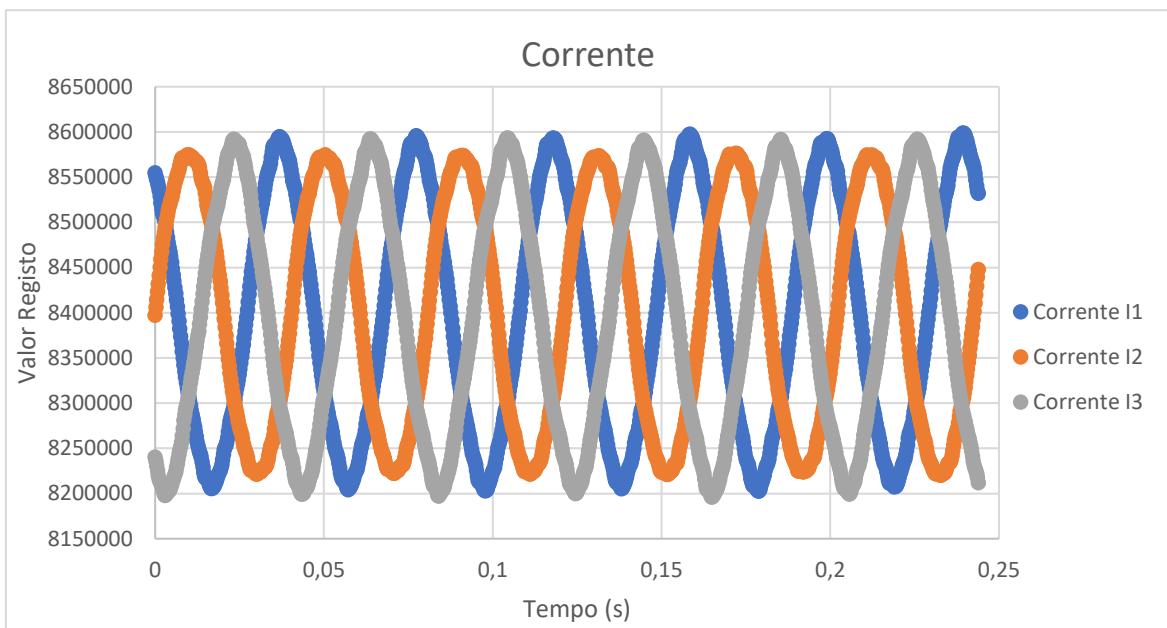
Analisando os gráficos observa-se que, tanto para a tensão como a corrente, existe um defasamento de  $120^\circ$  entre fases, o que seria de esperar visto que está presente um sistema trifásico. Observa-se também que o sinal das tensões apresenta uma forma sinusoidal, apesar da existência de variações ao longo do seu período, provenientes do variador. No entanto, o sinal das correntes apresenta-se como uma melhor aproximação de um sinal sinusoidal. Comparando os sinais da tensão com os da corrente, é possível observar que os sinais de tensão estão adiantados em relação aos sinais de corrente, o que seria de esperar tendo em conta que um motor de indução é uma carga indutiva.

O segundo ensaio foi efetuado com o motor a girar a uma frequência superior, 25 Hz. O número de amostras recolhidas foi também superior, perfazendo um total de 1000 amostras por conversor. Os resultados obtidos para a tensão estão representados na Figura 55 e os resultados obtidos para a corrente estão representados na Figura 56.





**Figura 55 - Valores obtidos para as tensões das 3 fases do motor para uma frequência de 25 Hz.**



**Figura 56 - Valores obtidos para as correntes das 3 fases do motor para uma frequência de 25 Hz.**

Os resultados obtidos para o segundo caso são bastante semelhantes aos resultados obtidos para o primeiro caso. É possível observar novamente o formato sinusoidal dos sinais de tensão (com algumas variações) e corrente, o desfasamento entre as fases e o avanço da tensão relativamente à corrente. No entanto observa-se também que a frequência dos sinais é superior, o que seria de esperar visto que o motor roda mais rápido neste caso, e a amplitude dos sinais de tensão é ligeiramente superior neste caso. A amplitude dos sinais de corrente é semelhante em ambos os casos.

Pode-se então observar que, para casos diferentes os resultados obtidos foram bastante semelhantes, sendo possível observar corretamente os sinais de tensão e de corrente de cada fase, concluindo que o sistema de recolha de amostras está a funcionar como pretendido

### 4.3 – Resultados obtidos na porta série UART

Os testes da porta série consistiram no envio dos valores dos conversores após o final das conversões. Enquanto houver comunicação série os conversores estarão desligados, até esta ser concluída.

Como foi referido anteriormente, as amostras são enviadas com a sua numeração e é enviada uma mensagem antes da primeira amostra de cada conversor para identificar a qual conversor pertencem as amostras enviadas.

A visualização dos dados obtidos pela porta série foi efetuada recorrendo ao *software Termite*, que permite enviar e receber dados via comunicação série. Os dados recebidos foram comparados aos dados obtidos no software de programação de microcontroladores da Texas Instruments, o *Code Composer Studio*, para verificar se todos os valores eram enviados corretamente. Na Figura 57 estão representados os valores obtidos para as primeiras 15 conversões para o conversor 0 em hexadecimal. À esquerda estão representados os resultados obtidos no *Code Composer Studio* e à direita estão representados os resultados obtidos no *Termite*.

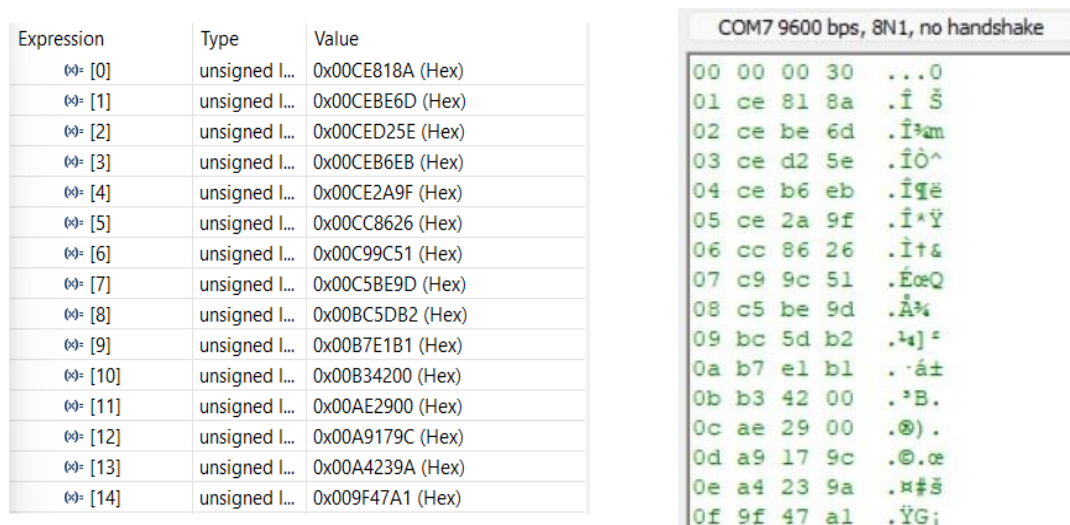


Figura 57 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 0 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita).

Comparando ambos os resultados, é possível observar que todos os valores são concordantes, ou seja, os 24 bits correspondentes ao valor da conversão estão a ser enviados corretamente pela porta série. Também está representada a mensagem identificadora do conversor (a primeira mensagem) e a numeração de cada conversão. Na Figura 58 estão representados os valores obtidos para as primeiras 15 conversões para o conversor 1 em hexadecimal.

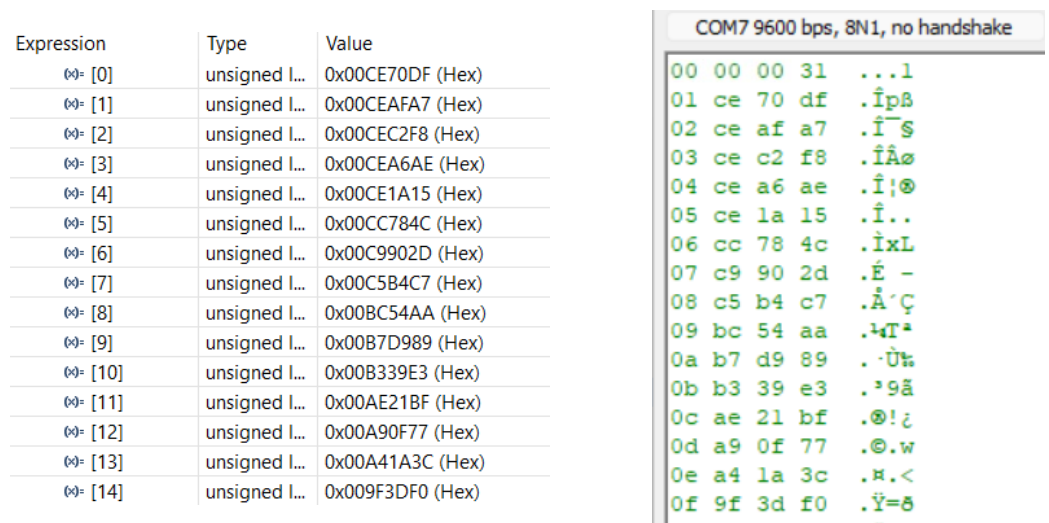


Figura 58 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 1 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita).

Novamente, é possível observar que todos os valores estão concordantes. Verifica-se também o envio da mensagem identificadora do conversor 1 (a primeira mensagem), diferente da do conversor 0 e novamente a numeração de cada amostra do conversor. Na Figura 59 estão representados os valores obtidos para as primeiras 15 conversões para o conversor 2 em hexadecimal.

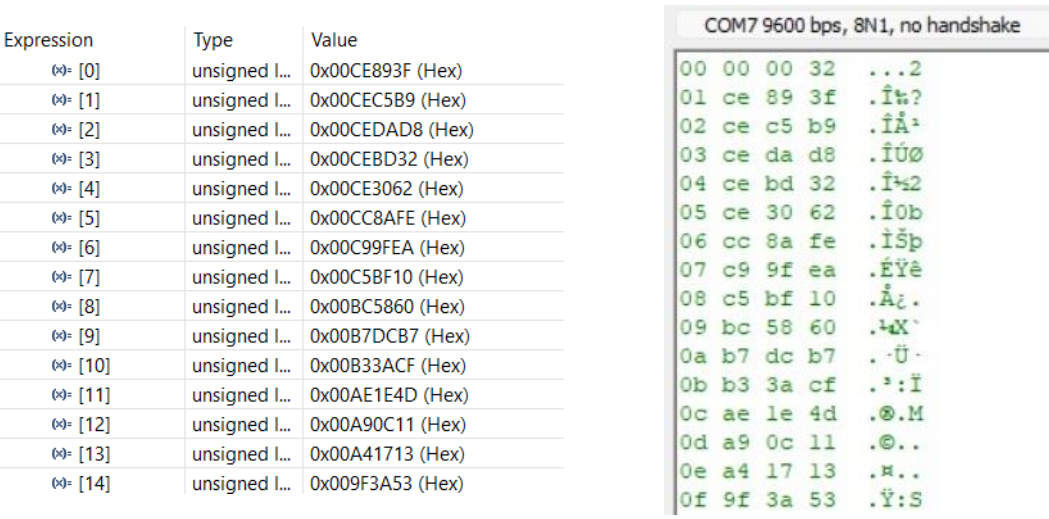


Figura 59 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 2 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita).

Na Figura 60 estão representados os valores obtidos para as primeiras 15 conversões para o conversor 4 em hexadecimal.

Expression	Type	Value
[0]	unsigned l...	0x00809B8C (Hex)
[1]	unsigned l...	0x00809B9B (Hex)
[2]	unsigned l...	0x00809B6B (Hex)
[3]	unsigned l...	0x00809A97 (Hex)
[4]	unsigned l...	0x00809981 (Hex)
[5]	unsigned l...	0x008097CA (Hex)
[6]	unsigned l...	0x00809426 (Hex)
[7]	unsigned l...	0x00808E96 (Hex)
[8]	unsigned l...	0x0080804E (Hex)
[9]	unsigned l...	0x008079F6 (Hex)
[10]	unsigned l...	0x008071C0 (Hex)
[11]	unsigned l...	0x00806BC0 (Hex)
[12]	unsigned l...	0x00806533 (Hex)
[13]	unsigned l...	0x00805D7D (Hex)
[14]	unsigned l...	0x008056AD (Hex)

COM7 9600 bps, 8N1, no handshake				
00	00	00	33	. . . 3
01	80	9b	8c	.€ >œ
02	80	9b	9b	.€ >>
03	80	9b	6b	.€ >k
04	80	9a	97	.€ š–
05	80	99	81	.€™
06	80	97	ca	.€–Ê
07	80	94	26	.€"¿
08	80	8e	96	.€ž–
09	80	80	4e	.€€N
0a	80	79	f6	.€yö
0b	80	71	c0	.€qÀ
0c	80	6b	c0	.€kÀ
0d	80	65	33	.€e3
0e	80	5d	7d	.€] }
0f	80	56	ad	.€V

Figura 60 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 4 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita).

Na Figura 61 estão representados os valores obtidos para as primeiras 15 conversões para o conversor 5 em hexadecimal.

Expression	Type	Value
[0]	unsigned l...	0x0080A307 (Hex)
[1]	unsigned l...	0x0080A427 (Hex)
[2]	unsigned l...	0x0080A450 (Hex)
[3]	unsigned l...	0x0080A258 (Hex)
[4]	unsigned l...	0x0080A188 (Hex)
[5]	unsigned l...	0x00809FEC (Hex)
[6]	unsigned l...	0x00809BE4 (Hex)
[7]	unsigned l...	0x00809603 (Hex)
[8]	unsigned l...	0x008088B1 (Hex)
[9]	unsigned l...	0x008081D9 (Hex)
[10]	unsigned l...	0x00807B03 (Hex)
[11]	unsigned l...	0x008072A3 (Hex)
[12]	unsigned l...	0x008069A2 (Hex)
[13]	unsigned l...	0x00806313 (Hex)
[14]	unsigned l...	0x00805CEF (Hex)

COM7 9600 bps, 8N1, no handshake				
00	00	00	34	. . . 4
01	80	a3	07	.€£.
02	80	a4	27	.€¤'
03	80	a4	50	.€¤P
04	80	a2	58	.€¢X
05	80	a1	88	.€¡^
06	80	9f	ec	.€Ÿì
07	80	9b	e4	.€>ä
08	80	96	03	.€–.
09	80	88	b1	.€^±
0a	80	81	d9	.€ Û
0b	80	7b	03	.€{.
0c	80	72	a3	.€r£
0d	80	69	a2	.€io
0e	80	63	13	.€c.
0f	80	5c	ef	.€\i

Figura 61 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 5 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita).

Na Figura 62 estão representados os valores obtidos para as primeiras 15 conversões para o conversor 6 em hexadecimal.

Expression	Type	Value
0x [0]	unsigned l...	0x0080A275 (Hex)
0x [1]	unsigned l...	0x0080A305 (Hex)
0x [2]	unsigned l...	0x0080A3EB (Hex)
0x [3]	unsigned l...	0x0080A316 (Hex)
0x [4]	unsigned l...	0x0080A29B (Hex)
0x [5]	unsigned l...	0x0080A0B3 (Hex)
0x [6]	unsigned l...	0x00809B00 (Hex)
0x [7]	unsigned l...	0x0080928E (Hex)
0x [8]	unsigned l...	0x008081A5 (Hex)
0x [9]	unsigned l...	0x00807A73 (Hex)
0x [10]	unsigned l...	0x00807285 (Hex)
0x [11]	unsigned l...	0x00806A59 (Hex)
0x [12]	unsigned l...	0x00805FFE (Hex)
0x [13]	unsigned l...	0x0080569A (Hex)
0x [14]	unsigned l...	0x00804E1B (Hex)

COM7 9600 bps, 8N1, no handshake				
00	00	00	35	...5
01	80	a2	75	.€cu
02	80	a3	05	.€£.
03	80	a3	eb	.€£ë
04	80	a3	16	.€£.
05	80	a2	9b	.€c>
06	80	a0	b3	.€ '3
07	80	9b	00	.€>.
08	80	92	8e	.€'ž
09	80	81	a5	.€ ¥
0a	80	7a	73	.€zs
0b	80	72	85	.€r...
0c	80	6a	59	.€jY
0d	80	5f	fe	.€_p
0e	80	56	9a	.€Vš
0f	80	4e	1b	.€N.

Figura 62 - Resultados obtidos das primeiras 15 amostras do conversor 6 (esquerda) e envio das amostras por porta série (direita).

Todas as mensagens referidas anteriormente foram enviadas na mesma sequência de comunicação série. Verifica-se então que a porta série apresenta o funcionamento desejado e todos os valores são enviados corretamente.

## 4.4 – Representação de transmissão de dados no *display* LCD

De modo a indicar o estado do envio dos dados do kit, optou-se por utilizar o *display* LCD e os LEDs para o representar. Assim, enquanto estiver a decorrer a transmissão dos dados, o LCD irá apresentar a mensagem "TX\_ON". É possível visualizar esta representação na Figura 63.

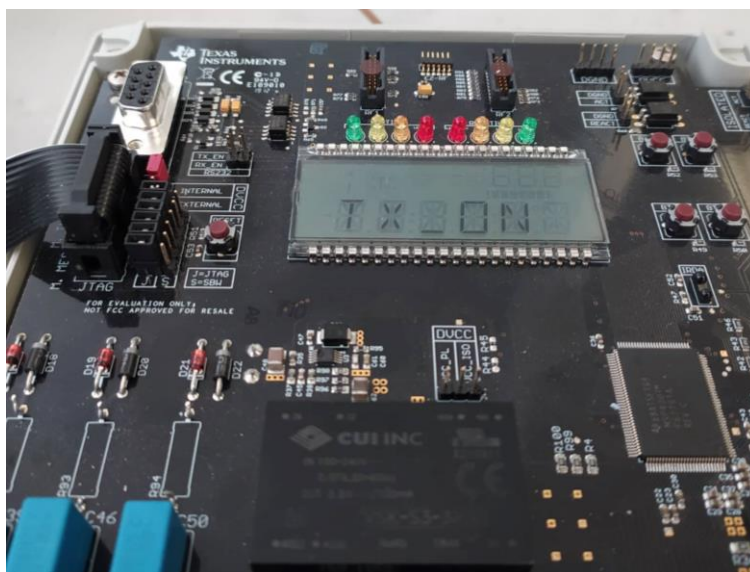
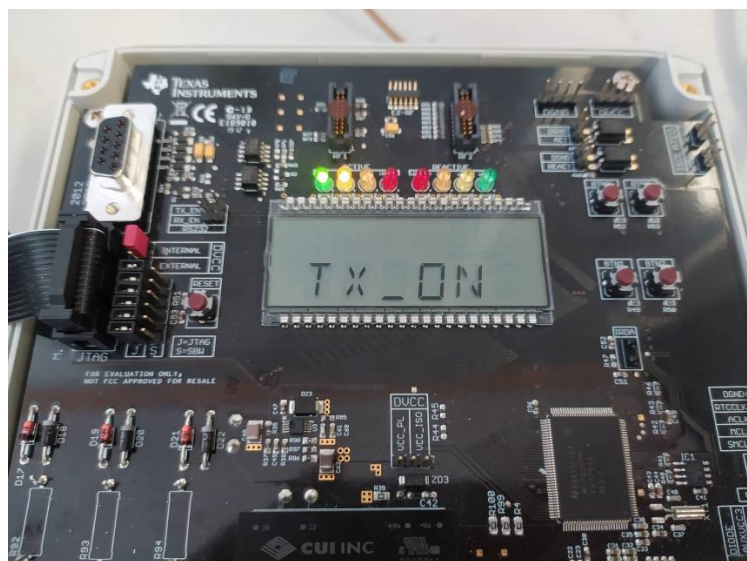


Figura 63 - Representação de envio de dados no LCD.

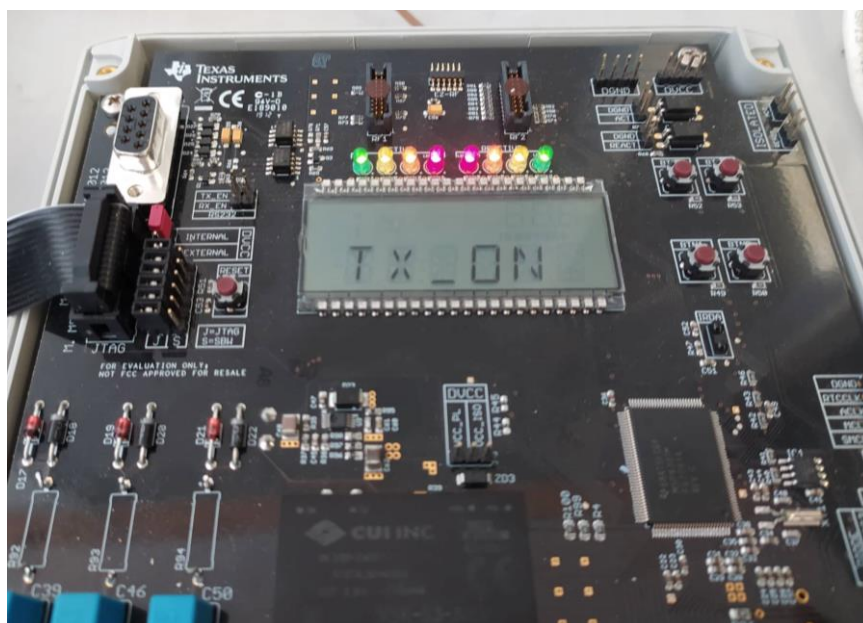


Os LEDs são utilizados para representar o progresso da transmissão dos dados. Quando todos os valores do primeiro conversor forem enviados, os dois primeiros LEDs são ativados, conforme está representado na Figura 64.



**Figura 64 - Representação do estado da transmissão de dados no kit – parte 1.**

Quando todos os valores do segundo conversor forem enviados, é ativado o terceiro LED, estando assim ativos os 3 primeiros LEDs. De seguida os LEDs vão acendendo sucessivamente durante o envio dos dados dos conversores seguintes até ficarem todos acesos após o envio dos dados do último conversor, como se mostra na Figura 65.



**Figura 65 - Representação do estado da transmissão de dados no kit - parte 2.**

Quando o kit voltar a recolher valores do motor, após a transmissão, os LEDs são todos desativados. Não existe mensagem no LCD para indicar que está a recolher valores porque o

processo de recolha de dados é bastante mais rápido do que o de envio de mensagem, e portanto não seria perceptível.

Deste modo é possível ter uma melhor perceção do estado de funcionamento do kit sem ser necessário que este esteja ligado a um computador.

## 5 – Conclusão e Trabalhos Futuros

Numa vertente inicial este trabalho focou-se no estudo dos vários tipos de manutenção utilizados na indústria, com especial foco na manutenção preditiva. Foi possível analisar sumariamente as ferramentas e soluções mais recentes disponíveis neste tipo de manutenção e a sua importância na otimização dos processos industriais, através de tecnologias provenientes da quarta revolução industrial.

Estudou-se também o funcionamento de motores de indução elétricos trifásicos e as principais causas de mau funcionamento deste tipo de equipamentos. Foram analisados vários métodos de monitorização de motores elétricos e exploradas as grandezas que é necessário medir para diagnosticar efeitos perniciosos no ciclo de vida do equipamento. Essas técnicas apresentam-se como ferramentas bastante importantes sendo adotadas em processos de manutenção preditiva.

Na vertente prática foi identificado um kit específico para a medição de grandezas elétricas (Kit EVM430-F6779) e foram exploradas as suas capacidades. Inicialmente foi estudado o funcionamento dos seus componentes e do microcontrolador que constitui a sua unidade principal. Posteriormente, e como não era detida formação de base nesta área, foi explorada a programação de microcontroladores no geral e, em particular, a do microprocessador MSP430F67791A que é a referida unidade instalada neste kit. Desenvolveu-se então um programa para medição de valores de tensão e corrente em motores de indução por forma a obter dados para aplicação de Vetores de *Park* no diagnóstico precoce de avarias. Montou-se um *setup* experimental, primeiro com um reóstato para verificar o funcionamento da aquisição de dados nos 3 canais necessários para monitorização em trifásico. Em seguida utilizou-se um conjunto motor e variador de velocidade para os testes finais.

Após a programação do kit, procedeu-se ao teste de recolha de valores do referido motor elétrico tendo sido adquiridas várias amostras da tensão e corrente. Os resultados obtidos foram avaliados e concluiu-se que os objetivos propostos para funcionamento do kit foram atingidos com sucesso: aquisição correta dos valores da tensão e corrente de cada fase do motor e o envio destes valores corretamente através de comunicação série para posterior análise.

O próximo passo deste trabalho consiste na implementação de sensores de vibração e temperatura no motor de indução para complementar a análise e monitorização no motor de indução.

Será também necessária a ligação deste sistema aos módulos wireless que implementam o protocolo de comunicação suportado na patente "*Method and Apparatus for the Deterministic Capture of a Communication Channel Shared Among Contention-Based Technologies*" para o envio dos dados provenientes dos sensores e do kit em *hard real time*. O trabalho futuro deverá também incluir o desenvolvimento de uma plataforma de registo desses dados. Note-se que a utilização de



interface série vai permitir ligar diretamente aos referidos módulos wireless desenvolvidos também no âmbito do Projeto Detainer.

Posteriormente deverão também ser efetuados mais testes em motores de indução de potências diferentes e em ambiente industrial, em particular em motores que apresentem algum tipo de falha, para avaliar a capacidade de deteção de falhas do conceito de prova proposto e o seu correto funcionamento em motores diferentes.

# Bibliografia

- [1] "Advanced Tech," 3 Novembro 2021. [Online]. Available: <https://www.advancedtech.com/blog/preventive-vs-predictive-maintenance/>.
- [2] "Omnisci," 3 Novembro 2021. [Online]. Available: <https://www.omnisci.com/technical-glossary/predictive-maintenance>.
- [3] "Renown," 21 Outubro 2021. [Online]. Available: <https://www.renown-electric.com/assets/Preventative-vs-Predictive-Maintenance-eBook-1.pdf>.
- [4] "Predica Group," 3 Novembro 2021. [Online]. Available: <https://www.pedicagroup.com/blog/predictive-maintenance/>.
- [5] "Advanced Tech," 3 Novembro 2021. [Online]. Available: <https://www.advancedtech.com/resource/ats-predictive-maintenance-testing-reveals-imminent-transformer-failure-saving-manufacturer-40k/>.
- [6] "Oracle," 5 Dezembro 2021. [Online]. Available: <https://www.oracle.com/a/ocom/docs/value-of-predictive-maintenance.pdf>.
- [7] "Intechopen," 21 Outubro 2021. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/54865>.
- [8] A. F. R. Sá e A. E. P. C. Barbosa, - Máquinas Elétricas e Alguns Engenhos, 2ª Edição.
- [9] "Electrical Technology," 16 11 2021. [Online]. Available: <https://www.electricaltechnology.org/2020/05/three-phase-induction-motor.html>.
- [10] "Intechopen," 3 Dezembro 2021. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/40906>.
- [11] "Ripublication," 21 Outubro 2021. [Online]. Available: [https://www.ripublication.com/irph/ijec16/ijecv8n1\\_02.pdf](https://www.ripublication.com/irph/ijec16/ijecv8n1_02.pdf).
- [12] "Banner Engineering," 21 Outubro 2021. [Online]. Available: <https://info.bannerengineering.com/cs/groups/public/documents/literature/193182.pdf>.
- [13] "TI," 13 Outubro 2021. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/an/slaa577g/slaa577g.pdf?ts=1634074068308&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FEVM430-F6779](https://www.ti.com/lit/an/slaa577g/slaa577g.pdf?ts=1634074068308&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FEVM430-F6779).

# Anexos

Apresentam-se de seguida alguns excertos do software desenvolvido e a descrição do seu funcionamento para uma melhor compreensão do funcionamento do kit.

O seguinte excerto está localizado na função *main* e apresenta a inicialização e programação dos vários periféricos e os seus respetivos registos. São também ativadas as interrupções globais. Este excerto só é executado uma vez.

```
69 WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD; // stop watchdog timer
70
71 P1SEL0 |= BIT2;
72 P1SEL1 |= BIT2;
73
74 //Leds
75 P2DIR |= BIT4 | BIT7;
76 P5DIR |= BIT0 | BIT1 | BIT2 | BIT3;
77 P4DIR |= BIT3 | BIT7;
78
79 P2OUT |= BIT4 | BIT7;
80 P5OUT |= BIT0 | BIT1 | BIT2 | BIT3;
81 P4OUT |= BIT3 | BIT7;
82
83 //SETUP UART0
84 UCA0CTLW0 = 0b0000000000000001;
85 UCA0CTLW0 = 0b000000001000001; //ACLK
86 UCA0BRW = 0b000000000000011; // UCBRx 9600
87 UCA0MCTLW = 0b100100100000000; // UCBSx UCBRFx 9600
88 UCA0CTLW0 = 0b000000000100000;
89 UCA0IE = 0B000000000000011;
90
91 //PORT SETUP FOR UART TX-RX
92 //P3DIR = 0b0000001;
93 PBSEL0_L = 0b0000010;
94
95 //SETUP LCD
96 LCDCMEMCTL = 0b000000000000110; //Limpar memórias
97 LCDCVCTL = 0b000001000001000; //Ligar a alimentação do LCD
98 LCDCPCTL0 = 0b111111111111111; //Escolha dos segmentos
99 LCDCPCTL1 = 0b111111111111111; //Escolha dos segmentos
100 LCDCCTL0 = 0b111100100011101; //Ligar LCD, escolha do modo e frequência com divisão de 32 e 1
101
102 //SETUP SD24
103 SD24BCTL0 = 0b00000000010110;
104
105 SD24BCCTL0 = 0b000000000001000;
106 SD24BCCTL1 = 0b000000000001000;
107 SD24BCCTL2 = 0b000000000001000;
108 SD24BCCTL4 = 0b000000000001000;
109 SD24BCCTL5 = 0b000000000001000;
110 SD24BCCTL6 = 0b000000000001000;
111
112 SD24BIE = 0b000000001000000;
113 SD24BCTL1 |= SD24GRP0SC;
114 __enable_interrupt();
```

Figura A – Código da função *main* - inicialização.

O seguinte excerto de código, também localizado na função *main*, é executado ciclicamente e tem como função a reinicialização dos LED's e a atualização do *display* LCD com a mensagem de transferência de dados.

```
115     while (1)
116     {
117         if (convert)
118         {
119             P5OUT |= BIT0; //led3
120             P5OUT |= BIT1; //led2
121             P5OUT |= BIT2; //led1
122             P5OUT |= BIT3; //ledACT
123             P4OUT |= BIT3; //ledREACT
124             P4OUT |= BIT7; //led4
125             P2OUT |= BIT7; //led5
126             P2OUT |= BIT4; //led6
127         }
128         if (send)
129         {
130             LCDM1 = 0b10000000;
131             LCDM2 = 0b01010000;
132             LCDM3 = 0b00000000;
133             LCDM4 = 0b10101010;
134             LCDM5 = 0b00010000;
135             LCDM7 = 0b11111100;
136             LCDM9 = 0b01101100;
137             LCDM10 = 0b10000010;
138             LCDM11 = 0b00000000;
139         }
140     }
141 }
```

Figura B – Código da *main* – execução cíclica.

O excerto de código seguinte pertence à rotina de interrupção do conversor *analógico sigma delta*. Tem como função guardar o valor dos registos de memória de cada conversor (o valor da amostra recolhido) nas respetivas variáveis criadas para cada conversor. Estas variáveis são *arrays* com um tamanho pré-definido, onde os valores são guardados de forma ordenada. Para cada uma destas variáveis está também associado um ponteiro.

```

170 while ((SD24BIFG & SD24IFG0) == 0 && (SD24BIFG & SD24IFG1) == 0
171         && (SD24BIFG & SD24IFG2) == 0 && (SD24BIFG & SD24IFG4) == 0
172         && (SD24BIFG & SD24IFG5) == 0 && (SD24BIFG & SD24IFG6) == 0);
173
174 adc_val_l0 = SD24BMEML0;
175 adc_val_h0 = SD24BMEMH0;
176 adc_val_l1 = SD24BMEML1;
177 adc_val_h1 = SD24BMEMH1;
178 adc_val_l2 = SD24BMEML2;
179 adc_val_h2 = SD24BMEMH2;
180
181 adc_val_l4 = SD24BMEML4;
182 adc_val_h4 = SD24BMEMH4;
183 adc_val_l5 = SD24BMEML5;
184 adc_val_h5 = SD24BMEMH5;
185 adc_val_l6 = SD24BMEML6;
186 adc_val_h6 = SD24BMEMH6;
187
188 if (convert)
189 {
190     //TENSÃO V1
191     *v1 = adc_val_h0;
192     *v1 = (*v1 << 16) + adc_val_l0;
193
194     //TENSÃO V2
195     *v2 = adc_val_h1;
196     *v2 = (*v2 << 16) + adc_val_l1;
197
198     //TENSÃO V3
199     *v3 = adc_val_h2;
200     *v3 = (*v3 << 16) + adc_val_l2;
201
202     //CORRENTE I1
203     *i1 = adc_val_h4;
204     *i1 = (*i1 << 16) + adc_val_l4;
205
206     //CORRENTE I2
207     *i2 = adc_val_h5;
208     *i2 = (*i2 << 16) + adc_val_l5;
209
210     //CORRENTE I3
211     *i3 = adc_val_h6;
212     *i3 = (*i3 << 16) + adc_val_l6;
213
214     v1++;
215     v2++;
216     v3++;
217     i1++;
218     i2++;
219     i3++;
220     count++;
221 }
222 convert = 1;

```

Figura C – Código da rotina de interrupção do conversor da ADC – recolha de valores.

O seguinte excerto também pertence à rotina de interrupção do conversor analógico *sigma delta* e tem como função a desativação dos conversores analógicos digitais após a recolha do número de amostras pretendido, ou seja, quando todas as posições das variáveis das amostras de cada conversor estão preenchidas. Os ponteiros associados a cada variável são apontados à

primeira posição da respetiva variável e também é ativado o módulo de comunicação série para envio das amostras.

```
224     if (count >= size)
225     {
226         count = 0;
227         SD24BCTL1 &= ~SD24GRP0SC;
228         convert = 0;
229         v1 = voltage_V1;
230         v2 = voltage_V2;
231         v3 = voltage_V3;
232         i1 = current_I1;
233         i2 = current_I2;
234         i3 = current_I3;
235         converter = 0;
236         send = 1;
237         UCA0IFG |= UCTXIFG;
238     }
239 }
```

**Figura D – Código da rotina de interrupção do conversor da ADC – fim da recolha de valores**

O seguinte excerto de código representa uma função que foi desenvolvida para enviar corretamente *arrays* através de comunicação série. Esta função será utilizada para o envio das amostras, na rotina de interrupção da comunicação série.

```

27 void send_array(unsigned long int *pointer)
28 {
29
30     char bit_0, bit_1, bit_2;
31     bit_0 = *pointer;
32     bit_1 = *pointer >> 8;
33     bit_2 = *pointer >> 16;
34
35     if (val == 4)
36     {
37         UCA0TXBUF = msg_counter;
38         msg_counter++;
39         val++;
40     }
41     else if (val == 5)
42     {
43         UCA0TXBUF = bit_2;
44         val++;
45     }
46     else if (val == 6)
47     {
48         UCA0TXBUF = bit_1;
49         val++;
50     }
51     else if (val == 7)
52     {
53         UCA0TXBUF = bit_0;
54         next = 1;
55         count++;
56         val = 4;
57     }
58 }

```

**Figura E – Função de envio de arrays.**

O excerto de código seguinte pertence à rotina de interrupção da porta série e tem como objetivo enviar as amostras recolhidas e a mensagem de identificação do conversor, através de comunicação UART. Este excerto é semelhante para cada conversor, existindo pequenas alterações por cada conversor, estando representado o conversor 0.

```

263     if (converter == 0)
264     {
265         if (val <= 2)
266         {
267             UCA0TXBUF = 0x00;
268             val++;
269         }
270         else if (val == 3)
271         {
272             UCA0TXBUF = 0x30;
273             val++;
274         }
275         else
276         {
277             send_array(v1);
278             if (next)
279             {
280                 v1++;
281                 next = 0;
282             }
283         }
284     }
285
286     if (count >= size)
287     {
288
289         converter++;
290         count = 0;
291         val = 0;
292         msg_counter = 1;
293         P5OUT &= ~BIT0; //led3
294         P5OUT &= ~BIT1; //led2
295     }
296 }

```

Figura F – Código da rotina de interrupção da porta série – envio das amostras.

O excerto seguinte também pertence à rotina de interrupção da porta série e tem a função de, após o envio de todos os dados, terminar a comunicação série e ativar novamente os conversores analógico digital. Novamente, os ponteiros associados a cada variável são apontados à primeira posição da respetiva variável.



```
460         if (count >= size)
461         {
462             send = 0;
463             //converter++;
464             count = 0;
465             val = 0;
466             msg_counter = 1;
467             v1 = voltage_V1;
468             v2 = voltage_V2;
469             v3 = voltage_V3;
470             i1 = current_I1;
471             i2 = current_I2;
472             i3 = current_I3;
473             P2OUT &= ~BIT7; //led5
474             P2OUT &= ~BIT4; //led6
475             SD24BCTL1 |= SD24GRP0SC;
476         }
```

Figura G - Código da rotina de interrupção da porta série – fim do envio.