



## **Sistema de emulação e simulação em tempo real de consumos em motores assíncronos**

**NUNO ALBERTO MACHADO LOPES MOREIRA**

Outubro de 2016

# Sistema de emulação e simulação em tempo real de consumos em motores assíncronos

Nuno Alberto Machado Lopes Moreira



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

**2016**



Dissertação elaborada para satisfação dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Nuno Alberto Machado Lopes Moreira, Nº 1140192, 1140192@isep.ipp.pt

Orientação: Professora Doutora Zita Vale, zav@isep.ipp.pt

Coorientação: Doutor Pedro Faria, pnsfaria@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2016**



## ***Agradecimentos***

Após ter terminado a dissertação tenho a necessidade de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a sua concretização.

Aos meus orientadores, a Professora Doutora Zita Vale e Doutor Pedro Faria, agradeço pela oportunidade que me deram para a realização desta dissertação. Quero também agradecer por todo o apoio, simpatia e incentivo que sempre me prestaram ao longo da elaboração da dissertação.

A todos os trabalhadores do GECAD, que tive o prazer de conhecer durante a realização desta dissertação, pela forma como me acolheram e contribuíram para a realização da mesma, direta ou indiretamente.

A todos os meus colegas do mestrado em Sistemas Eléctricos de Energia do ISEP pela amizade ao longo dos últimos dois anos, em especial ao meu amigo Afonso Spínola, companheiro de laboratório ao longo da dissertação.

À minha família e amigos por estarem presentes quer nos bons quer nos maus momentos, pelo carinho e incentivo que sempre transmitiram, sobretudo os meus pais, Domingos e Goreti, à minha irmã Ana e ao meu cunhado Pedro Oliveira. À minha namorada, Ana Henrique quero agradecer a paciência e apoio neste período de elevado stress.



## ***Resumo***

O Sistema Elétrico de Energia (SEE) tem sofrido alterações ao nível da operação e planeamento nos últimos anos. Prova disso foi a liberalização do mercado de energia e o aparecimento de novos conceitos como as *smart grids* (redes inteligentes) e a participação ativa dos consumidores através de programas de *demand response* (resposta à procura). A integração de produção distribuída e do armazenamento de energia, aliados aos anteriores, criaram um novo paradigma nos sistemas elétricos de energia.

O principal objetivo da presente dissertação prende-se com a necessidade de avaliar o impacto das cargas elétricas do tipo motor assíncrono no âmbito da participação em programas de *demand response*. Uma vez que o motor é uma das cargas mais importantes no panorama de consumo atual houve a necessidade de modelar consumos e avaliar o seu impacto num sistema elétrico.

Numa primeira fase além da bancada existente com os motores assíncronos, houve a instalação de equipamentos como o GRANMECA, DIGIWATT, VISISREAL e analisadores de energia com as respetivas ligações. De seguida, houve o desenvolvimento de um algoritmo que permitisse obter medições da carga, através de comunicação via MATLAB®, entre o computador e o analisador de energia. Esta comunicação foi estabelecida utilizando o protocolo *Modbus* TCP/IP. Findo este processo, foi necessário testar os motores.

A parte final da dissertação é então a elaboração dos casos de estudo de simulações realistas. Estes são realizados utilizando um motor assíncrono de carga variável, através de variações de binário e velocidade, e um emulador eólico para que se possa considerar produção distribuídas nos casos de estudo e assim estar o mais próximo possível da realidade.

O desenvolvimento desta dissertação visa avaliar as potencialidades do sistema utilizando o motor como carga e um emulador eólico. Assim podemos representar diversas aplicações (p.e. divisão de uma habitação) e perceber o efeito da produção distribuída na operação dos SEE.

## ***Palavras-Chave***

Produção Distribuída, Motor Assíncrono, *Modbus* TCP/IP



## ***Abstract***

The Electric Power System has been altered at the operating and planning levels in last years. Evidence of this was the liberalization of the energy market and the implementation of new concepts such as smart grids and the active participation of consumers through demand response programs. With the addition of distributed generation and energy storage, a new paradigm in electrical power systems is in uprising.

The main objective of the present dissertation is the evaluation of the impact of electric loads, namely asynchronous motors, in the scope of the participation in demand response programs. Since this type of electric motor is of utmost importance in the current consumption context, it was necessary to model consumption and evaluate its impact in the power system.

In addition to the existing bench with asynchronous motors, there was the installation of equipment such as GRANMECA, DIGIWATT, VISISREAL and energy analyzers with the respective links. Then, it was developed an algorithm that allows obtaining load measurements through communication via MATLAB® between the computer and the energy analyzer. This developed communication is established using the Modbus TCP / IP protocol. After this process, it was necessary to test the motors.

The final part of the dissertation is then the preparation of case studies of realistic simulations. These are performed using an asynchronous motor variable load through torque and speed variations, and a wind emulator that can be considered as distributed generation in the case studies and thus provide a scenario closer to reality.

The development of this dissertation aims to evaluate the system's capabilities using the motor as a load and a wind emulator. So we can represent various applications (f.e. division of a house) and realize the effect of distributed generation in the operation of the Electric Power System.

## ***Keywords***

Distributed Generation, Asynchronous Motor, *Modbus* TCP/IP



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	5
<b>2 EQUIPAMENTO</b> .....	<b>7</b>
2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS .....	7
2.2 VARIADORES DE VELOCIDADE .....	8
2.3 SENSOR DE BINÁRIO E DÍNAMO TAQUIMÉTRICO .....	9
2.4 TRAVÃO ELETROMAGNÉTICO .....	10
2.5 APARELHOS DE MEDIÇÃO DIGITAIS .....	11
2.5.1 DIGIWATT .....	11
2.5.2 GRANMECA .....	12
2.5.3 VISIREAL .....	12
2.6 ANALISADORES DE ENERGIA .....	13
<b>3 SOLUÇÃO DESENVOLVIDA</b> .....	<b>15</b>
3.1 ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO .....	15
3.2 ESQUEMA DE LIGAÇÕES .....	17
<b>4 ALGORITMO DE COMUNICAÇÃO COM OS ANALISADORES DE ENERGIA</b> .....	<b>21</b>
4.1 INTRODUÇÃO ALGORITMO .....	21
4.2 FUNÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO ALGORITMO .....	22
4.3 FLUXOGRAMAS DOS ALGORITMOS .....	24
4.4 CONCLUSÕES .....	27
<b>5 CASOS DE ESTUDO</b> .....	<b>29</b>
5.1 ARRANQUE DO MOTOR A .....	29
5.2 MOTOR A COM VARIAÇÃO DE VELOCIDADE E BINÁRIO .....	34
5.3 VERSÃO 2 E 3 DO ALGORITMO COM MOTOR A EM FUNCIONAMENTO .....	38
5.4 PRODUÇÃO EÓLICA E CARGA .....	40
5.5 CONCLUSÕES .....	43

<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>
ANEXO A – LISTA DE ENDEREÇOS DO ANALISADOR DE ENERGIA .....	I
ANEXO B – TESTES AO MOTOR DO MANUAL DO EQUIPAMENTO .....	II

## *Índice de Figuras*

Figura 1: Esquema geral dos componentes de uma <i>smart grid</i> [5].	2
Figura 2: Aspeto final da plataforma implementada.	7
Figura 3: Motor assíncrono de 3000 W e respetiva placa de características [22].	8
Figura 4: Variador de velocidade de. a) 750 W [28]; b) 3000W [27]; c) 1500W [29].	9
Figura 5: Sensor de binário [31].	9
Figura 6: Dínamo taquimétrico [22].	10
Figura 7: Travão magnético [22].	11
Figura 8: Equipamento de medição de grandezas elétricas DIGIWATT [35].	11
Figura 9: Equipamento de medição de grandezas mecânicas GRANMECA [35].	12
Figura 10: Equipamento de controlo VISIREAL [35].	13
Figura 11: Analisadores de Energia Janitza. a) modelo UMG 604 [38]; b) modelo UMG 103 [39].	13
Figura 12: Esquema de comunicação.	15
Figura 13: Esquema de ligações.	18
Figura 14: Função de comunicação com o analisador e respetivas variáveis.	23
Figura 15: Comunicação com o analisador.	23
Figura 16: Fluxograma do algoritmo MATLAB® da versão 1 e 2.	25
Figura 17: Fluxograma do algoritmo MATLAB® da versão 3.	26
Figura 18- Gráficos do arranque do motor A em vazio, 1A. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.	30
Figura 19: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas do arranque do motor em vazio, 1A.	30
Figura 20: Tempo de cada iteração do arranque do motor A em vazio, 1A.	31
Figura 21- Gráficos do arranque do motor A em potência nominal, 1B. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.	32
Figura 22: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas do arranque do motor em potência nominal, 1B.	32
Figura 23: Tempo de cada iteração do arranque do motor A em potência nominal, 1B.	33

Figura 24- Gráficos do motor A com variação da velocidade, 2A. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.	34
Figura 25: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas com variação da velocidade, 2A.	35
Figura 26: Tempo de cada iteração do motor A com variação de velocidade, 2A.	35
Figura 27- Gráficos do motor A com variação do binário, 2B. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.	36
Figura 28: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas com variação do binário, 2B.	37
Figura 29: Tempo de cada iteração do motor A com variação de binário, 2B.	37
Figura 30- Gráficos do motor A utilizando versão 2, 3A. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.	38
Figura 31- Gráficos do motor A utilizando versão 3, 3B. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.	39
Figura 32: Tempo de cada iteração utilizando a versão 2, 3A.	39
Figura 33: Tempo de cada iteração utilizando a versão 3, 3B.	40
Figura 34: Fluxo da Energia entre o motor, a produção eólica e a rede elétrica do caso de estudo.	41
Figura 35- Gráficos do motor A com produção de energia eólica. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Direção do fluxo de energia; d) Potência Ativa no Motor A e no aerogerador.	41
Figura 36: Tempo de cada iteração no motor A e na produção eólica.	42

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1: Diferentes métodos utilizados na avaliação de sistemas elétricos[11].	3
Tabela 2: Características das diferentes versões do algoritmo de comunicação com os analisadores.	21
Tabela 3: Identificação casos de estudo.	29
Tabela A1: Endereços do analisador de energia.	i
Tabela B1: Testes da velocidade do motor com a variação da frequência.	ii
Tabela B2: Testes do motor com variação da corrente.	ii



## ***Acrónimos***

- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- DR – *Demand Response*
- Nm – Newton-metro
- PLC – *Programmable Logic Controller*
- $t_a$  – Tempo atual decorrido
- $t_c$  – Tempo de comunicação com o analisador
- $t_g$  – Tempo de desenho dos gráficos
- $T_{iter}$  – Tempo de cada iteração
- $t_t$  – Tempo de tradução
- $t_s$  – Tempo total de simulação



# 1 Introdução

O capítulo 1 apresenta a motivação do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação. As grandes mudanças e novos conceitos são apresentados; pra além disso, a necessidade de modelar consumos e avaliar o impacto destes numa rede elétrica é referida.

Neste capítulo são apresentados também os objetivos da dissertação e por último é apresentada a organização do trabalho.

## 1.1 Enquadramento

Os sistemas elétricos de energia (SEE) têm sido alvo de grandes alterações no paradigma de operação ao longo da última década. A utilização, cada vez mais intensiva, de produção distribuída em detrimento da produção tradicional assente em grandes centros de produção é uma das principais apostas nos dias que correm. Além de apresentarem dificuldades na manutenção, estas grandes centrais utilizam de fontes de energia primária, como carvão ou gásóleo, que contribuem largamente para elevadas emissões poluentes[1].

A dependência dos combustíveis fósseis a que os SEE estavam sujeitos impulsionou a aposta nas energias renováveis por parte dos diversos países. Esta aposta mostra-se muito eficiente, na medida em que a utilização de combustíveis fósseis acarreta muitos problemas. A forte volatilidade de preços associada à escassez de matéria e à instabilidade política e financeira de grande parte dos países detentores da energia primária é um dos principais impasses. Além disso, as já referidas elevadas emissões poluentes, aliadas a uma crescente preocupação ambiental, impulsionaram a aposta em fontes de energia alternativas[2], [3].

A reestruturação dos SEE fez emergir um novo conceito, as *Smart Grids*. Este conceito inclui as atividades de todos os utilizadores conectados no mesmo sistema. A informação avançada, controlo da rede e tecnologia de comunicação possibilitam a economia de energia e consequente redução dos custos de consumo [4]. Este conceito é caracterizado pela integração de várias componentes que se complementam e a cooperação de vários subsistemas que coexistem com a rede elétrica. A Figura 1 representa as várias componentes que estão associadas às *smart grids*. Esta rede de fornecimento é gerida pelos distribuidores, mas inclui também a participação ativa por parte do consumidor final [5].

A grande impulsão das *Smart Grids* está associada à capacidade de comunicação bidirecional entre produtor e consumidor final, regulando o controlo de carga (*Load Control*) mediante a resposta das cargas (*Demand Response* - DR). Para se projetar uma resposta de distribuição em tempo real e de baixo custo é possível que os perfis dos consumidores se

ajustem à quantidade de energia que é fornecida. Deste modo, evitam-se perdas ou armazenamento de energia que podem ser dispendiosos [6].

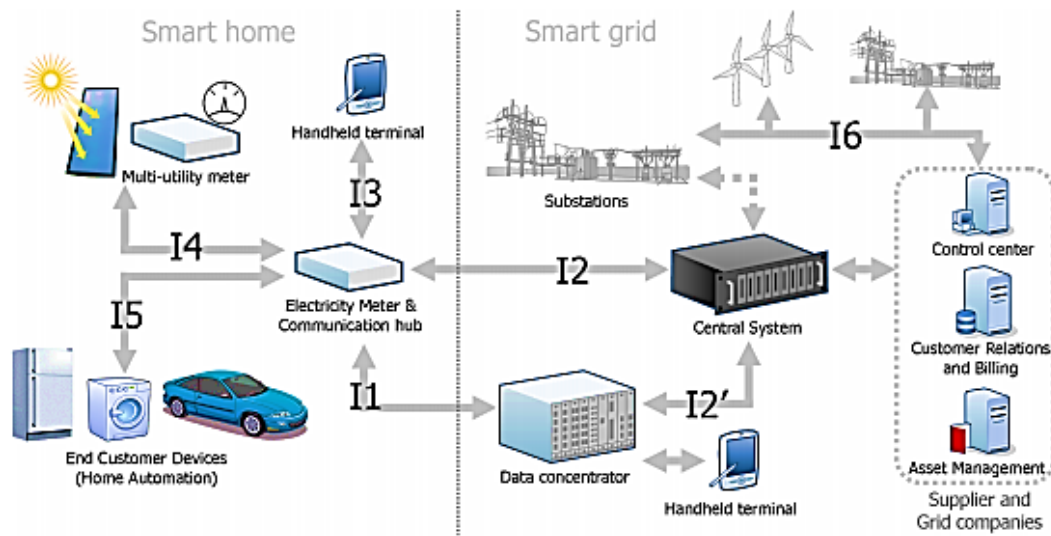


Figura 1: Esquema geral dos componentes de uma *smart grid* [5].

Em consequência da eficiência energética, a noção de DR tem tido especial atenção. Neste caso, a principal mudança está a cargo do consumidor final. A utilização de estratégias, que englobam oscilações de preços ou até mesmo pagamento de incentivos, procuram reduzir o consumo de energia em horários de maior preço no mercado grossista ou quando a fiabilidade do sistema está comprometida [4], [7], [8]. A DR inclui todas as alterações intencionais no consumo de energia, incluindo horário de uso, nível de procura em momentos críticos, e padrões de consumo ajustados aos preços do mercado [4], [7]. As vantagens desta mudança são diversas e entre elas destaca-se uma maior flexibilidade de gestão dos recursos energéticos, incluindo os de armazenamento de energia, aumento do tempo de vida dos equipamentos, a capacidade de adaptação dos programas e a inclusão de importantes sistemas de backup [9].

Devido ao facto de as fontes de energias renováveis não serem constantes, como por exemplo as energias eólica e solar, a produção pode ser intermitente. Como tal, a sua utilização não possui uma garantia adequada. Assim, a DR é uma ferramenta muito útil, na medida em que permite a adaptação constante do sistema de produção ou do consumidor final em relação às necessidades [10].

O desenvolvimento de novas metodologias, e em especial a complexidade das *smart grids*, exigem uma cuidada avaliação quer do software desenvolvido, quer da sua aplicabilidade na vertente desejada. Várias são as técnicas usadas para avaliação de software

e hardware e distinguem-se principalmente pelo modo como são representados no momento da avaliação. Na Tabela 1 é feita uma síntese dos principais métodos usados na avaliação de software de acordo com [11]. Aqui é possível distinguir a aproximação da aplicação de análise à qual foi projetada, bem como o ambiente em que está a ser avaliada. Assim, quando o ambiente e a aplicação são reais, as condições de análise são reproduzidas de forma igual às quais serão aplicadas. O desenvolvimento de um modelo requer condições de análise que não serão tão próximas da realidade e que podem inclusive ser alteradas intencionalmente [11], [12].

Tabela 1: Diferentes métodos utilizados na avaliação de sistemas elétricos[11].

		Ambiente	
		Real	Modelo
Aplicação	Real	In situ	Emulação
	Modelo	Benchamarching	Simulação

No contexto das *microgrids* o método mais utilizado é a emulação. Neste caso são produzidas cargas com as mesmas características das que serão geradas pelo motor real. No entanto, de modo a prever todas as possíveis falhas no fornecimento de energia, o modelo de análise desenvolvido inclui variações controladas de alguns parâmetros, como por exemplo a velocidade. Esta variação permite uma análise mais completa do sistema, dado que a grande parte das máquinas industriais tem comportamento não-linear e/ou descontínuo [11], [12], [13]. A emulação de cargas de um determinado motor requer a utilização de equipamentos complexos. Este equipamento é geralmente constituído por um dinamómetro e um sistema de controlo. Os dinamómetros são sistemas capazes de simular cargas com características semelhantes às desejadas, no caso concreto devem ser semelhantes às geradas pelo motor alvo de estudo [13]–[15]. Para os casos de estudo em questão, os motores a serem testados são motores de indução. Estes produzem, normalmente, cargas dinâmicas que apresentam variações de corrente e potência. Para uma completa análise de cargas variáveis um sistema automático de medição é requerido, AMR (*Automatic Meter Reading*). Esta tecnologia permite não só uma colheita de dados, como também possibilita o envio de comandos para o controlador. O hardware e o software utilizados no AMR devem ser bem estruturados e capazes de correr protocolo TCP/IP. Além disso, é necessário um sistema digital que controle os ciclos de análise, uma vez que os sistemas manuais não são suficientes para simulação de cargas dinâmicas. O desenvolvimento deste sistema digital requer um conhecimento prévio dos parâmetros de funcionamento do dinamómetro [16], [17], [18].

Em sequência, não existe um modelo ideal para testar o impacto da DR num determinado processo que tenha alguma flexibilidade na gestão de consumo. Desde de a simulação computacional até à validação *in loco* (solução mais dispendiosa e não compatível com a fase de projeto) existem várias opções, com diferentes vantagens e também desvantagens, nomeadamente o custo. Surge assim a necessidade de uma plataforma que estabeleça um compromisso razoável entre meios de simulação e emulação com motores reais otimizando o investimento necessário para a validação de diferentes cenários de operação. É com base na necessidade de tal plataforma que se definem os objetivos da presente dissertação.

## 1.2 Objetivos

Os mercados de energia têm vindo a modificar-se ao longo do tempo, nomeadamente, nos passados anos com a introdução de recursos distribuídos e com o aumento da preocupação ambiental, relativa à sustentabilidade de operação. No mesmo contexto, os programas de DR e a inclusão de produção distribuída são as componentes que apresentam mais progresso, tanto em termos tecnológicos como em crescimento de utilização.

No entanto, a utilização deste tipo de recursos implica dificuldades de implementação devido à estrutura tradicional dos sistemas de energia, sendo que desta forma torna-se necessária a aplicação e validação de modelos computacionais de operação capazes de considerarem a atuação de recursos distribuídos e os seus efeitos no sistema.

Tendo em conta o referido, a presente dissertação visa a simulação de cenários de operação dos sistemas de energia num ambiente prático.

O primeiro objetivo relaciona-se com a instalação dos equipamentos GRANMECA, DIGIWATT e VISIREAL, provenientes da fabricante J.ROMA/LANGLOIS, e que se encontram no laboratório do GECAD, nomeadamente:

- Estudo de vários aparelhos de medição, nomeadamente, o dínamo taquimétrico e sensor de binário, que representam componentes essenciais para a leitura dos dados mecânicos;
- Projetar e instalar os analisadores de energia, considerando as ligações técnicas e de comunicação *master-slave* entre os analisadores (descrito na Secção 3.1 e 3.2);
- Parametrização do software VISIREAL, assim como a recolha dos elementos necessários para o seu correto funcionamento.

O segundo objetivo passa pelo desenvolvimento de um algoritmo que permita a comunicação com o analisador de energia, possuindo robustez suficiente para a interpretação e extração de resultados das simulações:

- Desenvolvimento de um algoritmo em MATLAB® com ligação via Ethernet ao analisador, através do protocolo de comunicação *Modbus* TCP/IP;
- Avaliação do *sampling time*, ou seja, intervalo de tempo entre pedidos ao analisador;
- Análise dos tempos de processamento necessários para a extração e visualização de resultados, tendo em conta o efeito provocado na veracidade dos mesmos.

O terceiro objetivo é o uso do equipamento laboratorial para a simulação de cenários relativos à operação dos sistemas de energia, num ambiente realista:

- Avaliação das potencialidades do sistema utilizando o motor como carga, possibilitando a este representar diversas aplicações (p.e. divisão de uma habitação, sistema de iluminação, entre outros);
- Integração de um emulador eólico, de modo a retratar a inclusão de produção distribuída num sistema de energia, e o seu efeito na operação do mesmo;

### **1.3 Organização da Dissertação**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. Depois do presente capítulo de introdução em que temos um enquadramento e os objetivos da dissertação, o capítulo 2 é sobre o equipamento. Neste capítulo é descrito o equipamento utilizado, entre eles, os motores, os variadores de velocidade e os equipamentos de medição.

No capítulo 3 é apresentada a solução desenvolvida, as formas de comunicações adotadas e as diferentes fases, entre elas, a primeira de decisão, a segunda de monitorização e controlo e por último a fase de simulação/atuação. Além do esquema de comunicações é também apresentado o esquema de ligações elétricas dos equipamentos.

No capítulo 4 são apresentadas as diferentes versões do algoritmo de comunicação com os analisadores de energia. É explicada a função e a sua parametrização, a forma como o algoritmo funciona com apoio de fluxogramas, as diferenças entre as versões e respetivas vantagens e desvantagens.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com apoio de gráficos e as conclusões mais importantes que resultaram da dissertação desenvolvido.



## 2 Equipamento

Neste capítulo são apresentados cada um dos componentes básicos da plataforma implementada. Para cada um são apresentadas as características que foram essenciais à compreensão do funcionamento de cada componente bem como à interação e integração dos componentes como um todo.

O equipamento utilizado neste trabalho está disposto numa bancada, Figura 2. Este é constituído pelos motores A (3000W), B(3000W) e C (1500W) e cada um deles está conectado a um variador de velocidade. Além dos equipamentos referidos fazem parte também um travão eletromagnético, um sensor de binário e um dínamo taquimétrico, estes apenas conectados ao motor A, único dos existentes com carga variável. A bancada é também constituída por alguns equipamentos de medição, GRANMECA, DIDIWATT, VISIREAL que estão conectados também ao motor A. Além das medições recolhidas por estes equipamentos, a bancada está também equipada com três analisadores de energia, sendo que é um por cada motor. Estão também instalados um PLC e estão feitas as ligações à plataforma de simulação em tempo real OPAL-RT ® existente no GECAD.

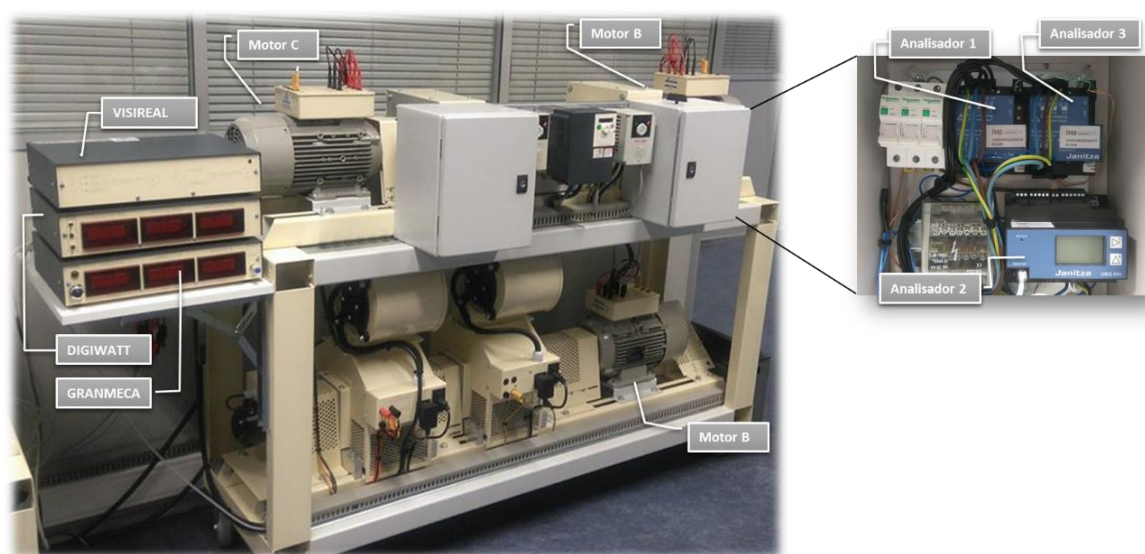


Figura 2: Aspecto final da plataforma implementada.

### 2.1 Motores de Indução Trifásicos

O motor de indução trifásico, Figura 3, é atualmente utilizado na maioria dos acionamentos industriais, como por exemplo, um tapete rolante numa linha de produção, máquinas de centrifugação, entre outros. A razão do seu uso elevado é devido a tratar-se de

uma máquina robusta, simples, com elevado rendimento, e baixa manutenção [19]. Estes fatores são determinantes em ambientes adversos (como é o caso dos industriais), em que os equipamentos são sujeitos a condições de funcionamento mais hostis, e por isso provocam desgaste dos equipamentos durante o funcionamento de forma contínua e mais rápida [20], [21].

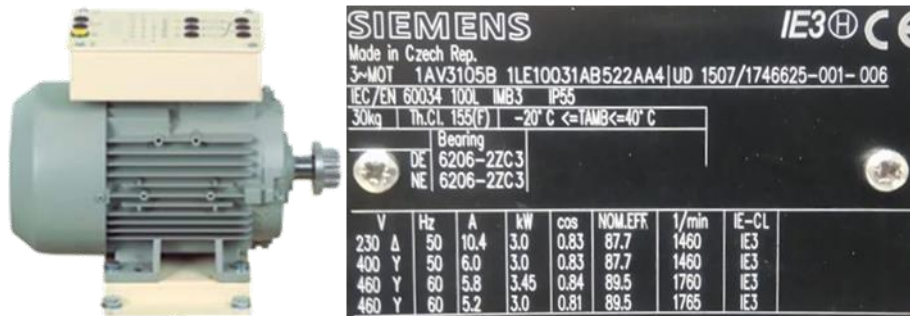


Figura 3: Motor assíncrono de 3000 W e respetiva placa de características [22].

A distribuição da energia elétrica é feita em corrente alternada, sendo que esta é aplicada diretamente à bobinagem do estator gerando um campo girante [19], [23]. Isto acontece, pois, quando os enrolamentos do estator são alimentados, cada um deles dá origem a um campo magnético. A resultante destes campos magnéticos é o campo girante [19], [23].

O campo girante, por indução (segundo a Lei de Faraday), permite o aparecimento de uma corrente alternada que circula na bobinagem do rotor, com um sentido oposto ao que lhe deu origem (segundo a Lei de Lenz). Esta corrente que circula no rotor em circuito fechado, dá origem a um campo magnético no rotor com sentido oposto ao campo girante do estator. Os campos sendo de sentido oposto, possuem nas suas extremidades pólos opostos, e por isso atraem-se. Devido ao movimento constante do campo magnético girante, os pólos do campo magnético do rotor procuram sempre os pólos opostos do campo girante, fazendo assim com que haja rotação do rotor. O rotor nunca consegue alcançar a velocidade do campo girante, pois a velocidade de rotação do rotor é diferente da velocidade de sincronismo. Esta diferença de velocidades é chamada de deslizamento [19], [21]. Apesar de ser necessário existir este deslizamento, quanto menor for melhor será o desempenho da máquina [19], [21], [24]. A instalação em estudo é composta por três motores de indução trifásicos, dois com potência de 3000 W e o restante com uma potência de 1500 W.

## 2.2 Variadores de velocidade

O objetivo dos variadores de velocidade, Figura 4, é realizar o controlo da velocidade de rotação do motor através da variação da frequência a que está a ser alimentado. No

trabalho da presente dissertação, a definição da velocidade pretendida é feita através de sinais analógicos (de 0 a 10 V). O uso destes variadores, além da regulação da velocidade, permite-nos também o controlo de arranques do motor [20], [25]. O controlo é feito através de sinais analógicos para

A regulação da velocidade é bastante importante, por exemplo, se tivermos um tapete rolante que necessite de variações de velocidade. O variador de velocidade é indispensável para que esta ocorra de forma controlada e eficiente. Outra aplicação importante do variador de velocidade, é o controlo do arranque do motor. Por exemplo, quando há o arranque de um elevador é necessário que este seja suave.

Na instalação existe um variador de velocidade para cada um dos motores. Estes têm potências de 750 W, 1500 W e 3000 W [26], [27].

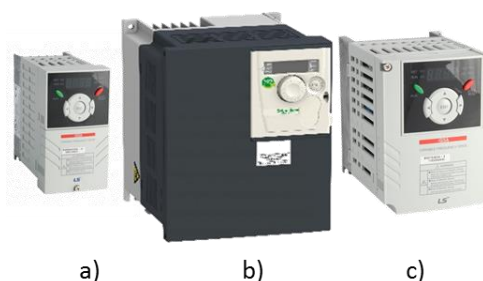


Figura 4: Variador de velocidade de. a) 750 W [28]; b) 3000W [27]; c) 1500W [29].

### 2.3 Sensor de binário e dínamo taquimétrico

O sensor de binário, Figura 5, permite-nos saber o binário desenvolvido por um motor elétrico. Por exemplo no caso de um elevador, onde é importante saber em todos momentos o binário a que o motor está sujeito, o que na prática significa saber o peso que o elevador carrega (quer seja de pessoas ou carga). A falta desta informação poderia causar acidentes caso os limites do motor fossem ultrapassados.

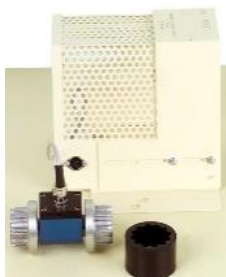


Figura 5: Sensor de binário [30].

O valor do binário é conhecido, através de um aparelho externo que envia um sinal ao sensor de binário utilizando dois fios para o efeito. O sinal passa pela zona onde o sensor de binário está conectado ao motor, e retorna ao aparelho externo por outros dois fios. A diferença do sinal CA que foi enviado e recebido pelo aparelho externo permite saber o valor do binário [31].

O dínamo taquimétrico, Figura 6, gira a uma velocidade igual à velocidade do motor. Em consideração da velocidade a que o dínamo estiver a girar, este gera uma tensão correspondente, que por sua vez será transmitida a um equipamento de leitura. Todo este processo serve para saber a que velocidade o motor está a rodar, esta informação pode ser valiosa e até indispensável em muitas aplicações. Numa linha de produção podemos precisar de uma velocidade específica, por exemplo em tapetes rolantes ou uma máquina de corte, para que a coordenação de diferentes processos ocorra. Desta maneira é possível evitar atrasos ou falhas e consequentes perdas na produção [32].



Figura 6: Dínamo taquimétrico [22].

## 2.4 Travão Eletromagnético

O travão eletromagnético, Figura 7, serve para variar o binário do motor, ou seja, aumentar ou diminuir o esforço a que o motor é sujeito. A função deste travão é dar a possibilidade de modelar diferentes tipos de cargas. O controlo do binário pode ser feito através de um regulador de um aparelho externo ligado ao travão ou através de uma tensão contínua que controla o nível do binário (neste trabalho dado pelo PLC ou pelo sistema OPAL-RT; ver capítulo 3).

O equipamento é constituído por um rotor e um cilindro fixo, sendo que o intervalo de ar existente entre os dois é composto por um pó metálico fluido (ferro e crómio). Quando se cria um campo magnético no entreferro, este modifica a viscosidade do pó. Com o aumento da viscosidade temos um aumento de atrito a que o motor é sujeito [33].

O travão aqui apresentado apresenta diversas vantagens relativamente a outros tipos, nomeadamente, a sua capacidade de não ser influenciado quer pela temperatura do travão,

quer pela velocidade de rotação do rotor. Desta forma, através da utilização do pó metálico, é possível aumentar a fiabilidade do equipamento, ou seja, sem pôr em causa o controlo do travão [33].

No caso de uma elevação anormal da temperatura no equipamento, que pode ser causada por uma utilização prolongada, uma utilização do travão no seu máximo ou problemas nas condições de operação como problemas na ventilação, um interruptor de segurança abre o circuito de alimentação do enrolamento. O binário do travão diminui automaticamente a 0. O circuito retoma automaticamente assim que a temperatura estiver abaixo da máxima permitida [33].



Figura 7: Travão magnético [22].

## 2.5 Aparelhos de medição digitais

### 2.5.1 DIGIWATT

O DIGIWATT é um multímetro digital com *floating inputs*, ou seja, é capaz de assimilar estados diferentes do equipamento a que está conectado. Este exibe simultaneamente três valores elétricos, tensão, corrente e potência elétrica. Na Figura 8 é possível observar a forma como os valores estão visíveis no equipamento.



Figura 8: Equipamento de medição de grandezas elétricas DIGIWATT [34].

O DIGIWATT mede o valor eficaz da tensão, corrente e potência, com componente CC. A ampla largura de banda do equipamento permite fazer medições de CC a 70 kHz [35]. O

DIGIWATT tem capacidade para efetuar medição de potência considerando a componente CC, uma única fase, e o balanço das três fases [35].

### 2.5.2 GRANMECA

O GRANMECA, Figura 9, é um equipamento para exposição de três valores mecânicos: binário, velocidade e potência mecânica. Este faz uma leitura da velocidade e do binário através da tensão recebida do dínamo taquimétrico e do sensor do binário, respetivamente.

O equipamento apresenta um botão regulável que controla o travão magnético. Tem por isso, a capacidade de variar o esforço que o travão magnético exerce no motor o que significa que controla o valor do binário que o motor fornece.

A potência mecânica é calculada pelo GRANMECA, resultante dos valores do binário e da velocidade. Assim, sempre que variamos o binário ou a velocidade influenciámos a potência mecânica.

É possível vincular o GRANMECA diferentes dínamos taquimétricos (intervalo: 10-20-60V a 1000 rpm). Este aparelho de medição consegue trabalhar com máquinas rotativas com potências entre os 90 W e os 3000 W, com binários estáticos e rotativos de 2 a 50 Nm [36].



Figura 9: Equipamento de medição de grandezas mecânicas GRANMECA [34].

### 2.5.3 VISIREAL

O VISIREAL, Figura 10, permite a partir de saídas analógicas de medição (GRANMECA e DIGIWATT), gravar e exibir em um computador grandezas elétricas e mecânicas. O software LOGIREAL, que funciona em conjunto com o VISIREAL permite exibir as variáveis em tempo real.

Esta ligação é possível através de uma interface RS232 que liga um motor a um computador através dos aparelhos de medição e do software referido. Durante aquisição em tempo real, valores de tensão, corrente, potência elétrica consumida, binário, velocidade e potência mecânica são mostradas através de curvas ou em *displays* numéricos. O VISIREAL

é também capaz de cálculos adicionais, tais como, a eficiência, a potência reativa e o  $\cos \varphi$  [37].



Figura 10: Equipamento de controlo VISIREAL [34].

## 2.6 Analisadores de energia

A escolha dos analisadores de energia foi feita de forma a termos uma escolha racional, assim foi tido em conta as necessidades do trabalho e os preços dos equipamentos. A escolha foi feita considerando necessário ter um analisador *master* conectado ao motor A, de forma a que aos motores B e C se possa ter analisadores *slaves*, portanto mais limitados, mas competentes e menos dispendiosos. Desta maneira consegue ter-se equipamentos que cumpram os objetivos, recolha de dados em tempo real dos três motores com uma solução favorável.

Os analisadores de energia escolhidos foram o modelo UMG 103, Figura 11a, e UMG 604, Figura 11b, ambos da Janitza®. Foram instalados dois do modelo UMG 103 e um do modelo UMG 604. Os dois modelos permitem aceder a uma grande variedade de informação, através de códigos que são interpretados pelo analisador como pedidos referentes a certos parâmetros de medição, como por exemplo, medições de tensão, corrente, energia, frequência, entre outros (ver Anexo A – Lista de endereços do analisador de energia) [38], [39].

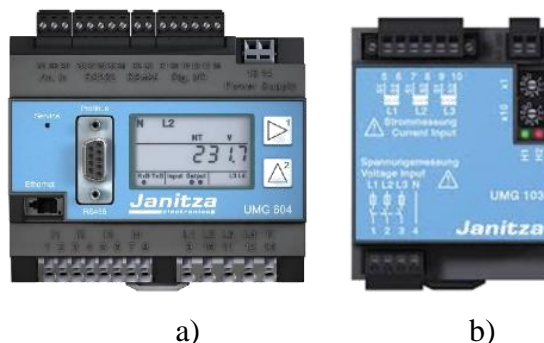


Figura 11: Analisadores de Energia Janitza. a) modelo UMG 604 [38]; b) modelo UMG 103 [39].

O modelo UMG 103 é limitado comparativamente ao UMG 604, pois relativamente ao tipo de comunicação, apenas consegue comunicar através de RS485. O modelo UMG 604 apresenta muitas mais funcionalidades, de destacar uma página web com dados em tempo real, variedade de formas de comunicação conseguindo além do RS485 também comunicar por RS232 e por Ethernet [38], [39].

Devido a esta capacidade de comunicação por parte do modelo EMG 604, além dos dados do motor a que está ligado recebe também dados dos outros dois analisadores e comunica via Ethernet com o computador em tempo real. O código desenvolvido em MATLAB® para comunicação com os analisadores será analisado no capítulo 4.

### 3 Solução Desenvolvida

No capítulo 3 são apresentadas as comunicações e as ligações elétricas que constituem a plataforma implementada. O esquema de ligações, apresentado em 3.1, mostra como o fluxo de informação acontece desde dos equipamentos de teste até ao utilizador. Em 3.2, é são apresentadas todas as ligações elétricas e é explicado como acontece a alimentação dos equipamentos.

#### 3.1 Esquema de comunicação

A solução desenvolvida para este projeto é representada na Figura 12. Esta encontra-se dividida em três fases distintas: a primeira de decisão, a segunda de monitorização e controlo e por último a fase de simulação/atuação.

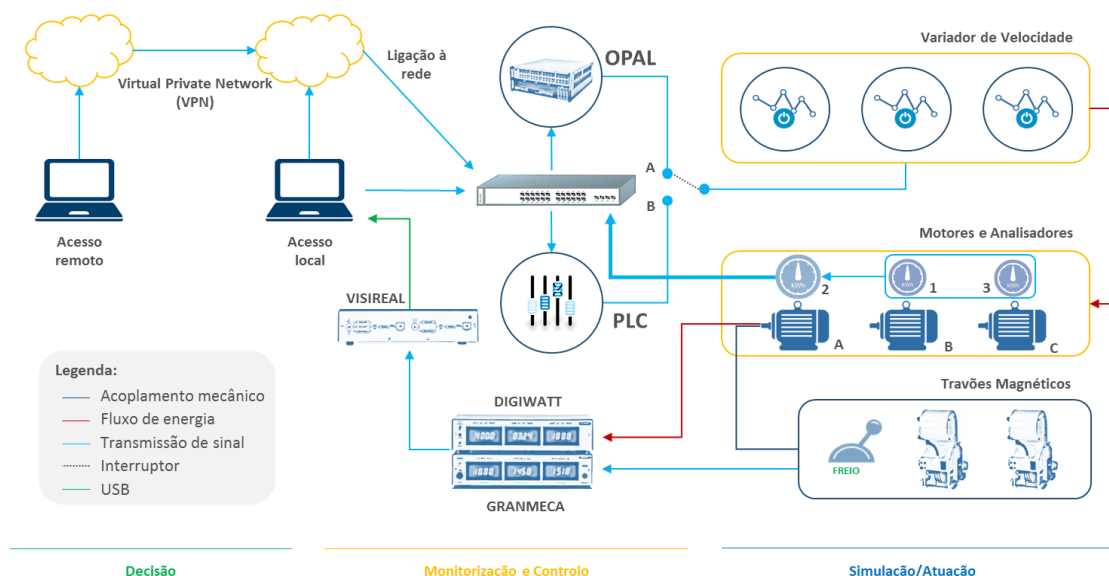


Figura 12: Esquema de comunicação.

A fase de decisão acontece quando o utilizador acede aos dados provenientes da instalação e toma decisões. Este acesso pode ser feito localmente através de um computador com acesso à rede do GECAD (por *wireless* ou cabo de rede), ou através de acesso remoto utilizando uma ligação VPN, proporcionando ao utilizador uma maior versatilidade de acesso.

Na fase de monitorização e controlo, encontram-se representadas as ligações do OPAL, PLC e analisador de energia, à rede do GECAD de modo a ficarem acessíveis ao utilizador.

O OPAL-RT é um simulador em tempo real, permite uma série de aplicações de simulação e controlo de sistemas, incluindo testes de *hardware-in-the-loop* (HIL), controlo rápido protótipos, redes complexas de energia, micro-redes, parques eólicos, veículos híbridos, mais aviões elétricos, barcos elétricos e sistemas eletrônicos de potência. A simulação pode ser em tempo real, num tempo tão baixo como 10 microsegundos para uma melhor precisão da simulação [40].

O PLC (*programmable logic controller*) é um dispositivo de controlo, que executa um programa que monitoriza entradas e manipula as saídas para o controlo desejado. A partir de um computador é possível comunicar com o PLC e fazer o controlo de equipamentos, além de ser possível também receber dados. Distinguem-se também pela sua fiabilidade e robustez para trabalhar em ambiente industrial onde existe ruído elétrico, vibrações, temperaturas extremas e humidade sem mesmo neste tipo de ambiente pôr em risco a sua alta confiabilidade [41], [42].

Torna-se importante realçar a comunicação com o analisador de energia, visto ser a partir deste que se irá estabelecer a comunicação para obter as respostas aos pedidos efetuados. O protocolo de comunicação com o analisador de energia é *Modbus* TCP/IP (transmission Control Protocol/ Internet Protocol), dois protocolos independentes utilizados em conjunto[38]. *Modbus* é um protocolo de comunicação, tem como benefícios a flexibilidade e facilidade de implementação. Pode ser usado para a comunicação entre computadores e microcontroladores, PLC e outros dispositivos [43], [44].

Numa rede de comunicação o dispositivo *Master* (ou cliente no *Modbus* TCP), neste caso o computador estabelece uma conexão com o *Slave* (ou servidor), neste caso o analisador de energia. O analisador aguarda por uma conexão de entrada do computador, quando uma conexão é estabelecida, o analisador responde aos pedidos do computador até que este fecha a conexão [43], [44].

Importante referir que a instalação está equipada com interruptores de três posições, para fazer a opção do controlo a utilizar, sendo que a escolha é feita entre o OPAL, PLC ou isolado. Para esse efeito existem seis interruptores, três para regulação da velocidade (analógicos) de cada um dos variadores de velocidade e três para habilitação (digitais) dos mesmos equipamentos.

A instalação tem também o DIGIWATT que obtém grandezas elétricas e o GRANMECA que obtém grandezas mecânicas. Existe também a possibilidade de variar a intensidade do travão, ou seja, o binário, através do GRANMECA. As grandezas elétricas e

mecânicas obtidas em ambos os equipamentos são transmitidas para o VISIREAL e posteriormente para um computador onde existe o software de análise.

Além de obter informação através do analisador de energia via MATLAB® (será apresentado num capítulo 4), é possível também obter informação e dar algumas ordens a partir do PLC e do OPAL.

Na fase de simulação/atuação temos os equipamentos que estão a ser testados. Temos três motores A (3000 W), B (3000 W), C (1500W) com um analisador cada, em que um deles é o chamado *master* (analisador 2). Isto significa que além de recolher dados do motor a que está conectado, recebe também dados dos outros dois analisadores, 1 (motor B) e 3 (motor C) denominados *slaves*. Cada um dos motores tem também um variador de velocidade com ligação ao OPAL e ao PLC. O motor A, ligado ao analisador 2 (*master*), tem também acoplado um travão magnético, além do DIGIWATT e do GRANMECA.

### 3.2 Esquema de ligações

Na Figura 13 é representado o esquema de ligações elétricas utilizado na instalação. Todos os motores se encontram ligados em estrela e alimentados por uma fonte trifásica, no entanto alguns equipamentos têm alimentação monofásica, nomeadamente os aparelhos, DIGIWATT, GRANMECA, VISIREAL, travão magnético e analisador de energia 2 relativo ao motor A.

Para a medição de corrente no analisador é necessário recorrer aos Transformadores de Intensidade (TIs), existindo para cada fase um TI. Os transformadores de intensidade são equipamentos com várias vantagens, porém a sua principal característica é a de permitir a leitura de correntes elevadas a uma escala reduzida [45].

O motor A está também acoplado a um travão magnético, um sensor de binário, e um dínamo taquimétrico. O travão magnético serve para regularmos o binário a que o motor é sujeito, no entanto a regulação deste é realizada através de um potenciómetro localizado no equipamento GRANMECA. O travão encontra-se conectado ao GRANMECA através de uma ligação analógica, sendo-lhe fornecido um sinal de 0 a 10 V (máx. 0.5 A). Este permite variar a intensidade do campo magnético, sendo que, como mencionado anteriormente em 2.4-Travão Eletromagnético, irá afetar a viscosidade do fluido metálico presente no entreferro do travão magnético.

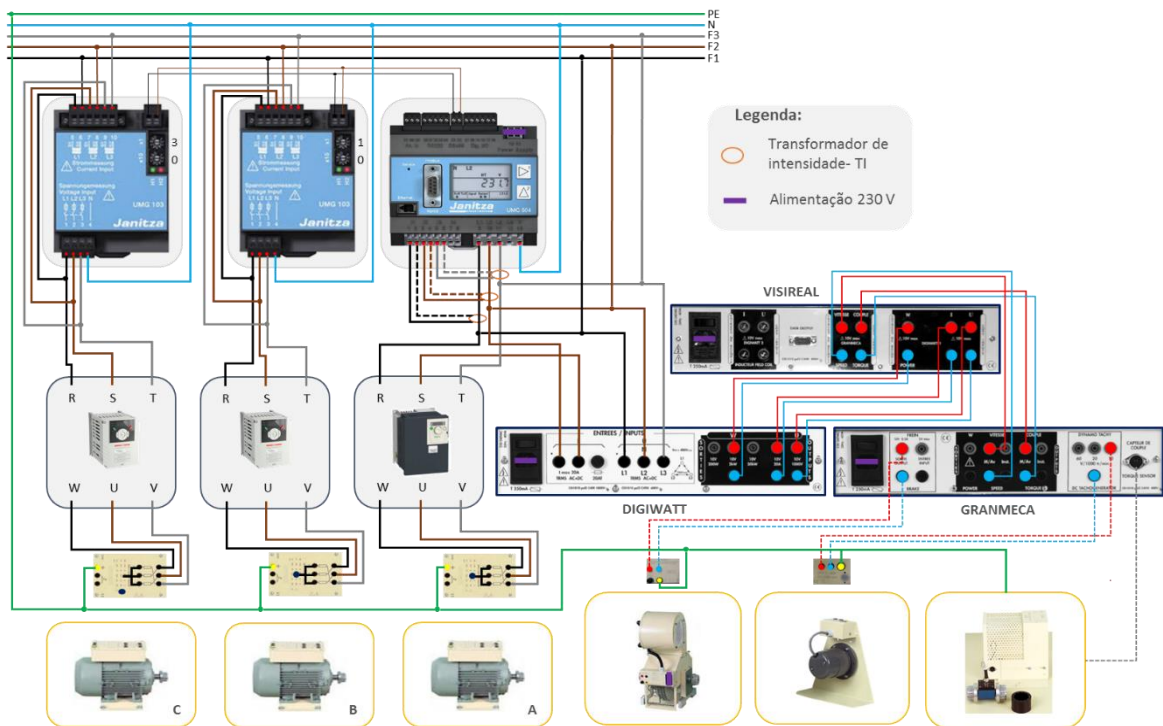


Figura 13: Esquema de ligações.

O sensor de binário está também conectado ao GRANMECA, para que seja possível a sua leitura. Esta leitura é fundamental para que, no momento em que regulamos o travão, sabermos que binário está a ser exercido no motor.

Quanto ao dínamo taquimétrico, este encontra-se, á semelhança dos anteriores, conectado ao GRANMECA, permitindo a obtenção da leitura de velocidade do motor, através de uma ligação analógica, fornecendo um sinal de 0 a 10 V.

O DIGIWATT e o GRANMECA por sua vez estão conectados ao VISIREAL de forma a transmitir os dados de tensão, corrente, e Potência elétrica, provenientes do DIGIWATT, além da velocidade e binário relativos ao GRANMECA. O VISIREAL, tem depois uma conexão ao computador, onde se pode analisar os dados.

Em suma, temos o Motor A, onde está conectado um sensor de binário que faz a leitura do valor de binário, um travão magnético que regula o atrito a que o motor é sujeito, e um dínamo taquimétrico para leitura da velocidade. Estes três aparelhos estão conectados ao GRANMECA, sendo a leitura dos valores de binário e velocidade visíveis a partir deste e ainda a regulação do binário a que o motor é sujeito regulável a partir do GRANMECA.

No que aos motores B e C diz respeito, estes têm as ligações feitas da mesma forma. A fonte trifásica é ligada ao variador de velocidade, percorrendo antes o analisador de energia, tornando possível medições de corrente. Neste ponto existe outra ligação das três fases ao analisador, para que seja possível efetuar a medição de tensão. A medição pelo analisador é

realizada antes da conexão ao variador de velocidade, pois assim temos uma medição realista que inclui o consumo do variador de velocidade, se assim não fosse o consumo medido iria ser menor do que é realmente.

O modelo utilizado nestes dois motores tem a particularidade de não necessitar de energia, pois utiliza a energia que o percorre para o seu funcionamento. Cada um deles tem um endereço associado, informação necessária para identificação na rede de comunicação dos analisadores, sendo para o motor B o analisador 1, e para o motor C o analisador 3. Existe ainda ligação das três fases entre o variador de velocidade e o motor para que o motor esteja alimentado.



## 4 Algoritmo de comunicação com os analisadores de energia

No capítulo 4 são apresentadas as diferentes versões do algoritmo de comunicação desenvolvidos e implementados. Ao longo do capítulo apresenta-se: a função utilizada, os respetivos parâmetros, o funcionamento do algoritmo, vantagens e desvantagens das diferentes versões.

### 4.1 Introdução algoritmo

O algoritmo é necessário para podermos obter grandezas elétricas com uma maior precisão e um menor *sampling time* quando comparado com os outros equipamentos de medição como o Digiwatt. Assim a comunicação é estabelecida através do analisador de energia *master*, que como já referido anteriormente em 2.6-Analisadores de energia, permite a comunicação direta com um computador. Através de um cabo de rede, este é conectado à rede do GECAD, permitindo uma recolha de dados.

Foram desenvolvidas três versões do algoritmo. Neste caso destaca-se a primeira versão que recolhe medições do analisador *master* e dos dois analisadores *slave*, sendo que as segunda e terceira versão apenas recolhem dados do analisador *master*. Ao passo que que nas duas primeiras versões do algoritmo os gráficos são desenhados apenas no final da recolha de dados, no último caso estes são traçados ao longo do tempo de simulação.

A Tabela 2 expressa algumas características importantes dos algoritmos, bem como as diferenças verificadas entre eles.

Tabela 2: Características das diferentes versões do algoritmo de comunicação com os analisadores.

	Versão 1	Versão 2	Versão 3
Nº de analisadores	3	1	
Tempo total de simulação ( $t_s$ )	Definido pelo utilizador		
Tempo de comunicação ( $t_c$ )	0.9 s	0.2 s	0.05 s
<i>Sampling time</i> (intervalo entre medições)	$t_c$	$t_c$	$T_{iter}$
Tempo de cada iteração ( $T_{iter}$ )	$t_c$	$t_c$	$t_c + t_t + t_g$
Desenho em tempo real	Não	Não	Sim
Tradução sempre que recebe novas medições	Não	Não	Sim

Nota: os tempos apresentados são aproximados e podem variar a cada iteração.

Analisando a Tabela 2 é possível observar as principais semelhanças e diferenças entre as versões do algoritmo:

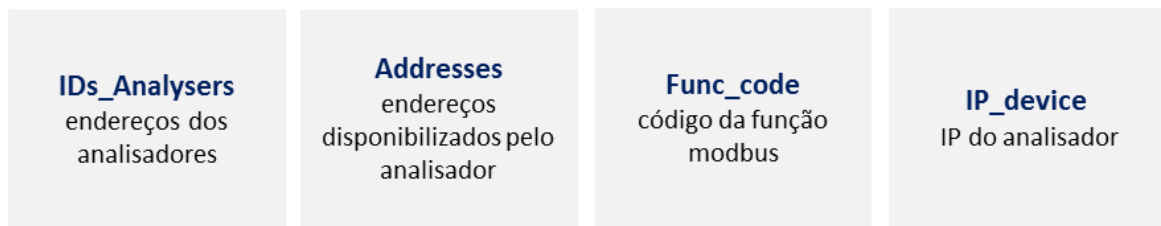
- O nº de analisadores em que se recolhe medições é diferente na versão 1 em relação à versão 2 e 3, na versão 1 temos recolha nos três analisadores enquanto nas versões 2 e 3 apenas recolhe do analisador *master* correspondente ao motor A;
- O tempo total de simulação ( $t_s$ ) é definido pelo utilizador, fator comum em todas as versões;
- O tempo de comunicação ( $t_c$ ), é superior na versão 1 devido à utilização de um número maior de analisadores e conseqüentemente um maior número de pedidos.
- O *sampling time* corresponde ao  $t_c$  nas versões 1 e 2, e ao  $T_{iter}$  na versão 3;
- A tradução e desenho a cada iteração acontece apenas na versão 3, ao passo que nas versões 2 e 3 apenas acontece no final de todas as iterações;
- O tempo de iteração ( $T_{iter}$ ) corresponde ao  $t_c$  nas versões 1 e 2 enquanto na versão 3 o  $T_{iter}$  é a soma do  $t_c$ , tempo de tradução ( $t_t$ ) e tempo desenho ( $t_g$ );

Devido a menores tempos de comunicação e conseqüentemente menores *sampling times* foi dado mais foco nas versões 2 e 3. A versão 3 consegue um  $t_c$  inferior à versão 2 devido ao seu maior tempo de  $T_{iter}$ .

## 4.2 Função e parametrização do algoritmo

A comunicação do utilizador com o analisador foi estabelecida através de um código desenvolvido em MATLAB®. A função e a parametrização que descrevem o estudo estão representadas na Figura 14.

O nome atribuído à função utilizada neste estudo foi *comunicacao\_analisadores*. Foram então definidos os parâmetros da função. Através do *IDs\_Analysers* são identificados os analisadores. Neste caso, existem três analisadores, um *master* e dois *slave*. No entanto, apenas o analisador principal é capaz de estar conectado à rede. Assim, é necessário recorrer à comunicação RS 485 para que a informação recolhida pelos demais analisadores seja transferida para o *master*. O aparelho *master* é identificado através *unitID* neste caso o número 02, enquanto os restantes aparelhos pelos números 01 e 03.



`function comunicacao_analisadores(IDs_Analysers, Addresses, Func_code, IP_device, Port, InputBufferSize, OutputBufferSize, pausa, ts)`

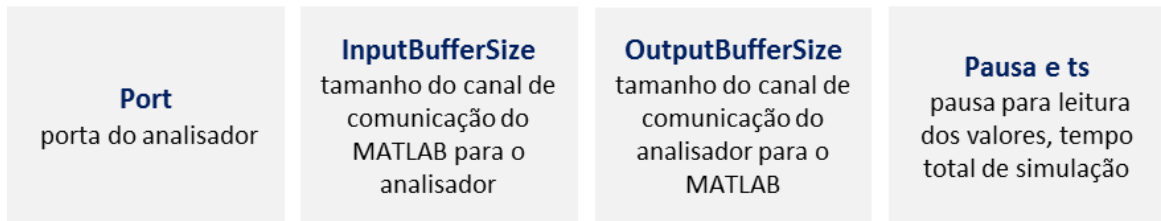


Figura 14: Função de comunicação com o analisador e respetivas variáveis.

Na Figura 15 é ilustrado o pedido enviado ao analisador. Os parâmetros da função `fwrite` são: o canal de comunicação (`tcpip_pipe`); a mensagem propriamente dita escrita numa linha anterior do algoritmo; e o formato, que neste caso é `16 bit`. Além do pedido temos também a função que permite a leitura da resposta recebida (`fread`)

```

66 - | fwrite(tcpip_pipe,message,'int16');
67 - | ...|
68 - | res(:,iter) = fread(tcpip_pipe,tcpip_pipe.BytesAvailable);

```

Figura 15: Comunicação com o analisador.

O `Func_code`, diz respeito ao código correspondente à função utilizada para a comunicação *Modbus* do analisador, neste caso é atribuído o código 03 para todos os analisadores.

Relativamente aos `Addresses`, estes representam os códigos de medições disponíveis no equipamento. Para aceder às medições pretendidas, consulta-se a lista de códigos fornecida pelo analisador (ver Anexo A – Lista de endereços do analisador de energia).

O `IP_device` e a `port`, neste caso '192.168.2.233' e 502 respetivamente, são parâmetros de identificação do analisador. Dizem respeito ao IP atribuído ao equipamento e a porta correspondente à ligação por *ethernet* e comunicação *Modbus* TCP/IP (definido pelo fabricante).

A configuração do `InputBufferSize` e `OutputBufferSize` estão relacionados com o tamanho do canal de comunicação do computador para o analisador e do analisador para o

computador, respetivamente. Foi necessário para ambos os parâmetros o valor de 1024 bytes devido ao número de medições pedidas.

Tendo em conta o número de medições pedidas pode ser necessário adicionar uma pausa para que todos os dados sejam enviados do analisador para o computador, caso o número de pedidos seja elevado e não se utilize uma pausa podemos receber apenas uma parte das medições pedidas.

A variável  $t_s$  diz respeito ao tempo total de simulação em segundos, ou seja, se o objetivo for recolher dados de 2 minutos, o número a colocar será 120 segundos.

### 4.3 Fluxogramas dos algoritmos

O algoritmo criado deu origem a três versões distintas, permitindo uma versatilidade maior. Assim podemos ter variações como traduzir e desenhar os resultados a cada iteração ou só no fim da recolha de todas as medições ou o número de analisadores a que estamos a recolher medições.

A Figura 16 representa o funcionamento do algoritmo utilizado nas versões um e dois. Inicia-se com a definição dos parâmetros da função apresentada e a configuração do protocolo de comunicação. Na definição de parâmetros estão incluídos a identidade dos analisadores (1, 2 e 3 neste caso), os endereços correspondentes às medições pretendidas, o IP do analisador principal, a porta do analisador, a pausa entre o pedido e a receção da resposta, e o tempo total de simulação.

Depois destes passos estarem completos, estabelece-se a comunicação com o analisador principal, é enviada a lista de pedidos e é recebida a resposta. O tempo decorrido entre o envio dos pedidos ao analisador e a leitura da resposta no computador é designado por tempo de comunicação ( $t_c$ ). Importa realçar a necessidade de existência de uma pausa para leitura de todas as medições pedidas. Caso não fosse usada esta pausa, o número de medições lidas seria bastante limitado. Este tempo de pausa necessário foi definido empiricamente, ao testar o algoritmo e com o aumento de medições pedidas o analisador, este deixou de ter capacidade de responder em tempo útil. Assim foi necessário encontrar uma solução, nomeadamente uma pausa, e foi sendo testado o tempo que melhor se adequa para o número de medições que pretendemos. Caso se mude o número de medições pedidas este valor de pausa pode aumentar ou diminuir ou até não ser necessário se as medições pedidas forem reduzidas. Assim, faz-se um compromisso otimizado entre a quantidade de medições que são pretendidas e aproximação real-time conseguida.

Sempre que cada ciclo de análise é completo vai-se atualizando o tempo atual decorrido ( $t_a$ ), sendo este a soma dos tempos de iteração anteriores, os  $t_c$ . O critério de paragem é relação entre  $t_a$  e  $t_s$ . Enquanto se verificar que o tempo atual decorrido é menor que o tempo total de simulação definido, o algoritmo repete os passos anteriores. Cada iteração dá-nos acesso a novo um conjunto de medições. Quando a condição deixa de se verificar e o  $t_a$  é superior ao  $t_s$  há a conversão das medições para o formato decimal, necessário pois o analisador responde em hexadecimal.

A grande vantagem deste algoritmo é permitir um *sampling time* (tempo entre medições) menor, pois o intervalo de medições apenas corresponde ao tempo de comunicação.

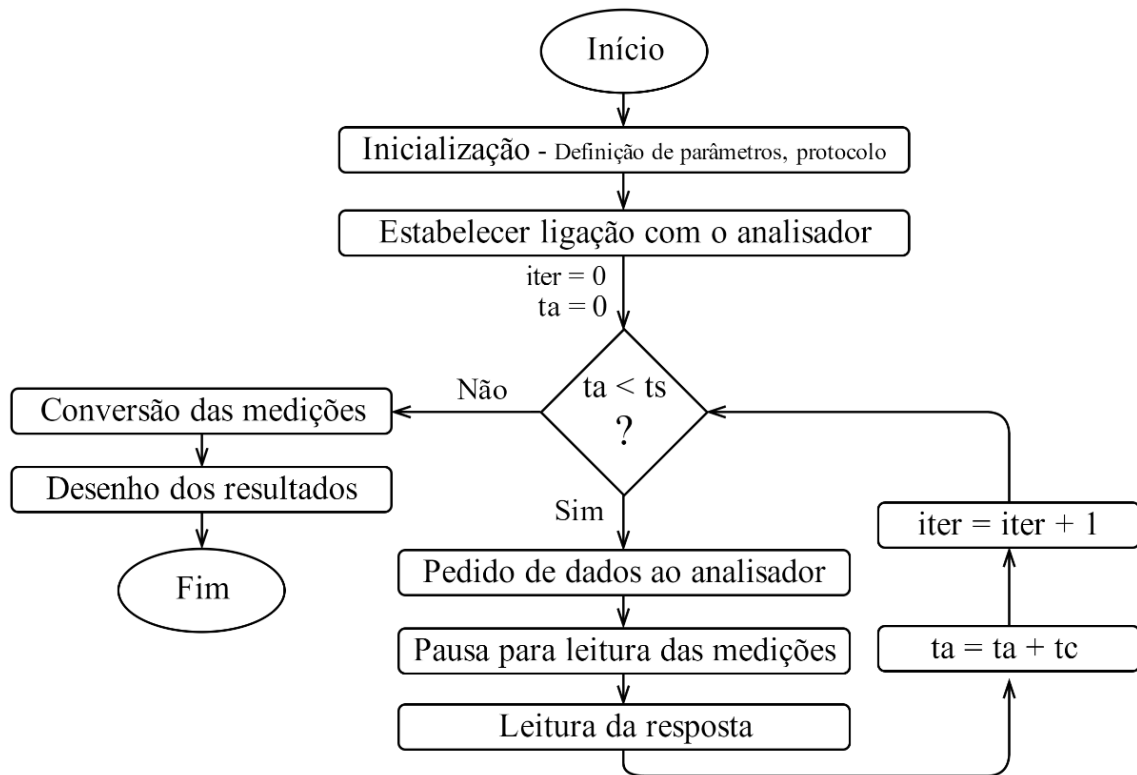


Figura 16: Fluxograma do algoritmo MATLAB® da versão 1 e 2.

A Figura 17 representa o algoritmo utilizado para a terceira versão. Neste caso, a principal diferença é a tradução dos dados recebidos e desenho dos resultados à medida que são recebidos. A grande vantagem deste algoritmo, é a possibilidade de acompanhar, em tempo real, as medições feitas, podendo detetar possíveis variações no momento em que acontecem. No entanto desenhar os gráficos demora tempo, o que faz com que o *sampling time* aumente, ou seja o intervalo de tempo entre medições é superior quando comparado

com algoritmo anterior, considerando o mesmo número de endereços pedidos e os mesmos analisadores.

Em suma, o algoritmo inicia, estabelece a comunicação, e quando recebe dados traduz imediatamente os dados para o formato decimal e desenha os gráficos logo de seguida. No fim do desenho verifica se o tempo atual é inferior ao tempo de simulação e, caso se verifique esta condição, inicia nova iteração. O algoritmo termina quando o  $t_a$  é superior ao  $t_c$ .

É importante realçar neste algoritmo o tempo de desenho das medições para cada iteração, uma vez que só depois do desenho do gráfico estar concluído é que começa uma nova iteração. Isto acontece, pois, o tempo de iteração ( $T_{iter}$ ) nesta versão do algoritmo é a soma do tempo de comunicação ( $t_c$ ), do tempo de tradução ( $t_t$ ) e do tempo do gráfico ( $t_g$ ).

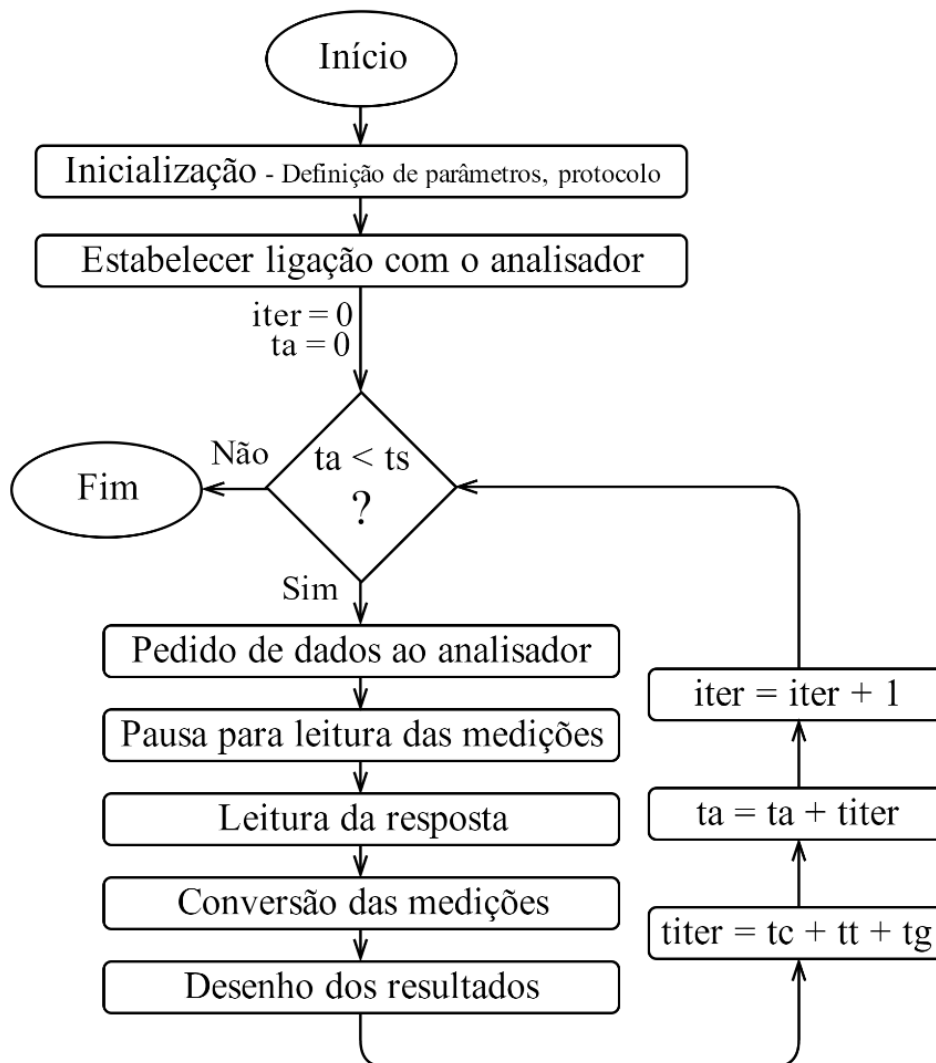


Figura 17: Fluxograma do algoritmo MATLAB® da versão 3.

## 4.4 Conclusões

O algoritmo apresentado no presente capítulo foi desenvolvido de raiz no âmbito do trabalho da presente dissertação. O algoritmo obtido necessitou de algumas etapas de maturação. Um dos grandes problemas e entraves ao seu funcionamento foi perceber a necessidade da pausa para resposta do analisador, depois de perceber que o analisador não conseguia dar resposta a um grande volume de medições foi sendo testado o tempo necessário em função do pedido.

Além da dificuldade referida houve também outra significativa – definir o *sampling time*. Inicialmente o algoritmo foi projetado para recolher dados com um *sampling time* definido pelo utilizador. Por exemplo caso o utilizador definisse 1s e estivesse a considerar a versão 1 do algoritmo que, para as medições pretendidas necessita de uma pausa de 0.9s (ver Tabela 2), o tempo de iteração fica, assim, entre 0.9s e 1s. De maneira a ter medições a cada segundo foi adicionada uma pausa com a duração da diferença entre 1 s e o tempo decorrido até esse momento da iteração. Assim, tínhamos valores com um intervalo à escolha do utilizador quer ele fosse 1s ou 30s, apenas era necessário defini-lo no início da simulação.



## 5 Casos de estudo

Os casos de estudo apresentados focam-se na recolha das mesmas grandezas elétricas, como tensão, corrente e potência ativa para cada uma das três fases. Por sua vez, foram ainda medidas as potências reativa e ativa. A partir das anteriores, foi então possível determinar a potência aparente. Um outro parâmetro mensurado foi o tempo de iteração em cada simulação. Os casos de estudo foram divididos em grupos, sendo que os três primeiros apresentam duas simulações cada. No primeiro caso temos o estudo de arranque do motor em vazio e em potência nominal. No segundo caso de estudo temos duas situações, em 2A variação da velocidade e em 2B variação do binário. O terceiro caso de estudo compara as versões 2 e 3 do algoritmo enquanto que no caso de estudo 4 temos uma situação considerando produção eólica além da carga e da rede.

Tabela 3: Identificação casos de estudo.

Casos de Estudo	Versão do Algoritmo	Situação em Estudo	
1	1A	2	Arranque em Vazio
	1B	2	Arranque em Potência Nominal
2	2A	2	Variação de Velocidade
	2B	2	Variação de Binário
3	3A	2	Versão 2 do algoritmo
	3B	3	Versão 3 do algoritmo
4	2	Carga + eólico + rede	

### 5.1 Arranque do Motor A

No primeiro caso de estudo, arranque do motor A, os testes realizados focaram-se nos arranques do motor, sendo no caso de estudo 1A o arranque dá-se em vazio e no 1B em potência nominal. O arranque em vazio está representado na Figura 18. Nesta percebe-se que o arranque do motor ocorre por volta dos 7 segundos e é nesse momento que a potência ativa e a corrente começam a subir. Após pequena oscilação, a potência ativa e a corrente atingem um valor constante, inicia-se o regime permanente. Importa referir que a tensão, corrente e potência ativa são dadas por fase. Há que realçar, também, na Figura 18 a) uma grande variação da tensão por volta dos 15 segundos. Este é um parâmetro da rede que não é possível controlar pelo que não é originada na simulação.

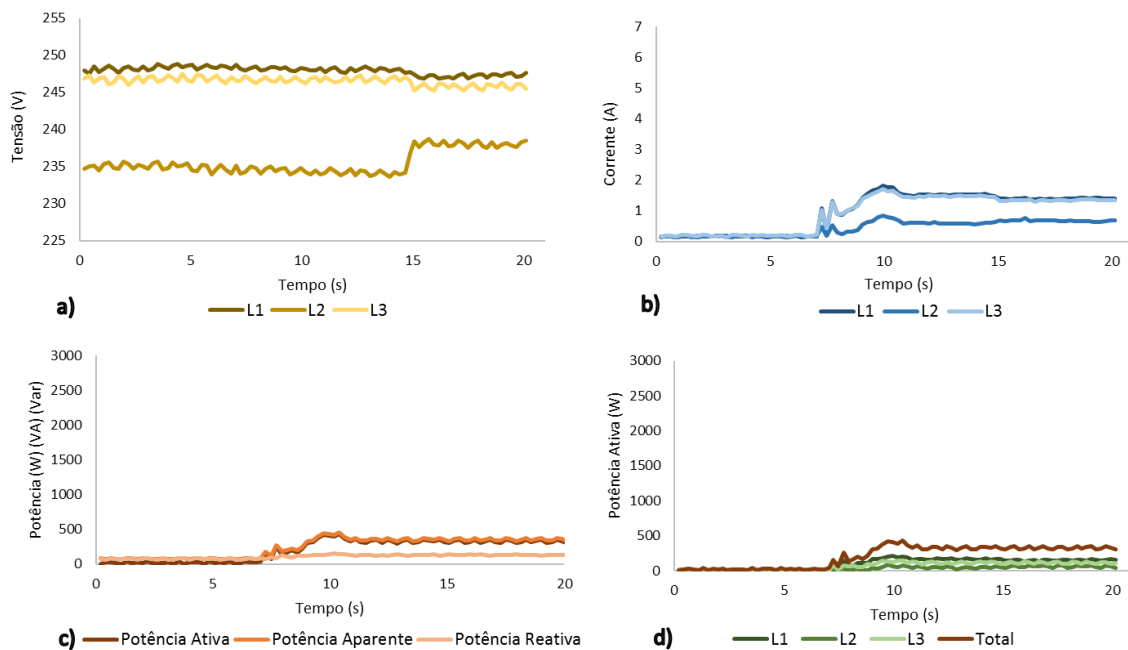


Figura 18- Gráficos do arranque do motor A em vazio, 1A. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.

Além das grandezas elétricas, foram também avaliadas as grandezas mecânicas do motor. A Figura 19 ilustra as variações de binário, velocidade e potência mecânica (potência útil). De modo a melhorar a compreensão, é importante referir que o eixo vertical à esquerda se aplica à velocidade e à potência mecânica e que o eixo vertical à direita se aplica ao binário, este pressuposto é empregue em todas as figuras do VISIREAL apresentadas.

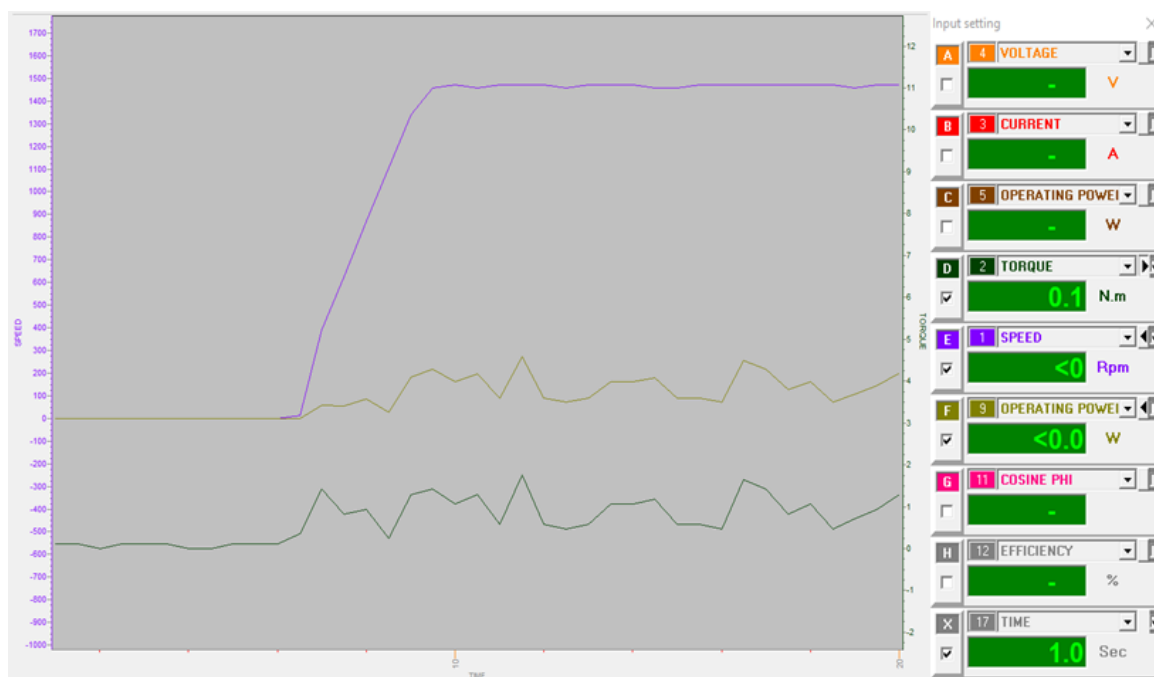


Figura 19: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas do arranque do motor em vazio, 1A.

O tempo de cada iteração, que corresponde ao tempo decorrido entre um pedido ao analisador, recepção da resposta e iniciação do próximo pedido, neste caso, corresponde ao tempo de comunicação com o analisador. Para o arranque em vazio, esta análise é representada na Figura 20 e pode ver-se que o tempo de cada iteração não sofre uma grande oscilação, entre diferentes iterações oscila entre os 0.215 e os 0.235 s, variando apenas 0.02 s. O número de iterações foi 91, no entanto este valor não foi escolhido, o utilizador define o tempo total de simulação e neste caso correspondeu a 91 iterações.

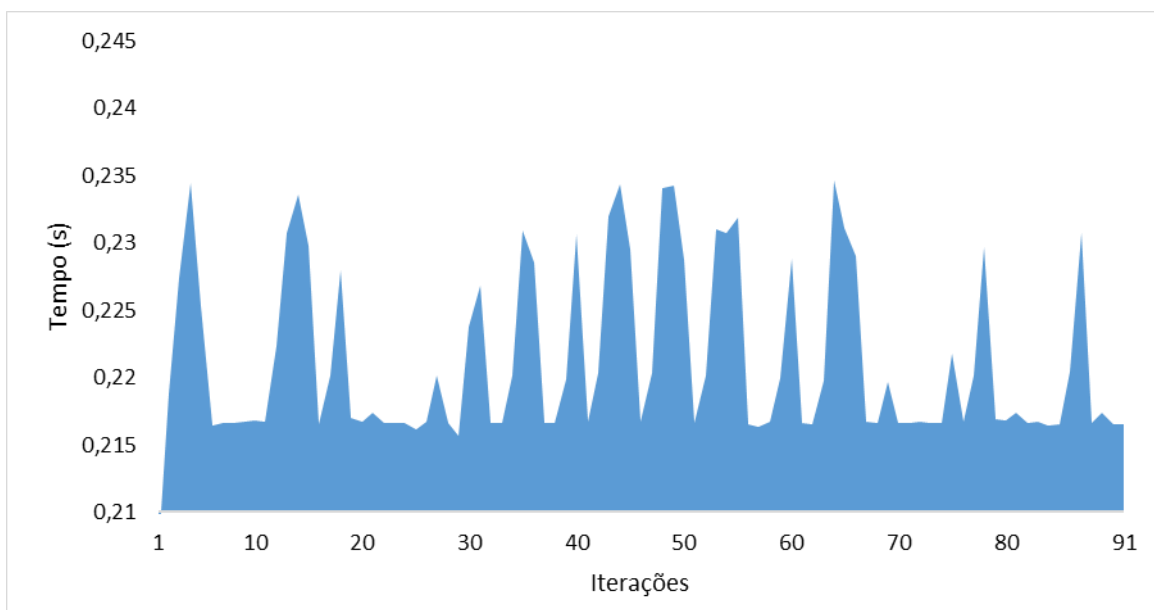


Figura 20: Tempo de cada iteração do arranque do motor A em vazio, 1A.

O caso de estudo 1B, apresentado na Figura 21, é relativo ao arranque em potência nominal do motor A. Neste caso, o arranque do motor ocorreu por volta dos 5 s e, nesse momento, houve um aumento significativo da potência ativa e da corrente. O *timing* do arranque foi diferente do verificado no arranque em vazio (ocorreu por volta dos 7 s) pois foi despoletado manualmente e assim com menor precisão em termos de sincronização. Por volta dos 7 s é atingido um período de estabilização correspondente ao regime permanente, do mesmo modo que no caso de estudo 1A.

No arranque em potência nominal, à semelhança do caso 1A foi também estudada a componente mecânica expressa na Figura 22. Aqui é também visível um grande aumento da velocidade no momento do arranque e, ao contrário da situação anterior, um grande aumento do binário e da potência mecânica. A diferença é explicada pelo facto de o motor estar em potência nominal e, por isso, o binário é superior e, conseqüentemente, a potência mecânica é igualmente elevada.

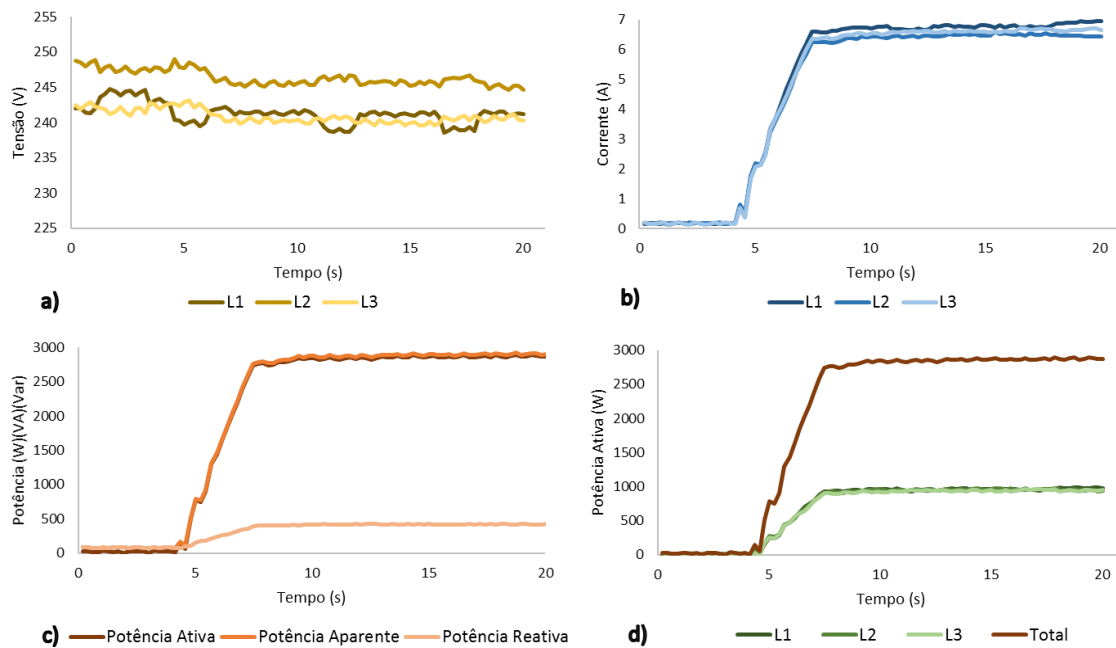


Figura 21- Gráficos do arranque do motor A em potência nominal, 1B. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.

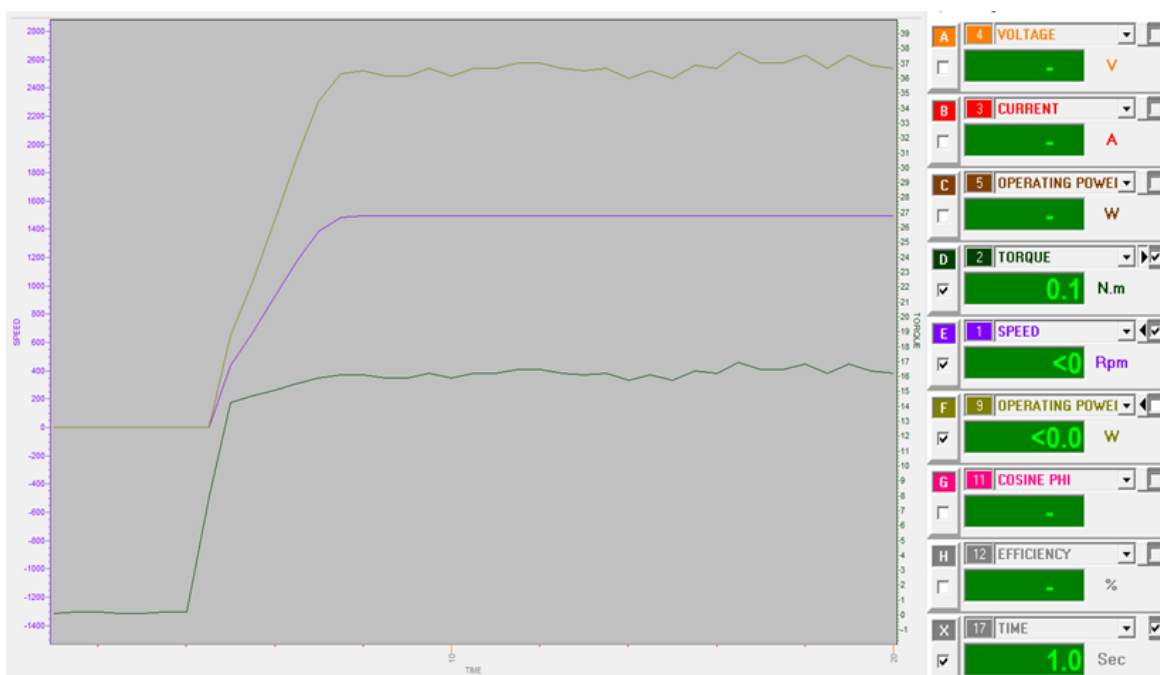


Figura 22: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas do arranque do motor em potência nominal, 1B.

A Figura 23 diz respeito ao tempo de cada iteração do arranque do motor em potência nominal e tal como na situação anterior corresponde ao tempo de comunicação com o analisador. Os tempos de iteração no arranque do motor em potência nominal são similares

à situação anterior, também variam na sua maioria entre os 0.215 s e os 0.235 s. Os tempos de iteração são muito parecidos nos dois arranques estudados, ambos estão na mesma gama de valores e com uma variação idêntica. No entanto, e embora sejam exceções, nas primeiras iterações e por volta da quadragésima verifica-se a existência de valores ligeiramente inferiores do tempo de iteração.

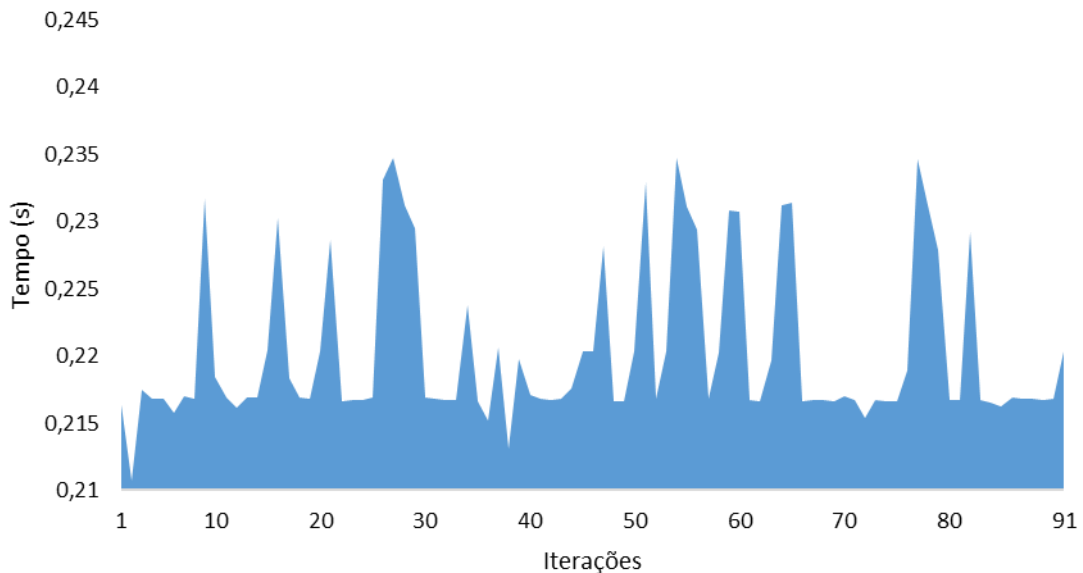


Figura 23: Tempo de cada iteração do arranque do motor A em potência nominal, 1B.

No que diz respeito às medições realizadas, nos casos 1A e 1B, no momento do arranque há uma rápida subida da corrente e da potência ativa, com ligeira oscilação até atingir o regime permanente. Na situação de arranque em vazio, a corrente atinge o valor de 1 A para a fase 1 e de 2 A nas restantes fases. No que diz respeito à potência ativa, esta apresenta valores na ordem dos 400 W após estabilização, sendo a potência mecânica cerca de 100 W. Tratando-se do arranque em vazio, o binário é reduzido situando-se por volta dos 1 Nm.

No arranque em potência nominal a corrente e a potência apresentam valores notoriamente mais altos em comparação com o arranque em vazio. A corrente ronda os 6.5 A e potência ativa aproxima-se dos 3000 W, no regime permanente, enquanto que a potência mecânica se mantém por valores próximos dos 2600 W. Neste caso o binário é significativo, pois trata-se do arranque em potência nominal e situa-se nos 16 Nm.

## 5.2 Motor A com variação de velocidade e binário

O caso de estudo que se segue focou-se no funcionamento do motor com variação da velocidade (através da variação da frequência) e do binário em situações distintas. Na Figura 24 estão as medições de grandezas elétricas realizadas no estudo 2A que representa a variação da velocidade do motor. Nesta simulação, o motor na fase inicial está a trabalhar à potência nominal.

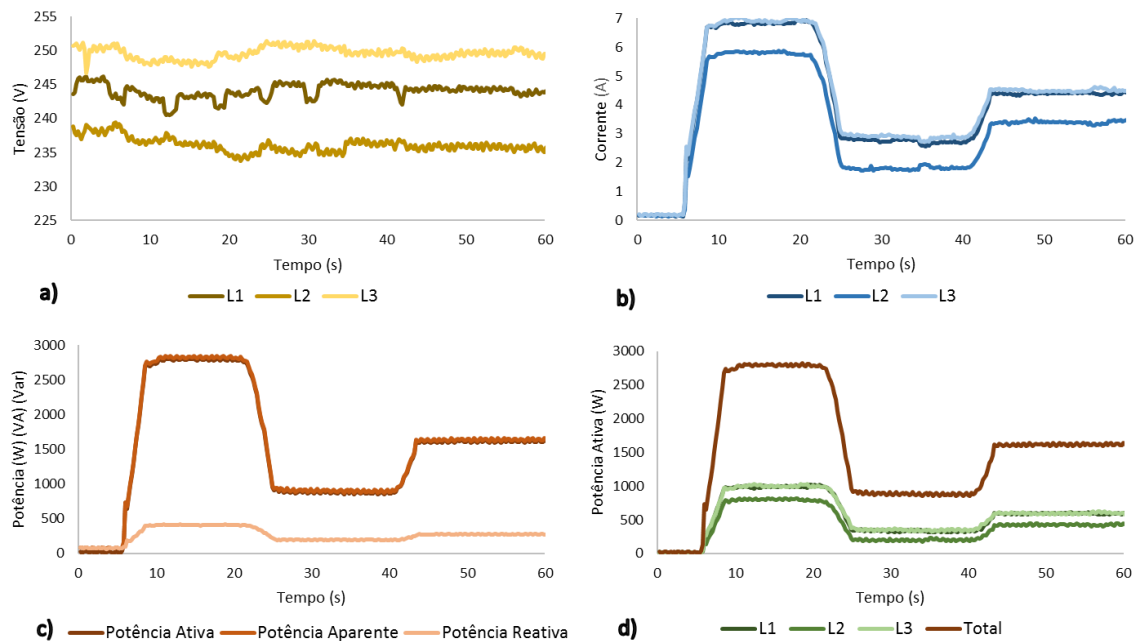


Figura 24- Gráficos do motor A com variação da velocidade, 2A. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.

Analisando a Figura 24 é possível identificar o arranque do motor aos 5 s. Uma primeira variação ocorre por volta dos 20 s e uma segunda variação aos 40 s. Na Figura 25 é possível perceber que as variações referidas são causadas por uma alteração da velocidade inicialmente pela redução e posteriormente pelo aumento da mesma. A diminuição da velocidade causa uma redução da corrente, potência ativa, binário e potência mecânica. Aumentando a velocidade os efeitos são opostos, havendo um aumento das grandezas referidas. É de notar a variação da tensão ao longo da simulação, ilustrada na Figura 24 a), parâmetro sobre o qual não existe qualquer interferência.

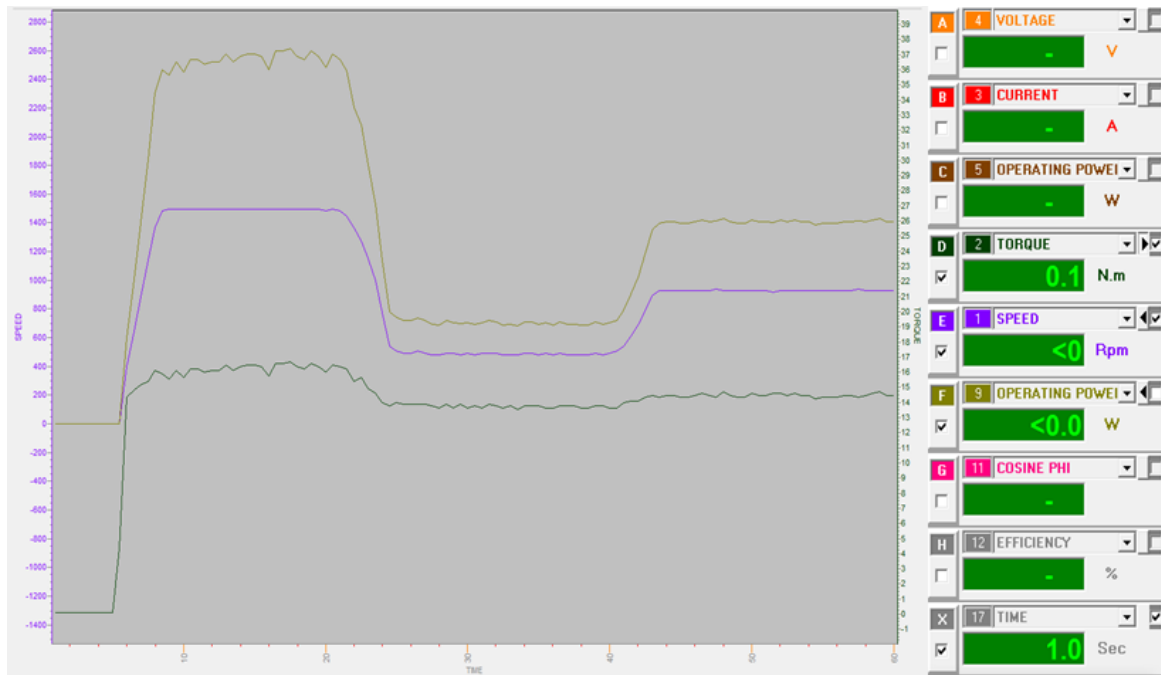


Figura 25: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas com variação da velocidade, 2A.

Os tempos de cada iteração ao longo da simulação são apresentados na Figura 26. Esta é outra das situações em que o tempo de iteração é igual ao tempo de comunicação. Os tempos das iterações variam, na sua maioria, entre os 0.212 s e os 0.216 s, havendo algumas exceções com tempos de iteração superiores e inferiores. Os tempos de iteração são idênticos aos obtidos nos arranques do motor, o que era esperado pois foi utilizada a mesma versão do algoritmo (versão 2).

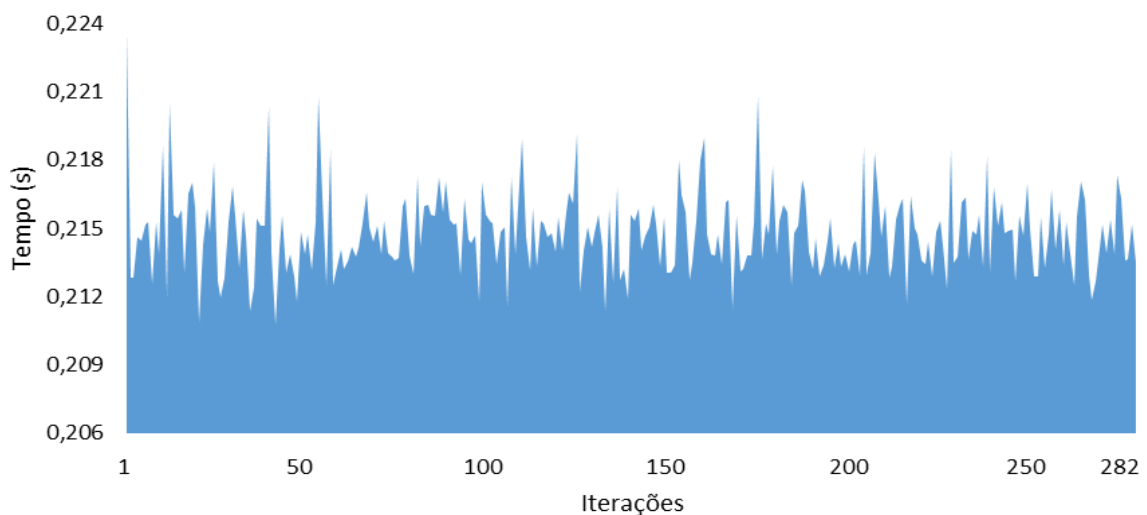


Figura 26: Tempo de cada iteração do motor A com variação de velocidade, 2A.

O caso seguinte, 2B, focou-se na simulação com variação do binário, sendo os parâmetros elétricos exibidos na Figura 27. Efetuando a análise aos dados referidos é possível perceber que, tal como na situação anterior, o arranque do motor ocorre aos 5 s. Uma primeira variação ocorre por volta dos 20 s uma segunda aos 40 s.

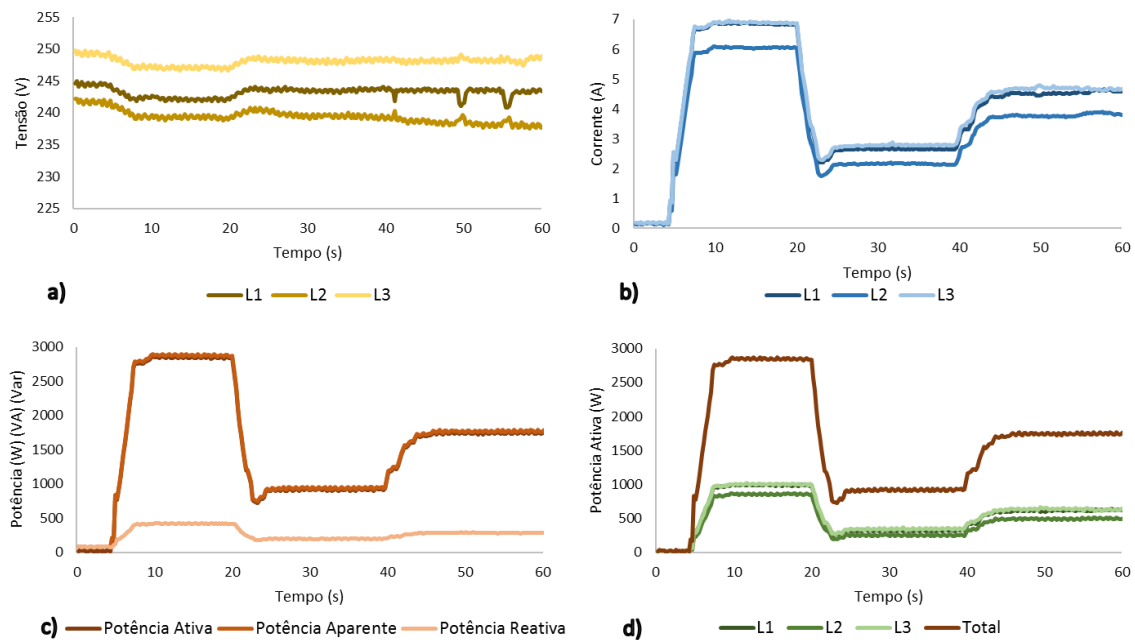


Figura 27- Gráficos do motor A com variação do binário, 2B. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.

Ao contrário da simulação 2A, em que as variações ocorridas se deviam a uma variação da velocidade, neste caso, 2B, devem-se à variação do binário o que é perceptível na Figura 28. A velocidade mantém-se constante ao longo de toda a simulação e é o binário que tem uma diminuição acentuada e mais tarde subida. Estas variações têm repercussões na potência mecânica, corrente e potência ativa.

Como nos casos de estudo apresentados até ao momento, o tempo de iteração foi estudado e tal como acontece na variação de velocidade, o tempo de iteração corresponde ao tempo de comunicação. A Figura 29 representa os tempos de cada iteração ao longo da análise. Os tempos de iteração são semelhantes, com os valores na sua maioria entre os 0.212 s e os 0.215, estando evidentes duas quebras a cerca de 0,206 s perto da iteração 50 e um pouco a cima da 150.

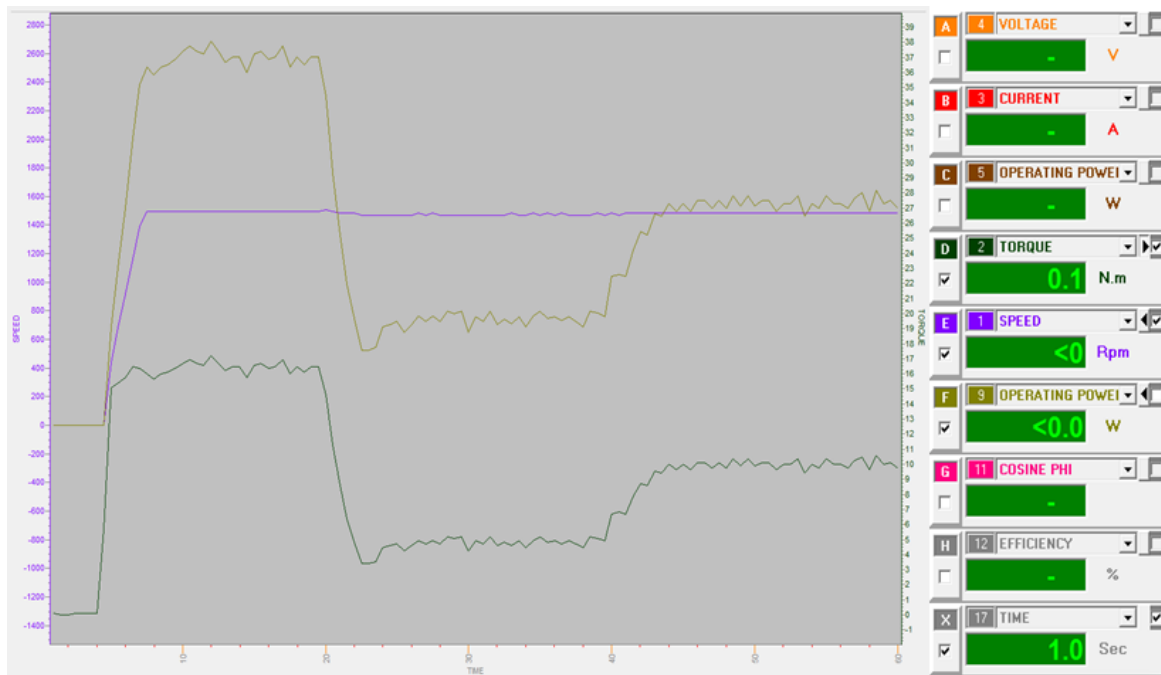


Figura 28: Software LOGIREAL – Grandezas mecânicas com variação do binário, 2B.

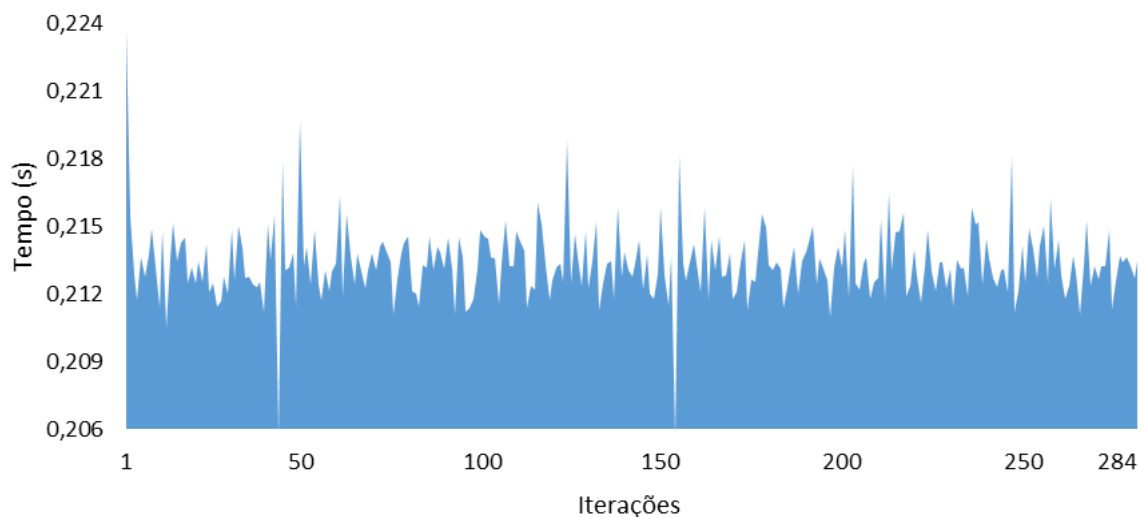


Figura 29: Tempo de cada iteração do motor A com variação de binário, 2B.

Nas simulações apresentadas neste ponto, o arranque do motor é seguido de duas variações, em tempos concordantes para ambos os casos. O que difere nas duas situações é a causa das variações, se no primeiro caso é uma variação da velocidade (através de uma variação da frequência), no segundo caso as alterações são causadas por uma variação do binário. Outra pequena diferença é nos efeitos provocados pela variação. Quando existe variação de velocidade temos uma pequena variação do binário ao passo que quando se varia o do binário a velocidade mantém-se constante. Em ambos os casos os efeitos verificados são semelhantes, tanto nas grandezas mecânicas como nas grandezas elétricas. Apenas

através das curvas de binário e velocidade é possível perceber a causa das variações nas duas situações.

### 5.3 Versão 2 e 3 do Algoritmo com Motor A em funcionamento

As simulações que se seguem visam a comparação das versões 2 e 3 do algoritmo apresentado no capítulo 4, sem qualquer variação de algumas das grandezas.

Na Figura 30 estão representadas as grandezas elétricas medidas na simulação utilizando a versão 2, designada 3A. Neste caso, a corrente e a potência ativa são constantes uma vez que não houve qualquer variação nestes parâmetros. No entanto temos variações de tensão ao longo da simulação, grandeza sobre a qual não temos influência, tanto em 3A como em 3B.

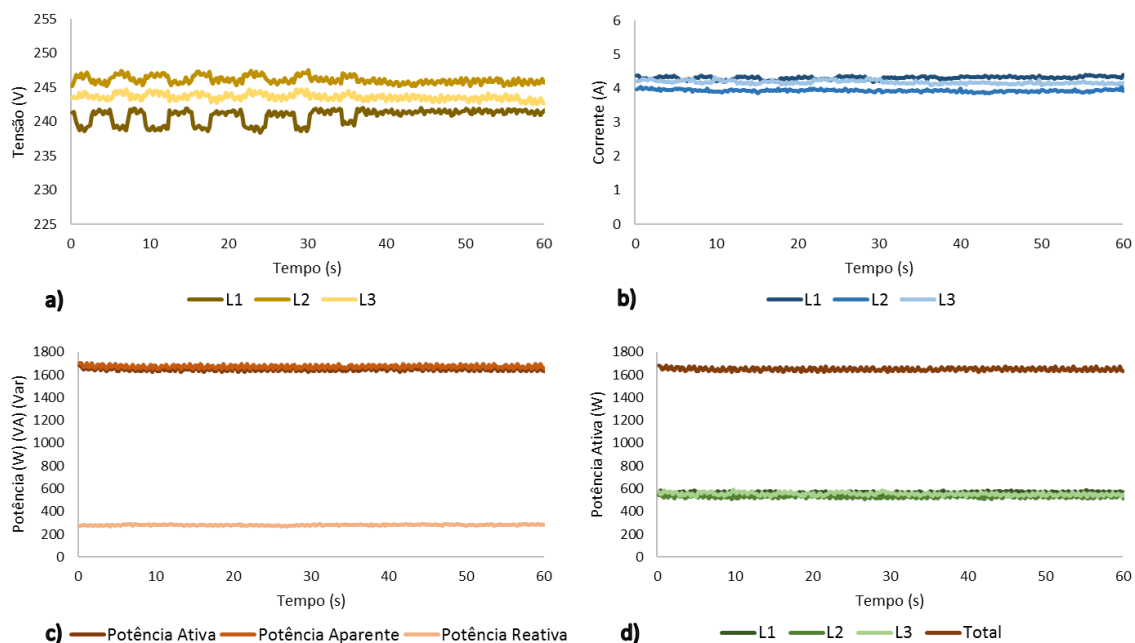


Figura 30- Gráficos do motor A utilizando versão 2, 3A. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.

A simulação 3B, onde é usada a versão 3 do algoritmo, é então apresentada na Figura 31. Aqui estão exibidas as grandezas elétricas e, tal como em 3A, a corrente e a potência ativa são constantes. Uma vez que não se variam os parâmetros, não se verificam variações nas grandezas ao longo da simulação.

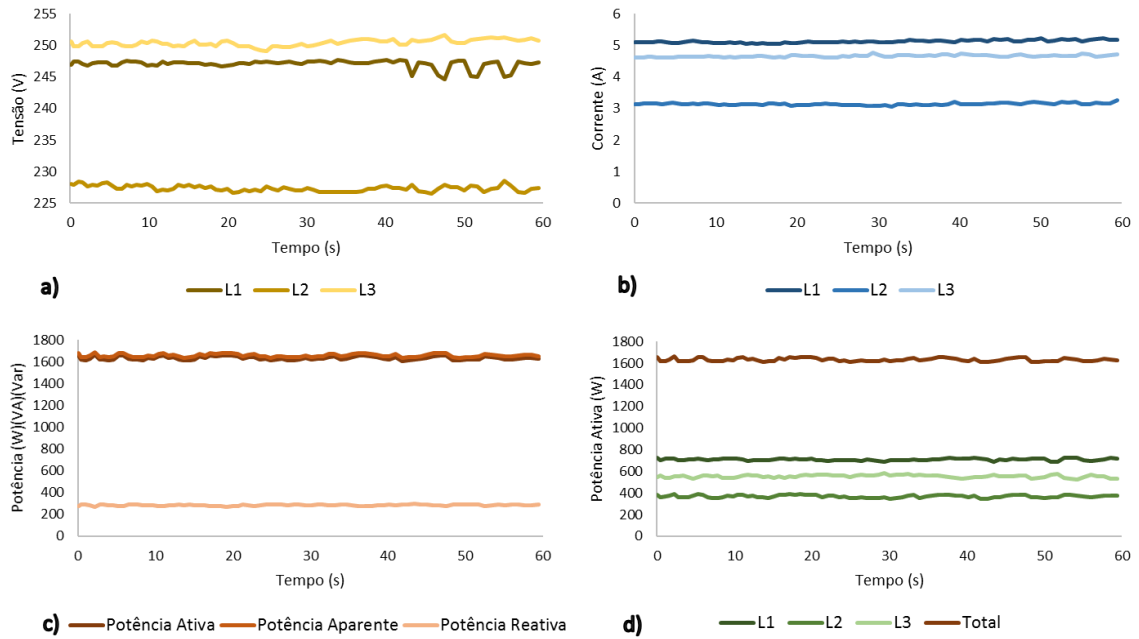


Figura 31- Gráficos do motor A utilizando versão 3, 3B. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Potência no Motor A; d) Potência Ativa no Motor A.

Relativamente à simulação 3A, onde é utilizada a versão 2 foi representado o tempo de cada iteração que, neste caso, é igual ao tempo de comunicação com o analisador. Observando a Figura 32, podemos notar que os tempos se situam, na sua maioria, entre 0.218s e os 0.230s. No entanto, ao longo das iterações vão existindo alguns picos acima dos 0.230s.

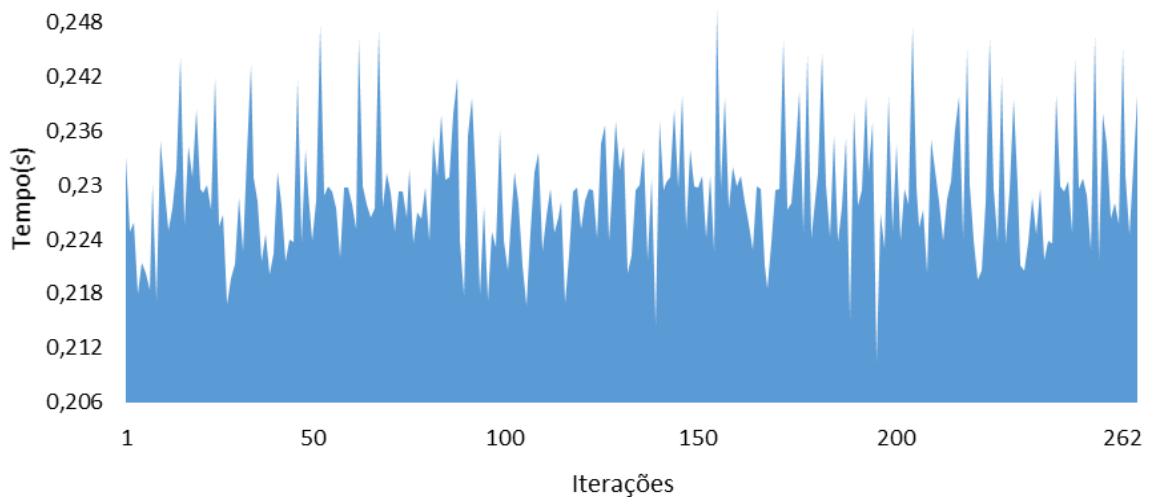


Figura 32: Tempo de cada iteração utilizando a versão 2, 3A.

A Figura 33, representa a simulação 3B onde utilizamos a versão 3 do algoritmo, neste caso o tempo de iteração é a soma dos tempos de comunicação, tradução e desenho do

gráfico. Ao longo da simulação o tempo de iteração aumenta ligeiramente devido ao facto de que a cada iteração que passa, há mais dados para desenhar. A cada iteração são desenhados todos os dados novamente em vez de apenas acrescentar apenas o novo valor.

Quanto aos tempos de cada iteração é perceptível que em 3A são bastante inferiores quando comparados a 3B devido ao que foi referido anteriormente. Isto acontece, pois em 3A o tempo de iteração é igual ao tempo de comunicação, enquanto em 3B o tempo de iteração engloba além do tempo de comunicação com o analisador também a tradução e o desenho das medições.

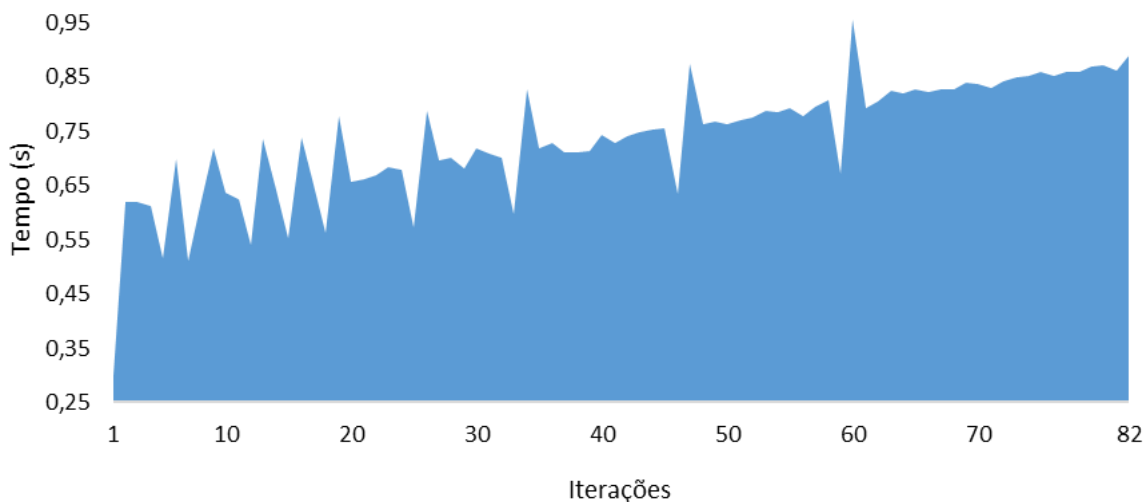


Figura 33: Tempo de cada iteração utilizando a versão 3, 3B.

Nas duas versões do algoritmo apresentadas, o motor apresenta igual funcionamento. A diferença acontece na forma como é feita a recolha dos dados. Enquanto em 3A, versão 2 do algoritmo, a resposta é recebida à medida que os pedidos são efetuados e apenas no fim da simulação são traduzidos os dados, em 3B, versão 3 do algoritmo, a cada iteração há a tradução imediata e desenho em tempo real. Assim, para o mesmo tempo de simulação temos um maior número de medições na versão 2 em relação à versão 3.

## 5.4 Produção eólica e carga

O caso de estudo 4 difere dos anteriores na mediada em que, além das medições do motor A, é também apresentada a potência ativa do emulador eólico que, tal como o nome indica, é utilizado para a produção de energia eólica. Assim, existem no laboratório três recursos intervenientes no estudo. A carga, representada pelo motor, o emulador eólico e a rede elétrica. A Figura 34 representa os fluxos de energia existentes na simulação tendo em

contas estes três recursos. A situação A acontece quando não existe produção de energia e toda a carga é satisfeita através da rede elétrica. Na situação B, a produção eólica é superior às necessidades da carga e, assim, consegue alimentar a carga e ainda fornecer energia à rede elétrica. Por último, a situação C aplica-se quando a produção não é capaz de satisfazer a carga e, além da produção eólica, é necessária energia proveniente da rede elétrica.

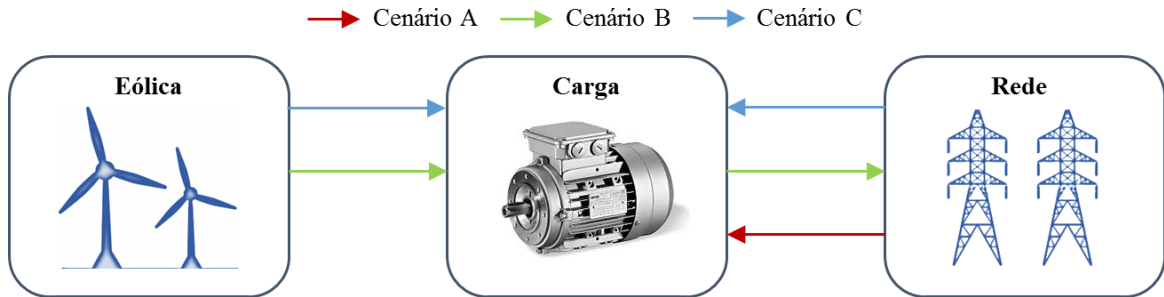


Figura 34: Fluxo da Energia entre o motor, a produção eólica e a rede elétrica do caso de estudo.

Na Figura 35 estão ilustradas as grandezas elétricas do motor, a potência ativa da produção e a representação do fluxo de energia ao longo do tempo, dividida nas 3 situações tal como referidas anteriormente.

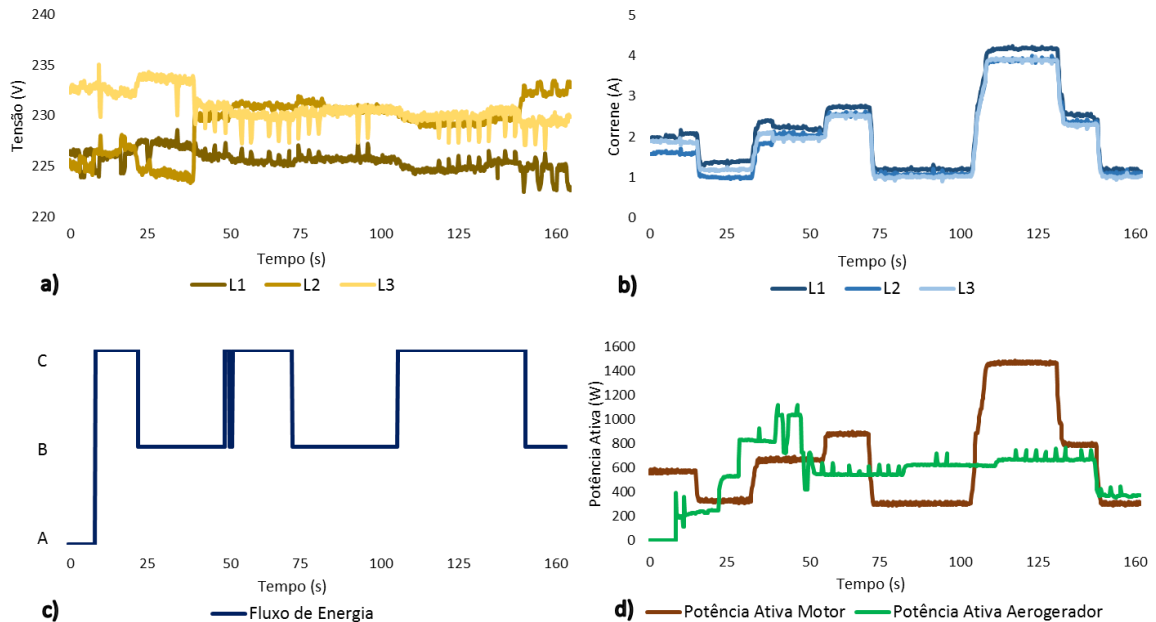


Figura 35- Gráficos do motor A com produção de energia eólica. a) Tensões eficazes no Motor A; b) Correntes eficazes no Motor A; c) Direção do fluxo de energia; d) Potência Ativa no Motor A e no aerogerador.

Analisando os fluxos de energia, é possível perceber que a simulação começa sem produção e, por isso, a carga é alimentada pela rede elétrica. Por volta dos 5 s passamos a ter produção, mas ainda insuficiente para alimentar a carga. Aos 25 s a produção é superior à necessária para a carga e, por isso, o aerogerador alimenta a carga e injeta energia na rede. Aos 50 segundos surgem grandes variações no balanço de produção/consumo, mudando quase instantaneamente o fluxo da energia estabilizando, depois, com produção insuficiente para a carga. Só no final da simulação, esta situação volta a ser suportada pela energia produzida pelo aerogerador. As características do emulador eólico são: Gerador assíncrono; Corrente máxima – 5 A; Potência nominal – 1.2 kVA; Velocidade – 1800 rpm.

Na Figura 36 temos os tempos de iteração do analisador afeto ao motor A representado por a), e o tempo de iteração do analisador conectado ao emulador eólico representado por b). Os tempos de iteração são similares situando-se por volta dos 0.215 s, sendo que na situação b) apresenta mais variações.

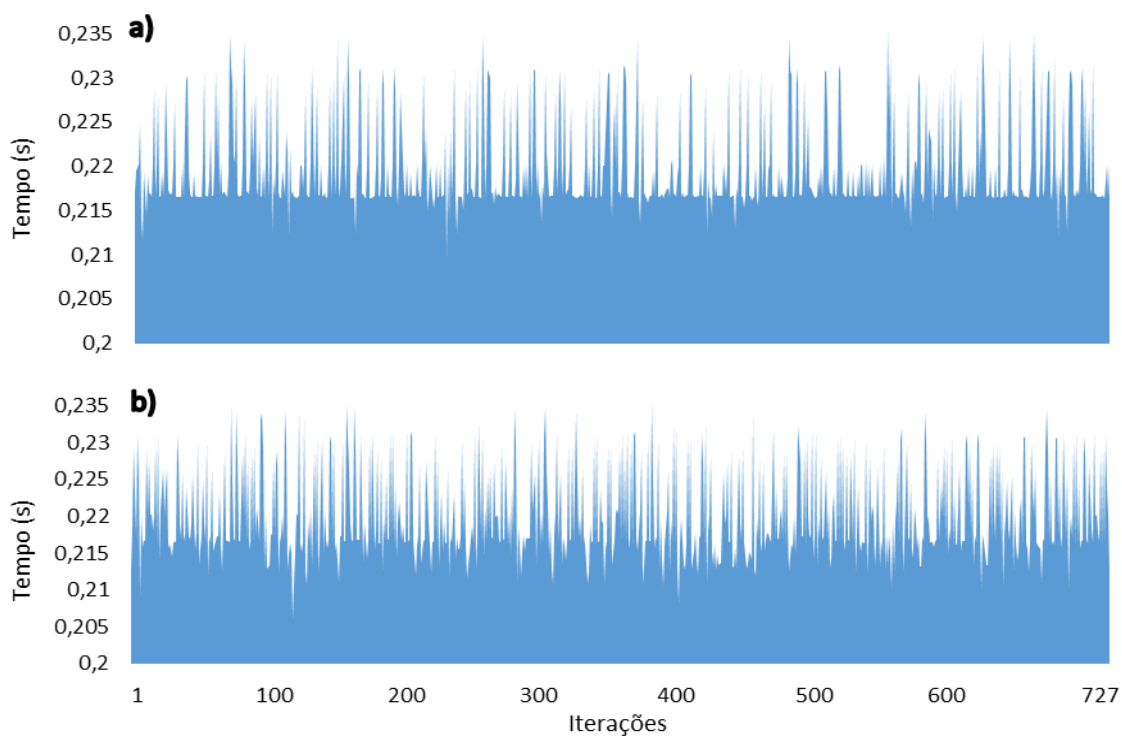


Figura 36: Tempo de cada iteração no motor A e na produção eólica.

Este caso de estudo mostra-se muito útil para representar uma situação real em que coexistam as três componentes referidas, carga, produção e *backup* (rede elétrica).

## 5.5 Conclusões

Após a realização de todos os casos de estudo apresentados, é possível que concluir que não há um algoritmo ideal; é necessário avaliar, para cada situação, o que melhor se adapta. A versão 2 do algoritmo, maioritariamente usada nos casos de estudo apresentados, apresenta grandes vantagens comparativamente à versão 3. Por exemplo um menor *sampling time*, importante caso o objetivo seja recolher o maior número de medições. Ao Invés da versão 2, a versão 3 apresenta um *sampling time* superior. No entanto a causa disso (desenho a cada iteração) fornece-lhe uma vantagem, como está a cada iteração a atualizar os gráficos permite-nos acompanhar o que está a acontecer em tempo real.

Nos casos de estudo apresentados, principalmente no caso de estudo 4, a versão 2 apresenta vantagens quando comparado com a versão 3, pois permite um maior número de dados para o mesmo tempo de simulação. Como a análise é feita mais tarde, a versão 3 não nos traria qualquer vantagem, apenas nos iria fornecer um menor volume de medições.



## 6 Conclusões

Os sistemas elétricos de energia estão em constante atualização e, na atualidade as diferenças verificadas são significativas. A inclusão de recursos distribuídos e o aumento da preocupação ambiental obrigou a mudanças relevantes. O conceito das *Smart Grids*, foi uma das grandes novidades. Com o desenvolvimento das *Smart Grids*, surgem então novos conceitos, como *Load Control* e *Demand Response*, que se mostraram imponentes para uma melhor gestão de energia. O grande ponto de mudança iniciado pela introdução deste novo sistema de distribuição é a partilha de informação entre produtores e consumidor final. Esta comunicação permite uma adaptação da produção de energia direcionada para as necessidades do consumidor. A validação de modelos computacionais que incluam o controlo de recursos distribuídos é, portanto, necessária para uma efetiva aplicação deste conceito.

Este trabalho pretendeu avaliar o impacto de cargas elétricas, nomeadamente motores assíncronos no âmbito de programas de *demand response*. Sendo o motor uma carga importante no quadro de consumo atual nos sistemas elétricos foi importante modelar consumos e avaliar o impacto num sistema elétrico.

Os principais objetivos foram: a instalação dos equipamentos, onde se inclui parametrização do VISIREAL, projeção e instalação dos analisadores, entre outros; O desenvolvimento de um algoritmo que permitisse recolha de dados do analisador, com especial atenção ao *sampling time* e o tempo de processamento necessários para a extração de dados e visualização dos mesmos; Uso de equipamento laboratorial, particularmente a utilização do motor como carga e a integração de um emulador eólico de modo a incluir a produção distribuída no sistema e avaliar o seu efeito.

Tendo em conta os objetivos referidos é importante notar que, ao longo da dissertação, foram utilizados diversos equipamentos, entre eles o GRANMECA e DIGIWATT, através dos quais é possível ter uma projeção de sinais mecânicos e elétricos que, com a ajuda do software VISIREAL nos dão acesso à informação desejada em computadores. Este software necessita de uma correta parametrização de modo a que a instalação e a conexão de todos os equipamentos sejam efetuadas e testadas antes do início da análise de dados. Numa fase posterior houve o desenvolvimento de um algoritmo que permitisse a comunicação dos analisadores com o motor, considerando os pontos já referidos.

Uma parte importante desta dissertação foi a realização dos casos de estudo. Aqui foi utilizado um motor como carga. Além da carga, a utilização de produção distribuída é outro fator extremamente importante na aplicação do conceito das *Smart Grids*. Este tipo de produção foi representado pelo emulador eólico. Assim como este emulador, o motor necessitou também de testes prévios para verificação do estado de funcionamento. As avaliações ao motor foram propostas pelo fabricante, e consistiram nos ensaios do motor em funcionamento e posterior comparação com valores teóricos. Os testes foram realizados fazendo a variação da frequência de modo alterar a velocidade e avaliação do motor em funcionamento com diferentes valores de corrente. Os resultados destes testes foram expostos no Anexo B – Testes ao motor do manual do equipamento).

Importa realçar o desenvolvimento do algoritmo para comunicação do motor com o analisador de energia, sendo que este tem três versões distintas. As principais diferenças entre elas são o número de analisadores a que pedimos medições e o momento em que há tradução e desenho dos gráficos, que pode ser iteração a iteração ou apenas no final. Durante o seu desenvolvimento houve algumas dificuldades, entre elas, perceber a necessidade da pausa para resposta por parte do analisador, visto que o analisador não conseguia dar resposta a um grande número de medições pedidas. Outro fator de estudo foi o *sampling time*. Inicialmente era utilizada uma pausa no final da iteração para acertar o tempo para o valor definido inicialmente (nunca superior ao tempo de comunicação e tempo de tradução e desenho, caso fosse o caso). No entanto mais tarde definiu-se que iríamos recolher o maior número de dados num determinado tempo de simulação, assim logo que termina uma iteração dá-se início à seguinte até que o critério de paragem seja atingido.

Após verificação do correto funcionamento quer do motor quer de todo o equipamento de análise foram então realizados diversos casos de estudo, divididos em quatro situações distintas, tendo em conta as três diferentes versões do algoritmo.

O primeiro caso de estudo focou-se nos arranques do motor do motor A, utilizando a versão 2 do algoritmo. Foram testados arranques em vazio e em potência nominal para testar o seu comportamento. O segundo caso de estudo, também ele elaborado utilizando o motor A e a versão 2 do algoritmo, teve como objetivo perceber o impacto da variação da velocidade e do binário. O terceiro caso de estudo serviu para testar a versão 2 e 3 do algoritmo, a versão 2 que traduz e desenha apenas no fim de todas as iterações as medições recebidas e a versão 3 que traduz e desenha iteração a iteração. O quarto caso de estudo distingue-se pela introdução no sistema de produção distribuída através do emulador eólico.

Utilizando a versão 2 do algoritmo, este caso de estudo permitiu avaliar a capacidade de produção de energia à medida das necessidades da carga.

Após a análise de todos os casos de estudo, conclui-se que não há um algoritmo ideal, é preciso avaliar a cada situação. A versão 2 comparativamente à versão 3 apresenta como grande vantagem um *sampling time* reduzido, o que permite um maior número de medições. No entanto, este não permite a visualização das medições em tempo real, capacidade que a versão 3 apresenta. Nos casos de estudo apresentados, a versão 2 apresenta vantagens quando comparada com a versão 3, pois permite um maior número de medições para o mesmo tempo de simulação, e tendo em conta a análise posterior dos dados a versão 3 não nos traria qualquer vantagem.

Com esta dissertação foi possível aplicar à parte prática os conhecimentos de montagem de circuitos elétricos e de programação de equipamentos adquiridos ao longo dos dois anos do mestrado de sistemas elétricos de energia. Além disso, foram consolidados conceitos do *software* de programação MATLAB® e ainda a introdução de novas conceções, nomeadamente os protocolos de comunicação (*Modbus* e TCP/IP).

Como qualquer trabalho prático, alguns pontos não correram como seria de esperar, e a limitação do tempo foi um deles. Uma das coisas que poderia contribuir para o enriquecimento da dissertação seria a elaboração destes casos de estudo na plataforma OPAL. Para melhoramento dos estudos práticos, a utilização adicional dos motores B e C ter-se-ia mostrado como uma mais valia, uma vez que permitiria uma análise de dados mais diversificada.

Importa realçar a plataforma utilizada, que permite um compromisso entre os meios de simulação e emulação de forma a otimizar o investimento necessário para validar diferentes cenários de operação. Sem esta plataforma seria muito mais complicado o desenvolvimento dos casos de estudo, além de que estariam mais longe da realidade.



## Bibliografia

- [1] H. Gabriel and V. Morais, “Gestão de Recursos Energéticos nas SmartGrids,” 2010.
- [2] International Energy Agency, “Resources to Reserve 2013,” *New Dir. Youth Dev.*, vol. 2013, no. 140, pp. 5–8, 2013.
- [3] IEA, OECD, and World Bank Group, “The Scope of Fossil Fuel Subsidies in 2009 and a Roadmap for Phasing Out Fossil Fuel Subsidies,” *Jt. Rep. Prep. G20 Summit Seoul (Republic Korea), 11-12 Novemb. 2010*, 2010.
- [4] S. Ali, R. Ahmad, and D. Kim, “A study of pricing policy for demand response of home appliances in smart grid based on M2M,” *Proc. - 10th Int. Conf. Front. Inf. Technol. FIT 2012*, pp. 231–236, 2012.
- [5] K. De Craemer and G. Deconinck, “Analysis of State-of-the-art Smart Metering Communication Standards,” *Proc. 5th Young Res. Symp.*, pp. 1–6, 2010.
- [6] S. Ghosh, X. A. Sun, and X. Zhang, “Consumer profiling for demand response programs in smart grids,” *2012 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT Asia 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [7] S. H. Li, D. Zhang, a B. Roget, and Z. O’Neill, “Integrating Home Energy Simulation and Dynamic Electricity Price for Demand Response Study,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 779–788, 2014.
- [8] P. Faria, Z. Vale, and J. Baptista, “Demand response programs design and use considering intensive penetration of distributed generation,” *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 6230–6246, 2015.
- [9] P. Faria, “Demand Response in future power systems management—A conceptual framework and simulation tool,” 2011.
- [10] S. M. Hakimi and S. M. Moghaddas-Tafreshi, “Optimal Planning of a Smart Microgrid Including Demand Response and Intermittent Renewable Energy Resources,” vol. 5, no. 6, pp. 2889–2900, 2014.
- [11] J. Gustedt, E. Jeannot, and M. Quinson, “Experimental Methodologies for Large-Scale Systems : a Survey,” 2009.
- [12] Y. H. Wang and I. C. Wu, “Achieving high and consistent rendering performance of java AWT/Swing on multiple platforms,” *Softw. - Pract. Exp.*, vol. 39, no. 7, pp. 701–736, 2009.
- [13] P. Sandholdt, E. Ritchie, J. K. Pedersen, and R. E. Betz, “A dynamometer performing dynamical emulation of loads with nonlinear friction,” *Proc. IEEE Int. Symp. Ind.*

- Electron.*, vol. 2, pp. 873–878, 1996.
- [14] B. Hassania, P. Sicard, and A. Ba-razzouk, “Solutions to Typical Motor Load Emulation Control Problems,” 2002.
- [15] K. Kyslan, E. Kusnir, V. Fedak, M. Lacko, and F. Durovsky, “Dynamic emulation of mechanical loads with backlash based on rapid control prototyping,” *16th Int. Power Electron. Motion Control Conf. Expo. PEMC 2014*, pp. 1209–1215, 2014.
- [16] T. Khalifa, K. Naik, and A. Nayak, “A survey of communication protocols for automatic meter reading applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 13, no. 2, pp. 168–182, 2011.
- [17] D. U. Campos-Delgado, D. R. Espinoza-Trejo, and E. Palacios, “Closed-loop torque control of an absorbing dynamometer for a motor test-bed,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, no. October 2016, pp. 2113–2118, 2007.
- [18] J. Wang, “Versatile Three-Phase Power Electronics Converter based Real-time Load Emulators,” 2015.
- [19] A. Francisco, *Motores Eléctricos*, 3<sup>o</sup> edição. 2009.
- [20] Departamento de Engenharia Eletrotécnica do ISEP, “Neutro à terra,” 2015.
- [21] J. António and B. Carvalho, “Departamento de Engenharia Electrotécnica Máquinas Assíncronas de Indução.”
- [22] Langlois, “Rotary machines 1500W RANGE - 1500rpm 3-PHASE ASYNCHRONOUS CAGE MOTOR POLYEXCITATION COMPOUND DC GENERATOR.”
- [23] A. M. S. Francisco, “Motores de Indução Trifásicos.” 2006.
- [24] P. S. Melo, “Licenciatura em Engenharia Electrotécnica – SEE Máquinas Eléctricas 2,” 2014.
- [25] Indusmelec, “Variação de velocidade.”
- [26] L. I. Systems, “SV-IG5A User Manual.”
- [27] S. Electric, “Product data sheet-ATV312HU40M3,” pp. 1–3, 2013.
- [28] DAI NAM, “Inverter ls ig5a SV008IG5A-4.” [Online]. Available: <https://diendainam.com/en/inverters-ig5a-3-phase-380v/13-inverter-ls-sv008ig5a-4.html>.
- [29] Inverter Drive, “LS Starvert iG5A- SV00015IG5A - 1.5kW 400V.” [Online]. Available: <https://inverterdrive.com/group/AC-Inverter-Drives-400V/LS-Starvert-Inverter-1500W-400V-SV015iG5A-4/>.
- [30] Langlois, “User’s Manual Mechanical Values Sensor.”

- [31] D. Schrand, “The Basics of Torque Measurement,” *Sens. Dev. Inc.*, p. 3, 2012.
- [32] Langlois, “User’s Manual DC Tachogenerator,” pp. 2–5.
- [33] Langlois, “User’s Manual Magnetic Powder Brake.”
- [34] “Home | Leermiddelen.” [Online]. Available: <http://www.leermiddelen.be/>. [Accessed: 20-May-2016].
- [35] Langlois, “User’s Manual Digiwatt.”
- [36] Langlois, “User’s Manual Granmeca.”
- [37] Langlois, “User’s Manual Visireal.”
- [38] Janitza, “Manual Power Analyser Umg 604.”
- [39] Janitza, “Manual Power Analyser Umg 103.”
- [40] OPAL-RT TECHNOLOGIES, “Introducing the OP5600 Family, OPAL-RT’s Real-Time Digital Simulators,” 2016. [Online]. Available: <http://www.opal-rt.com/product/op5600-hil-hardware-in-the-loop-computer-and-io-system>. [Accessed: 05-Sep-2016].
- [41] ISA, “Programmable logic controllers: Hardware, software architecture.” [Online]. Available: <https://www.isa.org/standards-publications/isa-publications/intech-magazine/2010/december/automation-basics-programmable-logic-controllers-hardware-software-architecture/>. [Accessed: 20-Sep-2016].
- [42] PLCdev, “Definition of a PLC.”
- [43] Simply Modbus, “Modbus TCP/IP,” 2015. [Online]. Available: <http://www.simplymodbus.ca/TCP.htm>.
- [44] Modbus-IDA, “MODBUS MESSAGING ON TCP/IP IMPLEMENTATION GUIDE V1.0b,” 2006.
- [45] Qenergia, “Transformadores de Corrente.” .



# Anexos

## Anexo A – Lista de endereços do analisador de energia

Tabela A1:Lista de endereços do analisador de energia.

### Address List

Frequently required readings

Address	Format	Designation	Unit	Remarks
19000	float	_G_ULN[0]	V	Voltage L1-N
19002	float	_G_ULN[1]	V	Voltage L2-N
19004	float	_G_ULN[2]	V	Voltage L3-N
19006	float	_G_ULL[0]	V	Voltage L1-L2
19008	float	_G_ULL[1]	V	Voltage L2-L3
19010	float	_G_ULL[2]	V	Voltage L3-L1
19012	float	_G_ILN[0]	A	Apparent current, L1-N
19014	float	_G_ILN[1]	A	Apparent current, L2-N
19016	float	_G_ILN[2]	A	Apparent current, L3-N
19018	float	_G_I_SUM3	A	Vector sum; IN=I1+I2+I3
19020	float	_G_PLN[0]	W	Real power L1-N
19022	float	_G_PLN[1]	W	Real power L2-N
19024	float	_G_PLN[2]	W	Real power L3-N
19026	float	_G_P_SUM3	W	Psum3=P1+P2+P3
19028	float	_G_SLN[0]	VA	Apparent power L1-N
19030	float	_G_SLN[1]	VA	Apparent power L2-N
19032	float	_G_SLN[2]	VA	Apparent power L3-N
19034	float	_G_S_SUM3	VA	Sum; Ssum3=S1+S2+S3
19036	float	_G_QLN[0]	var	Reactive power L1 (fundamental comp.)
19038	float	_G_QLN[1]	var	Reactive power L2 (fundamental comp.)
19040	float	_G_QLN[2]	var	Reactive power L3 (fundamental comp.)
19042	float	_G_Q_SUM3	var	Qsum3=Q1+Q2+Q3 (fundamental comp.)
19044	float	_G_COS_PHI[0]	-	CosPhi; UL1 IL1 (fundamental comp.)
19046	float	_G_COS_PHI[1]	-	CosPhi; UL2 IL2 (fundamental comp.)
19048	float	_G_COS_PHI[2]	-	CosPhi; UL3 IL3 (fundamental comp.)
19050	float	_G_FREQ	Hz	Measured frequency
19052	float	_G_PHASE_SEQ	-	Rotation field; 1=right, 0=none, -1=left
19054	float	_G_WH[0]	Wh	Real energy L1
19056	float	_G_WH[1]	Wh	Real energy L2
19058	float	_G_WH[2]	Wh	Real energy L3
19060	float	_G_WH_SUML13	Wh	Real energy L1..L3
19062	float	_G_WH_V[0]	Wh	Real energy L1, consumed
19064	float	_G_WH_V[1]	Wh	Real energy L2, consumed
19066	float	_G_WH_V[2]	Wh	Real energy L3, consumed
19068	float	_G_WH_V_HT_SUML13	Wh	Real energy L1..L3, consumed, rate 1
19070	float	_G_WH_Z[0]	Wh	Real energy L1, delivered
19072	float	_G_WH_Z[1]	Wh	Real energy L2, delivered
19074	float	_G_WH_Z[2]	Wh	Real energy L3, delivered
19076	float	_G_WH_Z_SUML13	Wh	Real energy L1..L3, delivered
19078	float	_G_WH_S[0]	VAh	Apparent energy L1
19080	float	_G_WH_S[1]	VAh	Apparent energy L2
19082	float	_G_WH_S[2]	VAh	Apparent energy L3
19084	float	_G_WH_S_SUML13	VAh	Apparent energy L1..L3
19086	float	_G_QH[0]	varh	Reactive energy L1 (fundamental comp.)
19088	float	_G_QH[1]	varh	Reactive energy L2 (fundamental comp.)
19090	float	_G_QH[2]	varh	Reactive energy L3 (fundamental comp.)
19092	float	_G_QH_SUML13	varh	Reactive energy L1..L3 (fundamental comp.)
19094	float	_G_IQH[0]	varh	Reactive energy, inductive, L1 (fundamental comp.)
19096	float	_G_IQH[1]	varh	Reactive energy, inductive, L2 (fundamental comp.)
19098	float	_G_IQH[2]	varh	Reactive energy, inductive, L3 (fundamental comp.)
19100	float	_G_IQH_SUML13	varh	Reactive energy L1..L3, ind. (fundamental comp.)
19102	float	_G_CQH[0]	varh	Reactive energy, capacitive, L1 (fundamental comp.)
19104	float	_G_CQH[1]	varh	Reactive energy, capacitive, L2 (fundamental comp.)
19106	float	_G_CQH[2]	varh	Reactive energy, capacitive, L3 (fundamental comp.)
19108	float	_G_CQH_SUML13	varh	Reactive energy L1..L3, cap. (fundamental comp.)

## Anexo B – Testes ao motor do manual do equipamento

Tabela B1: Testes da velocidade do motor com a variação da frequência.

frequência (Hz)	0	10	20	30	40	50
velocidade medida (rpm)	0	303	602	899	1197	1498
velocidade teórica (rpm)	0	300	600	900	1200	1500

Tabela B2: Testes do motor com variação da corrente.

I (A)	Pa (W)	n (rpm)	Pu (W)	$\Gamma_u$ (Nm)	Cos $\phi$	S (VA)	Q (Vars)
1,7	500	1498	0	0	0.42	1178	1066
2,4	702	1500	533	3.4	0.42	1663	1507
3,1	998	1504	785	5.0	0.46	2148	1902
3,8	1450	1505	1241	7.9	0.55	2633	2197
4,4	1800	1507	1593	10.1	0.59	3048	2460
5,1	2000	1513	1680	10.6	0.57	3533	2913
5,7	2501	1519	2220	14.0	0.63	3949	3056
6,6	2800	1521	2507	15.7	0.61	4573	3615
7,0	3002	1523	2670	16.8	0.62	4850	3809

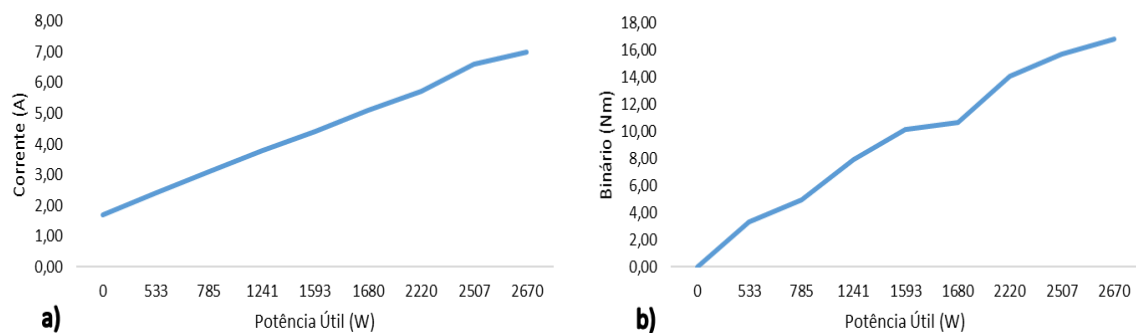


Figura B1: Teste do motor com variação da corrente. a) Corrente em função da potência útil; b) binário em função da potência útil.