



Modelação de Cargas Eléctricas Aplicando o Conceito "Power Hardware-In-The-Loop"

JORGE ANDRÉ MÓNICO LOBÃO

Outubro de 2020

MODELAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS APLICANDO O CONCEITO "POWER HARDWARE-IN-THE-LOOP"

Jorge André Mónico Lobão



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Unidade Curricular de DSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica –
Sistemas Elétricos de Energia

Jorge André Mónico Lobão, Nº 1150406, 1150406@isep.ipp.pt

Orientação científica: Pedro Faria, PNF@isep.ipp.pt

Orientação no GECAD: Omid Abrishambaf, ombaf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Agradecimentos

Agradeço a formação prestada pelo ISEP e o que tudo isso representa.

Agradeço à minha família, por todo o apoio prestado ao longo de todo o meu percurso académico.

Agradeço ao Pedro Faria e ao Omid Abrishambaf pela disponibilidade com que me direcionaram e acompanharam neste trabalho.

Agradeço a todos os amigos que me acompanharam na minha jornada da vida académica.

Resumo

O aumento da utilização de recursos energéticos distribuídos nas redes elétricas está a alterar o paradigma de operação do sistema elétrico de energia. Os sistemas descentralizados têm um papel importante na modernização das redes elétricas, devido à possibilidade de se tomarem decisões inteligentes. O uso de novos paradigmas, como programas de *demand response* e de aparelhos eletrônicos inteligentes são necessários para que os sistemas descentralizados funcionem da maneira mais eficiente possível.

O trabalho desta dissertação implementa em laboratório o conceito *Power Hardware-In-The-Loop* (PHIL), com o intuito de modelar cargas elétricas através da comparação dos valores obtidos na simulação com os valores medidos nos componentes reais. Este conceito, permite controlar as condições da alimentação de energia elétrica do sistema, permitindo melhorar os modelos computacionais. Durante a simulação, o simulador digital de tempo real controla o amplificador de potência e outros equipamentos laboratoriais, com o propósito de fornecer resultados reais para a modelação de diversas cargas, sob diferentes variações de tensão e de frequência. No caso de estudo, o amplificador de potência é usado como fonte de alimentação das cargas elétricas testadas.

Os resultados adquiridos foram analisados individualmente para cada carga elétrica do caso de estudo. Com esses mesmos resultados foram criadas relações matemáticas, com o propósito de calcular os erros de cada nível de consumo e os erros do conjunto de todos os níveis consumo, para no fim serem comparados. O mesmo processo foi realizado para os níveis de frequência a que as cargas foram sujeitas.

Palavras-Chave

Simulação em Tempo Real, *Power-Hardware-In-The-Loop*, Modelação de Cargas Elétricas

Abstract

The expansion in the use of energy resources distributed in electrical networks is changing the operating paradigm of the electrical energy system. Decentralized systems play an important role in modernizing of electrical networks, due to the possibility of making smart decisions. The use of new paradigms, such as demand response programs and smart electronic devices are necessary for decentralized systems to function in the most efficient way possible.

The work of this dissertation implements in the laboratory the Power Hardware-In-The-Loop (PHIL) concept, in order to model electrical loads, by comparing the values obtained in the simulation with the values measured in the real components. This concept allows to control the conditions of the electric power supply to each of the components, allowing to improve the computational models. During the simulation, the digital real-time simulator controls the power amplifier and other laboratory equipment, with the purpose of providing real results for the modelling of different loads, under different variations of voltage and frequency. In the case study, the power amplifier is used as a power source for the tested electrical loads.

The acquired results were analysed individually for each electrical load of the case study. With these same results, mathematical relations were created, with the purpose of calculating the errors of each consumption level and the errors of the set of all consumption levels, to be compared in the end. The same process was carried out for the frequency levels to which the loads were subjected.

Keywords

Real-Time Simulation, Power Hardware-In-The-Loop, Electrical Load Modelling,

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	4
1.3.CALENDARIZAÇÃO.....	4
1.4.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	5
2. SIMULADOR DIGITAL DE TEMPO REAL	7
2.1.EVOLUÇÃO	7
2.2.TIPOS DE SIMULAÇÃO	9
2.3.CONCLUSÕES	16
3. METODOLOGIA	17
3.1.ARQUITETURA	17
3.2.IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO LABORATÓRIO	19
3.3.CONCLUSÕES	23
4. CASOS DE ESTUDO	25
4.1.CARGA ELÉTRICA 1 – 8kW	26
4.2.CARGA ELÉTRICA 2 – 4kW	27
4.3.CARGA ELÉTRICA 3 – 30kW	28
4.4.CARGA ELÉTRICA 4 – MOTORES DE INDUÇÃO	30
4.5.CONCLUSÕES	31
5. RESULTADOS	33
5.1.CARGA ELÉTRICA 1 – 8kW	34

5.2.CARGA ELÉTRICA 2 – 4kW	39
5.3.CARGA ELÉTRICA 3 – 30kW	41
5.4.CARGA ELÉTRICA 4 – MOTORES DE INDUÇÃO.....	45
5.5.CONCLUSÕES.....	49
6. CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução da tecnologia de simuladores [18].	8
Figura 2 - Efeito do <i>sample time</i> na precisão dos resultados [21].	10
Figura 3 - Arquitetura do método RCP [25].	11
Figura 4 - Arquitetura do método HIL [26].	12
Figura 5 - Arquitetura do método SIL [30].	13
Figura 6 - Arquitetura do método PHIL [33].	13
Figura 7 - Simulador <i>OP5600-OPAL-RT</i> [41].	15
Figura 8 - Vista frontal do amplificador de potência.	16
Figura 9 - Conceito geral do modelo desenvolvido.	18
Figura 10 - Diagrama de etapas do modelo.	19
Figura 11 – Subsistemas do modelo.	20
Figura 12 –Interior dos subsistemas do modelo.	20
Figura 13 - Vista traseira do amplificador de potência.	21
Figura 14 - Arquitetura do sistema implementado no laboratório.	22
Figura 15 - Linha de tempo da transmissão de dados do sistema.	23
Figura 16 - Carga resistiva de 8kW.	27
Figura 17 - Cargas resistivas de 4kW.	27
Figura 18 - Níveis de consumo ligados para a carga elétrica 2.	28
Figura 19 - Carga resistiva de 30kW.	29
Figura 20 - Níveis de consumo ligados para a carga elétrica 3.	30
Figura 21 - Bancada com os motores de indução.	31
Figura 22 - Comportamentos da potência total consumida, para a carga elétrica 1.	35
Figura 23 - Erros para a carga elétrica 1, variando o nível de consumo.	36
Figura 24 - Erros para a carga elétrica 1, variando o nível de frequência.	38

Figura 25 - Comportamento da potência total consumida, para a carga eléctrica 2.	39
Figura 26 - Erros calculados para a carga eléctrica 2.	40
Figura 27 - Comportamentos da potência total consumida, para a carga eléctrica 3.	43
Figura 28 - Erros para a carga eléctrica 3, variando o nível de consumo.	44
Figura 29 - Erros para a carga eléctrica 3, variando o nível de frequência.	45
Figura 30 - Comportamentos da potência total consumida, para a carga eléctrica 4.	46
Figura 31 - Erros para a carga eléctrica 4, variando o motor.	48
Figura 32 - Erros para a carga eléctrica 4, variando o nível de frequência.	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores dos parâmetros enviados para o amplificador.	26
Tabela 2 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 1.	34
Tabela 3 – Relações matemáticas para a carga elétrica 1.	37
Tabela 4 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 2.	39
Tabela 5 - Relações matemáticas para a carga elétrica 2.	40
Tabela 6 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 3.	41
Tabela 7 - Relações matemáticas para a carga elétrica 3.	42
Tabela 8 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 4.	45
Tabela 9 - Relações matemáticas para a carga elétrica 4.	47

Acrónimos

COTS	–	Commercial-Off-The-Shelf
RED	–	Recursos Energéticos Distribuídos
DR	–	Demand Response
EMT	–	Eletromagnético Transitório
FPGA	–	Field Programmable Gate Arrays
HIL	–	Hardware-In-The-Loop
PHIL	–	Power Hardware-In-The-Loop
RCP	–	Rapid Control Prototyping
RTDS	–	Simulador Digital de Tempo Real
SCADA		Supervisory Control and Data Acquisition
SIL	–	Software-In-Loop
TS	–	Estabilidade Transitória

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza o trabalho desenvolvido nesta dissertação e o seu objetivo. É apresentada também a sua calendarização e organização desenvolvida na escrita da dissertação.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os sistemas elétricos de energia, de uma forma geral, são o conjunto de vários equipamentos com o objetivo de produzir energia elétrica, onde através de linhas de transmissão é possível transmiti-la para alimentar as cargas dos consumidores com máximo de qualidade ao menor custo, de tal forma a que a continuidade do serviço não seja posta em causa. A rede de energia elétrica, foi durante muitas décadas, constituída por sistemas centralizados de energia, servidos por produtores de grande escala e por redes de transmissão e de distribuição. O aumento da penetração de recursos energéticos distribuídos (REDs) para as redes elétricas provocou a alteração dos sistemas centralizados para sistemas descentralizados com REDs de pequena escala, tais como as *smartgrids* e as *microgrids* [1].

Smartgrids são plataformas de tecnologia inteligente que surgiram com o objetivo de modernizar a rede elétrica, através da capacidade de monitorização, otimização e controlo de forma autónoma e automática dos fluxos de fornecimento de energia na rede elétrica, ajustando a alimentação conforme as variações registadas na procura e oferta de energia elétrica. Asseguram também a manutenção da rede elétrica, bem como a gestão dos

equipamentos e instalações [2]. Através do uso de sensores que avaliam o funcionamento da rede, equilibrando as cargas e prevenindo avarias, as *smartgrids* conseguem disponibilizar aos fornecedores e consumidores, informações acerca do consumo em tempo real, resultando na poupança de energia, redução de custos e aumento da eficiência e fiabilidade da rede. Para que uma *smartgrid* funcione de forma eficaz, necessita que exista uma harmonização da indústria energética com os sistemas de informação e comunicação. Os sistemas de telecomunicação devem assegurar de forma segura e eficiente a integração dos vários equipamentos das *smartgrids*, nomeadamente os contadores inteligentes (*smart meters*), a gestão ativa da procura (*demand response programs*), a geração de energia distribuída, a gestão automática da rede e a mobilidade eléctrica [3]. No artigo [4], os autores propõem um modelo estocástico para resolver problemas acerca do escalonamento de recursos energéticos de agregadores numa *smartgrid*. A ideia foi enfrentar adversidades em relação à variedade da procura de energia, desafios trazidos pelos veículos eléctricos, pelos recursos renováveis e pelas variações dos preços do mercado de energia, enquanto minimizam o custo total das operações.

As *microgrids* podem ser descritas como o conjunto de cargas, de unidades de geração distribuída e de sistemas de armazenamento de energia, que funcionam de forma coordenada com o objetivo de fornecer energia com melhor qualidade e mais fiável, estando conectada à rede eléctrica principal, no nível de distribuição, num único ponto de conexão (*Point of Common Coupling*). A adoção deste tipo de rede, como paradigma da integração em massa de geração distribuída, permite solucionar os problemas técnicos ligados à descentralização da energia, reduzindo a necessidade de uma centralização complexa e extremamente ramificada da energia. Atualmente, as *microgrids* emergiram como uma forma promissora de organizar e coordenar a implementação e funcionamento dos recursos distribuídos de energia. Os consumidores estão cada vez mais motivados na adoção de recursos distribuídos de energia, porque deste modo é possível aumentar a sua autonomia energética e fiabilidade, enquanto que o preço da energia diminui e reduz o impacto ambiental [5]. Os autores em [6], propõem uma metodologia inovadora para a gestão de recursos distribuídos de energia. Este artigo fornece informações acerca da visão das redes de energia no futuro, focando nos aspetos operacionais e conceptuais das redes eléctricas, caracterizadas pela penetração intensiva de geração distribuída. No âmbito de atingir os objetivos propostos utilizam métodos inteligentes, implementando uma estrutura

computacional que inclui a simulação da rede e do mercado de energia. No artigo [7], os autores apresentam uma nova gestão de energia residencial, com o objetivo de suportar a gestão eficiente de energia dos consumidores no contexto das *microgrids*, obtendo um escalonamento de recursos reais e virtuais.

Para permitir o aumento da flexibilidade nas *smartgrids* e nas *microgrids*, surgiram novas abordagens tecnológicas, sendo uma delas os programas de *Demand Response* (DR). Devido ao benefícios destes programas para alcançar os mercados de energia de forma eficiente e fiável, os programas DR desempenharam um papel importante na evolução das redes inteligentes [8]. Os programas DR estão divididos em dois grupos: um grupo baseado nos incentivos e outro grupo baseado nos preços. O objetivo do grupo baseado nos incentivos é motivar os clientes a alterar o comportamento do consumo, em troca de uma remuneração paga pelo operador de rede. No grupo baseado nos preços, os clientes modificam o seu consumo consoante as variações do preço da energia [9]. Os autores em [10], propõem um modelo de otimização implementando um sistema *Multi Agent* e um sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). O modelo de otimização é baseado na redução de energia dos aparelhos de ar condicionado e dos sistemas de iluminação de um edifício de escritórios, em relação a programas de *demand response* baseado nos preços. No artigo [11], os autores propõem um algoritmo, que integra as estratégias dos programas de *demand response*, para gerir o consumo de um edifício residencial, utilizando um sistema SCADA desenvolvido pelos próprios autores. A gestão de consumo é feita reduzindo ou restringindo o consumo de cargas abaixo de um limite específico de energia.

Nos sistemas descentralizados, os sensores são os aparelhos eletrónicos mais utilizados. Entre os sensores, aquele que tem um papel principal na transição da rede tradicional para uma rede inteligente são os contadores inteligentes. Ao contrário dos contadores tradicionais que identificam e medem a energia consumida, os novos contadores conseguem fornecer uma vasta variedade de funcionalidades [12]. No artigo [13], os autores propõem uma metodologia com o objetivo de prever o consumo das cargas, aplicando um método capaz de melhorar o uso de um sensor que recolhe dados de um edifício específico.

Os simuladores têm sido usados extensivamente no planeamento e na conceção de sistemas elétricos por décadas. Desde o *layout* em larga escala de linhas de transmissão dos sistemas elétricos de energia até à otimização de motores no transporte, a simulação tem desempenhado um papel importante no sucesso do desenvolvimento de muitas aplicações [14]. As máquinas de simulação são ferramentas indispensáveis que os cientistas, engenheiros e muitas outras profissões deveriam usufruir, de forma a poderem estudar problemas do mundo real de uma maneira mais económica, eficaz, eficiente e rápida. Existem no mercado vários simuladores disponíveis, com vários tipos de simulação. A simulação *Power Hardware-In-The-Loop* (PHIL) permite testar vários tipos de equipamentos em circuito fechado, enquanto favorece de uma simulação altamente fiável que fornece uma grande flexibilidade de execução de testes que não são práticos, de uma maneira não destrutiva de um sistema real [15].

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a modelação de cargas elétricas, através de um conjunto de ensaios laboratoriais, aplicando a simulação PHIL e da análise de dados reais adquiridos. Para este propósito, o uso de um amplificador de potência foi utilizado para alimentar várias cargas elétricas de forma a simular diversos consumidores. O núcleo principal do sistema é um simulador digital de tempo real (*OP5600*), que controla o amplificador de potência e todos os outros equipamentos laboratoriais, através de um ambiente de simulação *MATLAB/Simulink*.

Assim, este trabalho tem o propósito de:

- Modelar cargas elétricas através de diversos ensaios laboratoriais utilizando medições reais da tensão e da frequência;
- Desenvolver um modelo, em ambiente *Simulink*, para controlar o sistema;
- Analisar dados adquiridos da simulação e produzir relações matemáticas.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

Esta dissertação apresentou uma duração de aproximadamente 1 ano, tendo sido começada no dia 28 de outubro de 2019 e finalizada no dia 14 de outubro de 2020.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta dissertação é composta por seis capítulos. Depois do capítulo da introdução, onde trabalho é contextualizado, o capítulo 2 descreve a evolução dos simuladores digitais de tempo real e os seus diversos tipos de simulação.

No capítulo 3, é apresentada a metodologia do trabalho desenvolvida, sendo que numa primeira parte é descrita a arquitetura e o conceito da metodologia, enquanto que numa segunda parte são descritos os equipamentos laboratoriais utilizados e as várias etapas da simulação. Os casos de estudo são apresentados no capítulo 4, enquanto que a apresentação e análise de resultados são exibidos no capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta as conclusões mais importantes dos resultados do trabalho desenvolvido, onde são apresentadas algumas sugestões de trabalho para o futuro.

2. SIMULADOR DIGITAL DE TEMPO REAL

Atualmente, apesar da alta tecnologia que é aplicada em várias áreas da indústria e no uso de modelos complexos nas suas aplicações, a simulação tem uma grande influência nos grupos de investigação, onde é aplicada para testar protótipos e obter resultados mais rapidamente. O simulador digital de tempo real (RTDS) permite criar ambientes de simulação que replicam o mundo real, através da resolução de funções matemáticas [16].

2.1. EVOLUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia durante a segunda guerra mundial, permitiu a realização de simulações através de simuladores analógicos, que geravam imprecisões e incertezas. Sendo necessário melhorar a tecnologia de simulação, na década de 70, apareceram duas tecnologias de simulação: simuladores eletromagnéticos transitórios (EMT) e simuladores de estabilidade transitória (TS). Devido às limitações da internet daquela altura, os simuladores EMT e TS não tinham as ferramentas necessárias para facilitar a realização de análises detalhadas de modelos de sistemas de larga escala. Deste modo foram criados

simuladores híbridos, que juntavam as duas tecnologias de simulação EMT e TS [17]. Na figura 1, está ilustrada a evolução da tecnologia dos simuladores.

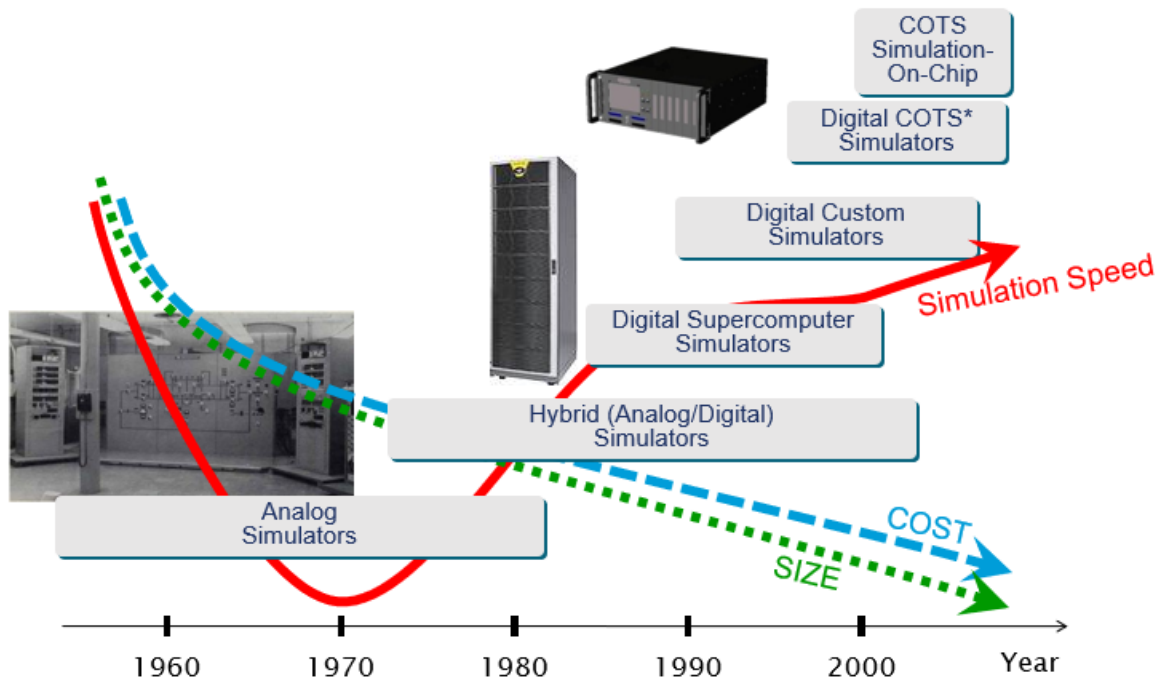


Figura 1 - Evolução da tecnologia de simuladores [18].

Embora os simuladores híbridos tenham tido um papel importante na indústria dos sistemas eléctricos de energia, atualmente a sua utilização é inconveniente devido ao elevado custo de manutenção, à sua dimensão e à exigência de equipas técnicas altamente qualificadas para lidar com os trabalhos mais técnicos. No entanto, com desenvolvimento do microprocessador e do processamento do sinal digital, este tipo de simuladores começaram a ser gradualmente substituídos por simuladores digitais de tempo real [14].

Os simuladores digitais de tempo real com base no processamento do sinal digital foram desenvolvidos através de tecnologia particular de empresas como a *Hydro-Quebec* e *OPAL-RT Technologies* [19]. Estes simuladores foram a primeira geração de novos simuladores a tornarem-se disponíveis comercialmente com destino à utilização industrial e utilização académica. Várias universidades e centros de investigação tentaram desenvolver simuladores digitais de tempo real através de computadores básicos de tecnologia mais económica, com o objetivo de eliminar os custos associados com a utilização de supercomputadores. Tal feito não foi possível devido à falta de velocidade de comunicação entre este tipo de computadores. Contudo através dos processadores *multi-core* e através de componentes de computadores *commercial-off-the-shelf* (COTS)

permitiram o desenvolvimento de simuladores digitais de tempo real com menores dimensões e mais económicos [14]. Deste modo, os simuladores digitais de tempo real equipados com processador *multi-core* garantiam suporte máximo a longo prazo, a manutenção, a capacidade de expansão e a capacidade de atualização.

Os simuladores digitais de tempo real são excelentes exemplos de tecnologia de simulação fiável e precisa. Estes tipos de simuladores, não são só utilizados na realização de simulações complexas na análise de sistemas elétricos de energia, mas também podem ser aplicados em diversas áreas, tais como na aeroespacial, no automóvel, na robótica, na eletrónica de potência, na automatização, entre outros [20]. Além disso, estes simuladores são compatíveis com vários sistemas operativos, tais como o *Linux* e o *Windows*.

2.2. TIPOS DE SIMULAÇÃO

O desafio com que os utilizadores dos simuladores se deparam, é na seleção de um simulador que possa atender as suas necessidades. A capacidade do simulador, o tamanho e o seu custo são determinados por um número de vários critérios. O número de canais de entrada e de saída (I/O) necessários para efetuar a interface do simulador com os controladores físicos é também um aspeto muito importante, que afeta o custo e o desempenho do simulador.

Num sistema com simulador em tempo real, é dado uma quantidade de tempo determinada pelo utilizador aos aparelhos, de forma a ler os sinais de entrada para executar os cálculos necessários, como algoritmos de controlo, e escrever às saídas dos aparelhos a que está conectado. Esta quantidade de tempo é denominada de *sample time* e à medida que este valor diminui, a precisão dos resultados aumenta. Como se pode verificar na figura 2, quando o valor do *sample time* é menor, a precisão do processamento do sinal é muito maior. Assim, o valor do *sample time* e a precisão o sinal são inversamente proporcionais. Executar um modelo complexo com um *sample time* pequeno gera resultados mais precisos e fiáveis, no entanto o simulador necessita de mais tempo de processamento.

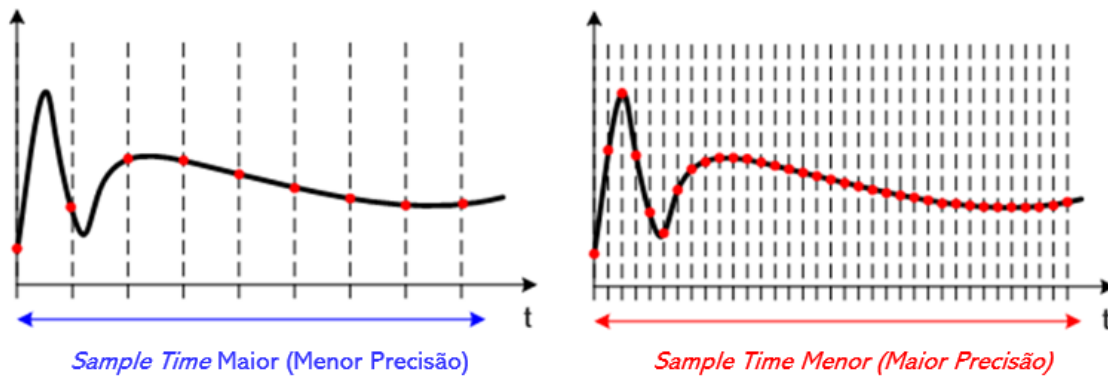


Figura 2 - Efeito do *sample time* na precisão dos resultados [21].

Os simuladores digitais de tempo real, são normalmente utilizados em quatro categorias diferentes de aplicação: aplicações *rapid control prototyping* (RCP), aplicações *Hardware In-The-Loop* (HIL), aplicações *Software-In-The-Loop* (SIL) e aplicações *Power Hardware-In-The-Loop* (PHIL). De seguida, vão ser apresentados os quatro tipos de aplicação.

2.2.1 Rapid Control Prototyping (RCP)

As aplicações RCP são métodos eficazes que fornecem soluções rápidas para protótipo de novas funções de diferentes tipos de processos industriais e aparelhos de controlo com sistemas complexos. Esta abordagem permite testar o desenvolvimento de novas estratégias de controlo e algoritmos em ambientes de simulação. Assim que o projeto do controlador estiver completo e os resultados da simulação forem aceitáveis, o controlador pode ser transformado num protótipo para ser utilizado em tempo real, de forma a poder ser testado o algoritmo em condições de trabalho do mundo real [22].

Os autores em [23], utilizam o método RCP, com o objetivo de testarem um *drive* de um motor síncrono de ímanes permanentes, de forma a que consigam realizar testes com o menor esforço e no menor tempo possível. No artigo [24], os autores apresentam uma sequência de testes, com o objetivo de detetar instabilidades nas válvulas hidráulicas de uma máquina florestal, aplicando o método RCP de forma a reduzir o tempo e o custo dos testes.

A arquitetura do método RCP, está ilustrada na figura 3.

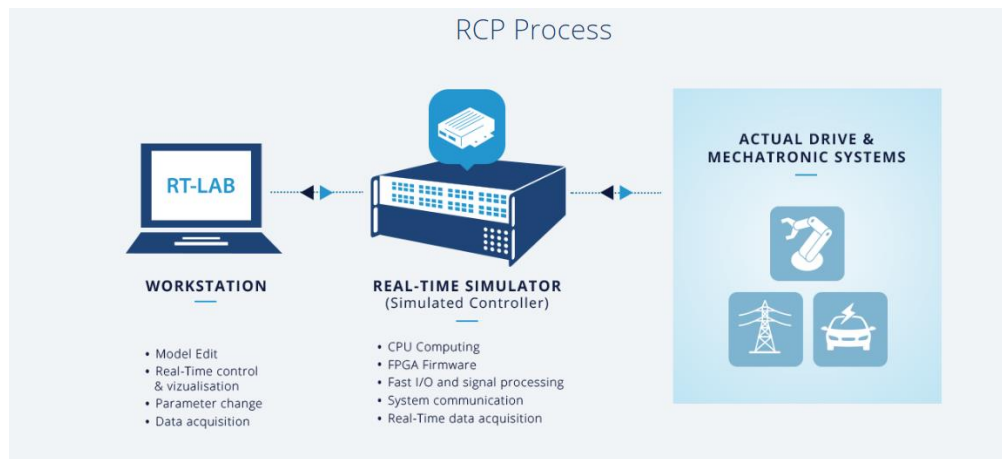


Figura 3 - Arquitetura do método RCP [25].

2.2.2 Hardware In-The-Loop (HIL)

A técnica HIL é uma das técnicas de simulação em tempo real que permite testar sistemas de controlo complexos. Tradicionalmente, os testes dos sistemas de controlo são efetuados diretamente no equipamento físico, tornando os testes mais exatos, porém esta prática é dispendiosa, ineficiente e insegura. Este método é uma excelente alternativa para com os métodos de testes tradicionais, permitindo reduzir o custo associado da simulação, sendo que os equipamentos físicos ficam mais dispendiosos do que os simuladores de tempo real, que permitem reduzir o tempo necessário para testar sistemas embebidos complexos e permite aumentar a segurança na execução de testes em cenários mais perigosos, que de outra forma não seriam possíveis de realizar [26]. Deste modo, é possível executar milhares de cenários possíveis, reproduzindo exatamente o equipamento físico e as suas dinâmicas, em conjunto com sensores e atuadores, providenciando assim testes de circuito fechado sem ser necessário testar em sistemas físicos [26].

Os autores em [27], demonstram que o método HIL possui um papel importante na avaliação de novas estratégias de controlo que são propostas, de forma a que o sistema elétrico de energia possa operar de forma fiável, especialmente ao nível da distribuição. No artigo [28], os autores apresentam um sistema de gestão inteligente de distribuição para as *microgrids*, aplicando o método HIL, com o objetivo de testar as aplicações dos programas de *demand response* de emergência. No artigo [29], os autores utilizam o método HIL, para simular uma *microgrid* conectada a uma larga rede de distribuição. A plataforma de simulação, permitiu aos autores validar tecnicamente a implementação de programas de *demand response*.

A arquitetura do método HIL, está ilustrada na figura 4.

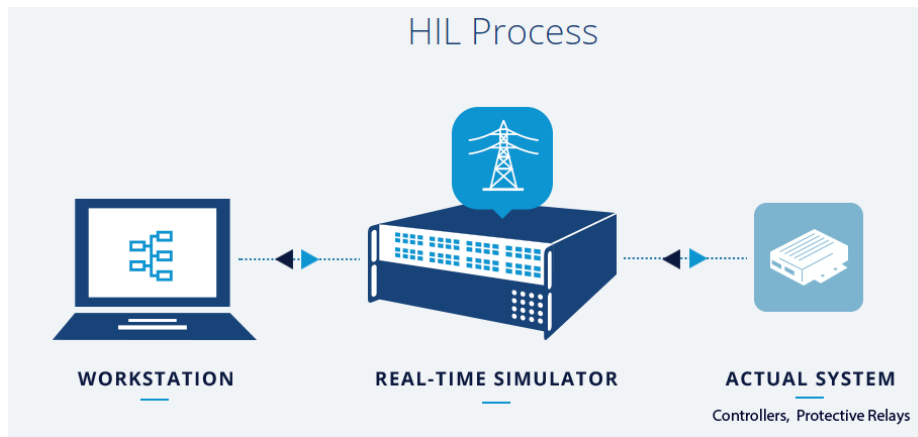


Figura 4 - Arquitetura do método HIL [26].

2.2.3 Software-In-The-Loop (SIL)

A simulação SIL é um método que representa a integração de um código compilado para um modelo de simulação matemático, providenciando os utilizadores com um ambiente de simulação virtual e prático para o desenvolvimento e testes, de estratégias de controlo detalhadas de sistema grandes e complexos. A implementação direta da simulação SIL num ambiente digital, significa que os utilizadores podem realizar mais testes do que com os outros métodos caros e menos seguros. Como não necessita de entradas ou saídas, preserva a integridade do sinal. Este método é um excelente complemento à simulação HIL, pois ajuda a acelerar o tempo de colocação da solução no mercado, garantindo o desenvolvimento eficiente e de alta qualidade do *software* [30].

No artigo [31], os autores aplicaram o método SIL para criarem a estrutura de um veículo em ambiente de simulação, de modo a que qualquer utilizador consiga construir o seu próprio veículo, podendo então testar e comparar vários modelos. Os autores em [32], criam em ambiente SIL um algoritmo de controlo de velocidade de um motor eléctrico de corrente contínua, para depois compararem resultados, com os resultados obtidos aplicando o método HIL.

A arquitetura do método SIL, está apresentada na figura 5.

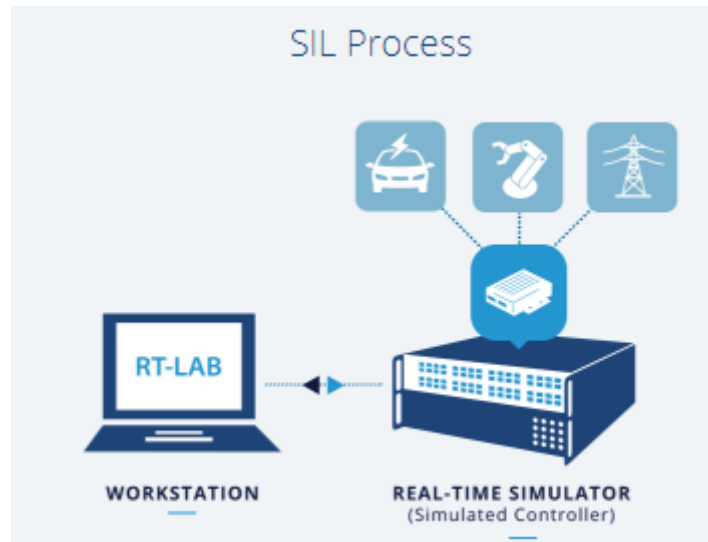


Figura 5 - Arquitetura do método SIL [30].

2.2.4 Power Hardware-In-The-Loop (PHIL)

A simulação PHIL é uma extensão do HIL, no qual o ambiente de simulação de tempo real é capaz de trocar não apenas sinais de baixa tensão e baixa corrente, mas também de potências altas, exigidas pelos dispositivos que se pretendem testar. Deste modo, são inseridos amplificadores de potência, entre os dispositivos, que exigem quantidade elevadas de energia, e o simulador de tempo real a ser utilizado, fornecendo assim, o feedback necessário para fechar o circuito, como se pode verificar na figura 6. Os amplificadores de potência são selecionados pelos utilizadores com base no desempenho em circuito fechado e na capacidade de gerar e absorver energia [15].

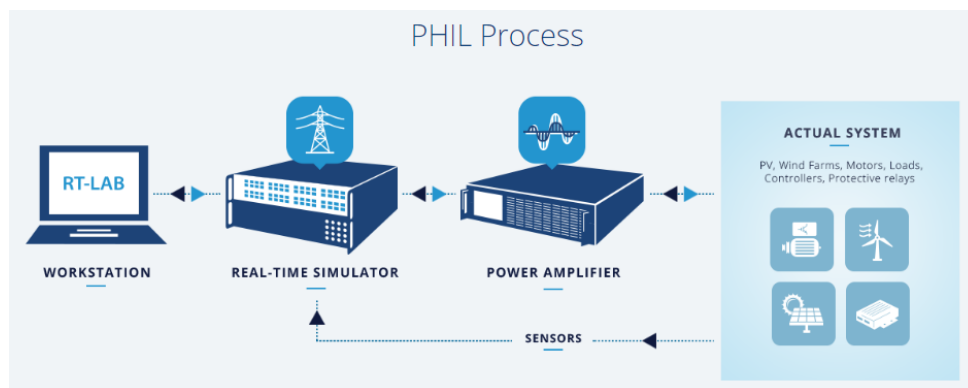


Figura 6 - Arquitetura do método PHIL [33].

Enquanto que a simulação HIL oferece muitos benefícios, a simulação PHIL também permite a simulação de fluxos de quantidades de energia elevadas entre os dispositivos, bem como o circuito elétrico simulado que é executado no simulador. Esta capacidade

permite aos engenheiros testarem vários sistemas, incluindo conversores de energia, geradores, motores e cargas fotovoltaicas, e de tirarem proveito de uma simulação de alta fidelidade que fornece maior flexibilidade e segurança [33].

Existem muitos trabalhos de investigação focados no conceito de simulação PHIL, com o objetivo de simular diversos problemas do mundo real. No artigo [34], os autores utilizam como base de testes a simulação PHIL, para estudar as dinâmicas de uma *microgrid*. Eles demonstram o uso de um amplificador de tensão comercial para imitar um conversor de potência trifásico. Concluíram que este tipo de simulação pode ser usado para o estudo de problemas relacionados com a qualidade e estabilidade da energia de uma *microgrid*. No artigo [35], os autores comparam duas diferentes configurações para avaliar diversos componentes e sistemas em condições de operação sem interrupções. A primeira configuração é através da simulação PHIL e a segunda através de *quasi-dynamic* PHIL (QDPHIL). Os autores em [36], apresentam uma solução económica de testar as capacidades de resposta das unidades geradoras de energia integradas numa *microgrid* isolada, para esse efeito beneficiaram-se da simulação PHIL, para testar a resposta do inversor fotovoltaico perante diversos cenários. No trabalho [37], os autores aproveitaram as vantagens de um sistema PHIL, para comprovar que o uso de um controlador de tensão linear pode melhorar a estabilidade e a precisão, quando comparadas com estratégias de simulação simples de malha aberta. Os autores em [38], desenvolveram uma *microgrid* composta por um gerador fotovoltaico, um sistema de armazenamento e cargas residenciais, onde através de um sistema PHIL testaram a gestão de energia do sistema criado. No artigo [39], os autores utilizaram a simulação PHIL para poderem testar a qualidade de energia e os equipamentos utilizados num sistema de transporte ferroviário urbano, atividade que não é possível realizar no mundo real devido aos riscos a que estão sujeitos. Os autores em [40], criaram modelos de baterias, que através da simulação PHIL validaram os dados reais medidos, de forma a reproduzirem um grande número de testes num curto espaço tempo.

O simulador de tempo real utilizado neste trabalho, foi *OP5600-OPAL-RT*, visualizado na figura 7. O principal *software* do *OP5600* é o *RT-LAB*, onde os modelos de controlo são criados e editados através do *MATLAB/Simulink*.



Figura 7 - Simulador *OP5600-OPAL-RT* [41].

As especificações gerais do *OP5600-OPAL-RT* são [41]:

- *Intel Xenon E5*: seis núcleos, 3.46 GHz;
- Sistema Operativo *Red Hat Linux*;
- *Xilinx Artix-7* FPGA, 200T;
- Possui até 128 entradas e saídas analógicas ou 256 entradas e saídas digitais;
- Comunicação TCP/IP.

As placas de entrada/saída (I/O) analógica e digital estão montadas dentro do *OP5600*. Os utilizadores, dependendo da aplicação que pretendem efetuar, podem escolher o número placas I/O que podem utilizar. As saídas analógicas das placas possuem as seguintes características:

- 16 canais de saída analógica;
- Saída simultânea em todos os canais;
- Programados de forma independente com intervalos desde +/- 100mV até +/- 17V;
- Resolução de saída de 0.01V;
- Proteção contra curto-circuitos;
- Não necessita de alimentação externa.

De igual forma, as placas de saída digitais possuem as seguintes características:

- 32 linhas de saída com condicionamento de sinal;
- Proteção contra curto-circuitos;
- Até +12V ou +5V;
- Necessita de alimentação externa.

Para ser possível configurar estas placas ao interesse do utilizador, o *OP5600* possui um documento que descreve a configuração de instalação dentro do *OP5600*. Este documento possui diagramas *pinout*, a localização de cada canal das placas e dados referentes às configurações dos respetivos blocos do modelo *Simulink*.

O amplificador de potência utilizado para a aplicação do conceito PHIL, foi o PA-3x1000-AB/260V-7.7A/2G da *Puissanceplus*. Este aparelho é um amplificador de potência trifásico com uma capacidade nominal de 3kW, onde a tensão pode ser controlada através da regulação da corrente. O amplificador pode ser utilizado através de dois métodos diferentes: Controlo local ou controlo remoto. Com o controlo local, é possível controlar e ajustar os níveis de tensão através de uma *interface* de utilizador gráfica *touch screen*, posicionado no painel frontal do equipamento, como se pode observar na figura 8. Com o controlo remoto as funcionalidades do amplificador podem ser controladas num computador qualquer, desde que esteja ligado através do protocolo TCP/IP.



Figura 8 - Vista frontal do amplificador de potência.

2.3. CONCLUSÕES

Neste capítulo, foi apresentado uma breve história acerca da evolução do simulador digital de tempo real. Foram também explicados os diferentes tipos de categoria a que os simuladores de tempo real podem ser usados aplicados.

No próximo capítulo irá ser apresentada a metodologia desenvolvida no trabalho desta dissertação.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida no trabalho desta dissertação. Na secção 3.1 irá ser descrito a arquitetura e o conceito da metodologia implementada considerando a abordagem PHIL, enquanto que na secção 3.2 vão ser explicados os equipamentos utilizados e as várias etapas da simulação.

3.1. ARQUITETURA

O modelo proposto está relacionado com a implementação de um conjunto de ensaios laboratoriais, para a recolha de informações acerca do comportamento de diversas cargas elétricas laboratoriais, através da aplicação de um simulador de tempo real e um amplificador de potência. O amplificador de potência permite que o modelo seja uma *microgrid* isolada, pois permite alimentar as cargas, alterando os parâmetros da alimentação que representa a rede elétrica.

O simulador de tempo real é o elemento central do modelo, responsável pelo controlo de todo o sistema durante a simulação. O utilizador, através do software do simulador define os parâmetros de energia desejados e envia-os para o amplificador de potência. O amplificador de potência recebe os parâmetros, e amplifica-os, conseguindo assim funcionar como fonte de alimentação das cargas elétricas a que está conectado. As

condições de alimentação de energia, definidas pelo utilizador, podem ser alteradas com o objetivo de estudar o comportamento de vários consumidores, para vários cenários da rede. Através de um contador inteligente, os dados reais da energia consumida pelas cargas são medidos e são enviados para o simulador, criando um circuito fechado para poderem ser analisados pelo utilizador. A figura 9, ilustra o conceito geral do modelo desenvolvido.

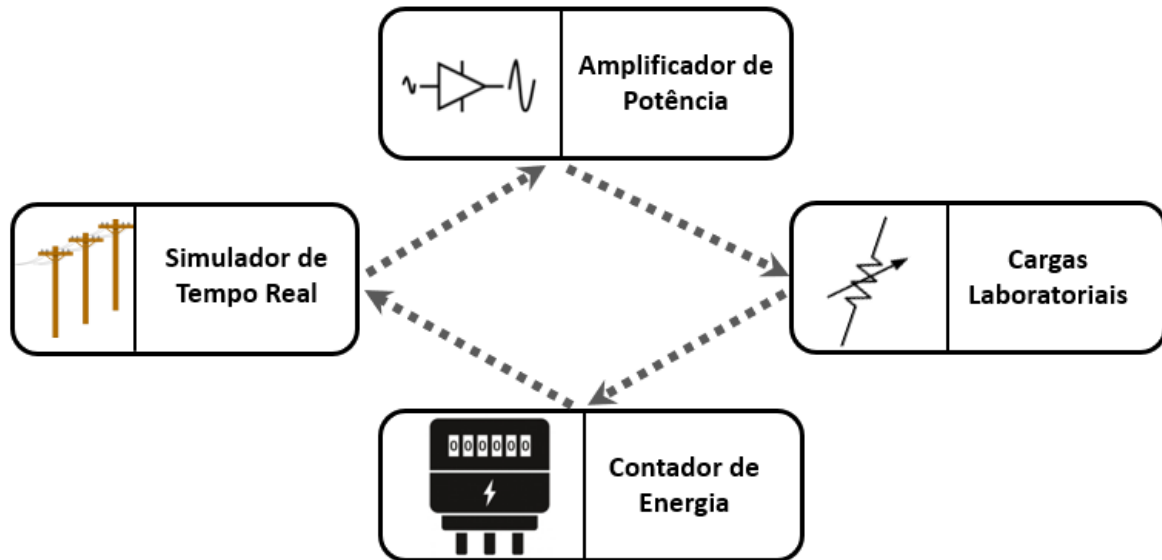


Figura 9 - Conceito geral do modelo desenvolvido.

Para a realização deste modelo, é necessário seguir um procedimento com cinco etapas, visíveis da figura 10. De forma a que o modelo obtenha um conjunto de resultados fiáveis, precisos e exatos, é necessário organizar um grande número de combinações de valores dos parâmetros de energia. Assim, na primeira etapa do modelo, o utilizador define a gama de valores dos parâmetros de energia, que são enviados para o amplificador de potência. Os parâmetros de energia em causa são a amplitude da tensão, a frequência e o ângulo de fase, para cada fase. Na segunda etapa, o utilizador define no simulador de tempo real, o valor de consumo das cargas eléctricas que se pretendem testar. Na terceira etapa, são executados os ensaios laboratoriais e as respetivas medições de energia. Na quarta etapa, como são obtidos um vasto número de resultados, devido às várias combinações dos parâmetros de energia, é necessário realizar uma limpeza e organização dos mesmos. Por fim, o utilizador com os dados todos adquiridos durante a simulação e depois da respetiva limpeza e organização, necessita de realizar a ação mais importante do trabalho, que é a análise dos resultados. Nesta etapa, o utilizador calcula diversas relações matemáticas entre a potência total consumida e a tensão total, para vários níveis de consumo e de frequência. De

seguida, é necessário calcular os erros médio, mínimo e máximo das relações matemáticas obtidas, para saber qual a equação mais adequada para a modelação de cargas elétricas.

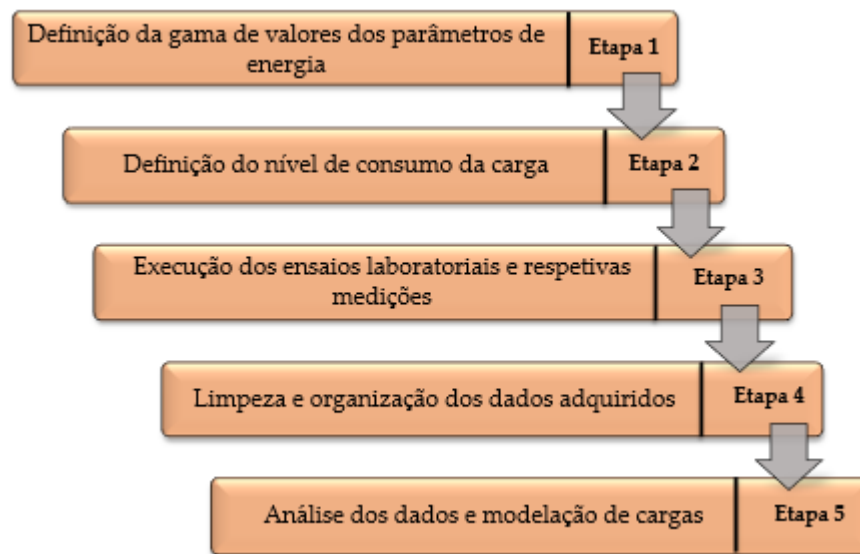


Figura 10 - Diagrama de etapas do modelo.

3.2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO LABORATÓRIO

O primeiro interveniente e núcleo do sistema é o *OP5600-OPAL-RT*. O *RT-LAB*, é o principal *software* a controlar a simulação realizada no simulador *OP5600* e pode ser instalado no computador do utilizador. O protocolo de comunicação entre o *OP5600* e o computador do utilizador é o protocolo TCP/IP. Este *software* é completamente baseado no ambiente *Simulink* do *MATLAB*. Deste modo, a criação, a edição e a compilação do modelo *Simulink* são realizadas através do *RT-LAB* no computador do utilizador, enquanto que a execução em tempo real do modelo e as I/O são implementadas pelo *OP5600*.

No ambiente *Simulink*, o modelo deve ser criado com dois principais subsistemas, como se pode verificar na figura 11: o subsistema computacional (figura 11 - a) e o subsistema de *interface* (figura 11 - b). Os subsistemas computacionais incluem todas as operações matemáticas e elementos computacionais que são executados em tempo real no *OP5600*. O subsistema de *interface* do utilizador, pode ser visualizado no ecrã no computador do utilizador e contém todos os blocos que permite ao utilizador controlar e analisar os dados do sistema. Os dados entre os dois subsistemas são transmitidos sincronamente através do protocolo TCP/IP. Para este modelo foram criados dois subsistemas, ilustrados na figura 12. No subsistema computacional (figura 12 - a), são criadas as ondas de tensão de cada fase, que são enviadas para o amplificador de potência, com os parâmetros que o utilizador

define e recebe vindos do subsistema *interface* (figura 12 – b). O utilizador consegue visualizar as ondas de tensão do amplificador que alimentam as cargas elétricas, através de um osciloscópio conectado diretamente ao *OP5600* ou através de um bloco *scope* do subsistema *interface*.

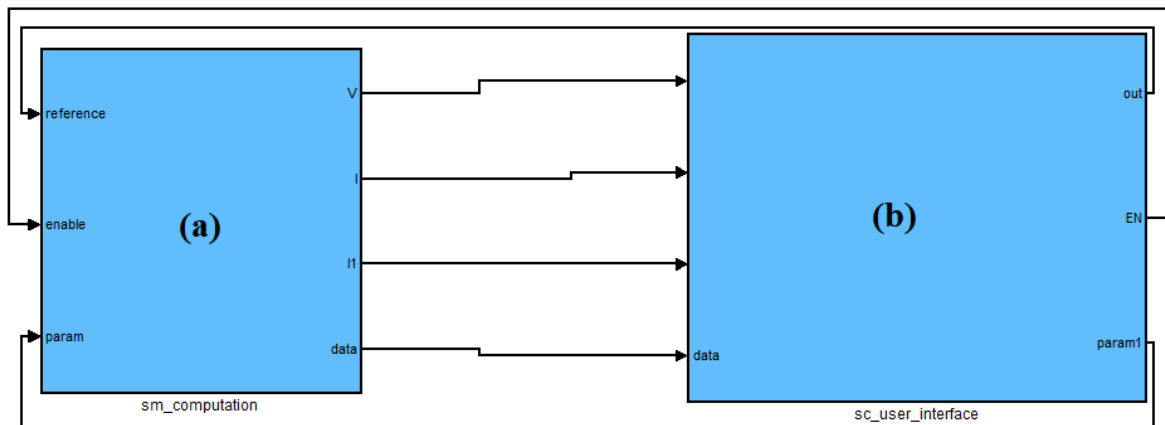


Figura 11 – Subsistemas do modelo; (a) Subsistema computacional, (b) Subsistema *interface*.

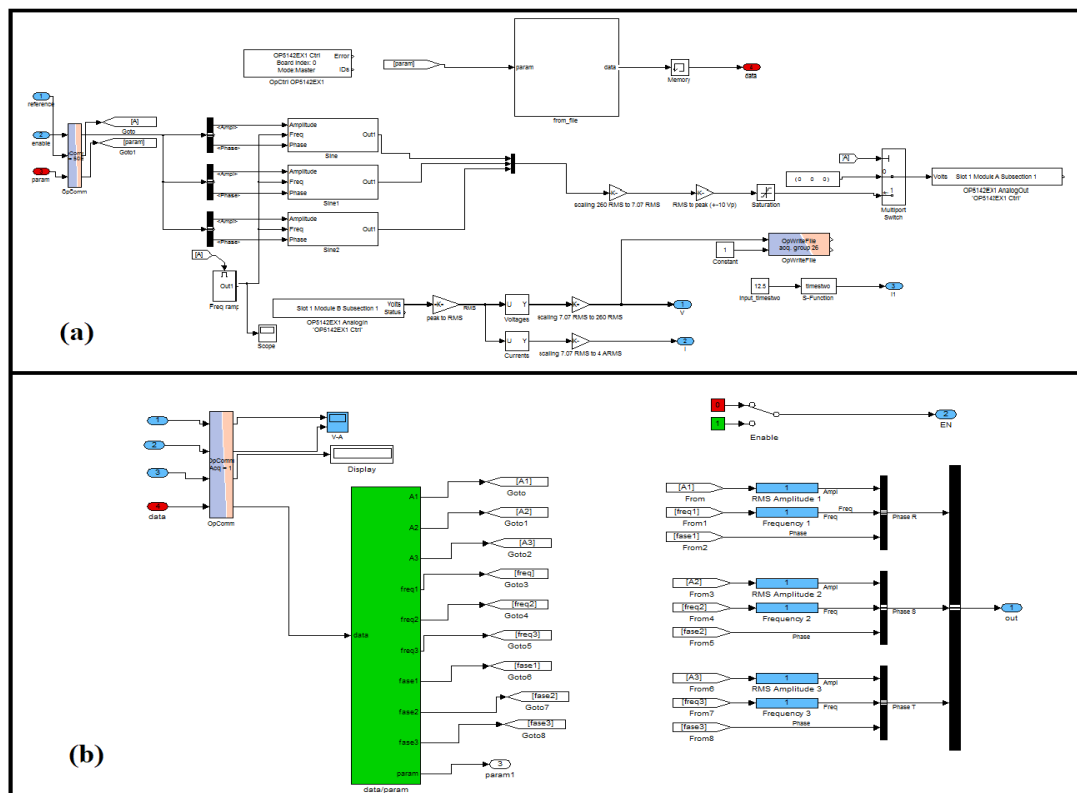


Figura 12 –Interior dos subsistemas do modelo; (a) Subsistema computacional, (b) Subsistema *interface*.

O segundo interveniente do sistema é o amplificador de potência de 3kW. Na traseira do amplificador de potência estão localizados os conectores que permitem fazer as ligações elétricas. Na figura 13, os conectores #1, #2 e #3 são as ligações responsáveis por conectar

o amplificador ao simulador. Estes nove conectores são divididos em três grupos iguais. Cada grupo é composto por um *pilot input*, que é a conexão onde o amplificador recebe o sinal que provém do *OP5600*, por um *image U* e um *image I*, que são as saídas que permitem, ao utilizador, visualizar a tensão e a corrente de cada uma das fases. O conector J1 é o ponto de alimentação do amplificador de potência. As conexões J2 são as saídas do amplificador, que são conectadas aos aparelhos que se pretendem testar.



Figura 13 - Vista traseira do amplificador de potência.

Para controlar o amplificador de potência, o *OP5600* converte os parâmetros de energia associados para um intervalo entre 0 a 10V e envia-os para o amplificador através das saídas analógicas. Ou seja, o amplificador recebe comandos entre 0 a 10V como entrada e fornece à saída os parâmetros de energia com um intervalo de 0 a 260V, de acordo com as configurações pré-definidas pelo utilizador.

Outro interveniente do sistema é o contador de energia, que é instalado na carga que se pretende testar. Este contador mede em tempo real a potência consumida da carga, mas também outros dados relacionados com os parâmetros da rede. As medições são transmitidas para o *OP5600* através do protocolo TCP/IP.

Como se pode verificar na figura 14, o *OP5600* é controlado pelo utilizador e recebe as informações da rede por meio de dois métodos. O primeiro método é através das saídas analógicas do amplificador de potência, enquanto que o segundo método é através do

contador de energia. Deste modo, o *OP5600* tem supervisão total da *microgrid* para poder analisar os dados de energia.

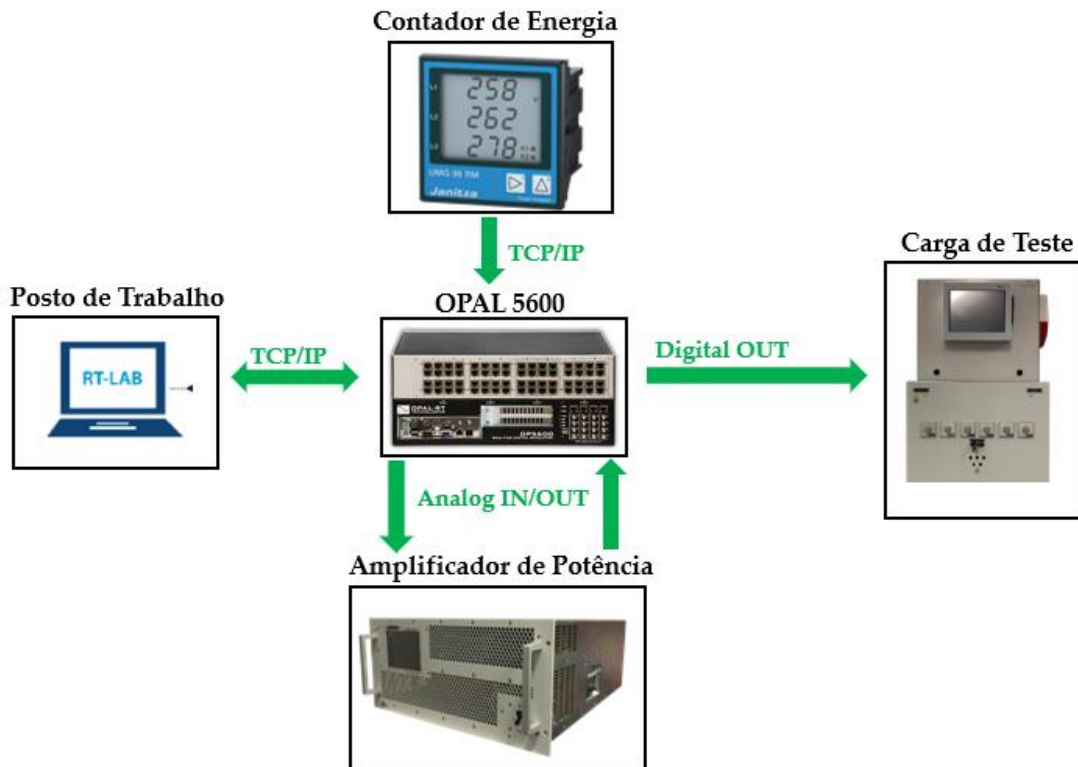


Figura 14 - Arquitetura do sistema implementado no laboratório.

O último participante do sistema, são as cargas eléctricas que se pretendem testar e são alimentadas pelo amplificador de potência. Estas cargas eléctricas existentes no laboratório estão equipadas com diversos relés e interruptores automáticos, que estão conectados às saídas digitais do *OP5600*. Desta forma, o utilizador pode definir os valores de consumo desejados, controlando também a quantidade e qualidade de energia que é fornecida às cargas eléctricas através do amplificador de potência, evitando assim perturbações causadas por sobretensões, subtensões, ruídos e distorções harmónicas.

Na figura 15, está representado a linha de tempo da transmissão de dados que ocorre durante a simulação do sistema. Os pontos vermelhos representam ações. O ponto A, representa a comunicação entre o *OP5600* e o amplificador de potência. Neste ponto, o simulador envia e recebe os valores dos parâmetros de energia. O ponto B, representa a comunicação entre o *OP5600* e a carga. Neste ponto, o simulador transmite o valor de referência de consumo para a carga e espera pelo tempo de resposta do equipamento até obter o consumo desejado. O ponto C, representa a transmissão de dados entre o *OP5600* e o contador de energia. Neste ponto, o contador envia os valores reais de energia medidos

para o simulador. Os pontos A e B acontecem ao mesmo tempo. O período Y1 e Y2, são definidos com o valor de $50\mu\text{s}$ e representam o *sample time* de transmissão de dados entre o OP5600, o amplificador de potência e a carga. O período X, é definido com o valor de 1s e representa o *sample time* com que o contador de energia transmite as medições para o OP5600.

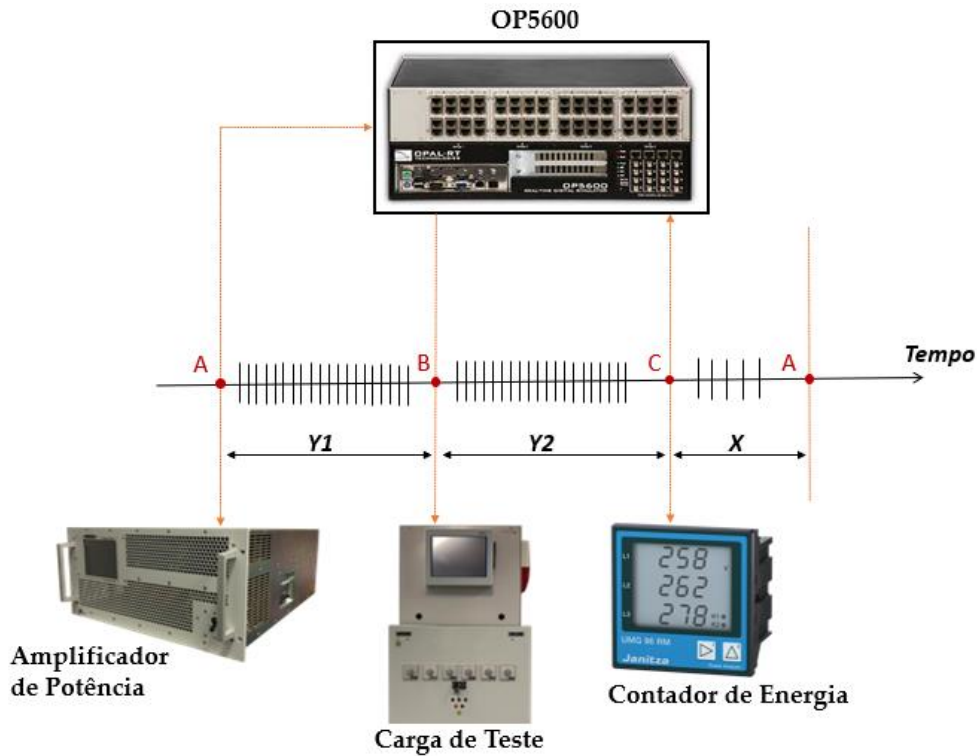


Figura 15 - Linha de tempo da transmissão de dados do sistema.

3.3. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado a metodologia desenvolvida no trabalho desta dissertação, onde foi explicado a arquitetura do sistema, bem como a sua implementação em laboratório.

No próximo capítulo irão ser apresentados e explicados os casos de estudo implementados neste trabalho de dissertação, utilizando a metodologia apresentada.

4. CASOS DE ESTUDO

Os casos de estudo foram divididos em quatro casos, que diferenciam com o tipo de carga elétrica testada. Na secção 4.1 é apresentada a primeira carga elétrica, com uma potência nominal de 8kW. Na secção 4.2 é apresentada a segunda carga elétrica, com uma potência nominal de 4kW. Na secção 4.3 é apresentada a terceira carga elétrica, com uma potência de 30kW. Na secção 4.4 é apresentada a quarta carga elétrica, onde são usados dois motores elétricos de indução, com potências nominais diferentes.

Como foi referido no capítulo 3, é o utilizador que define os parâmetros de energia que são transmitidos para o amplificador de potência, onde este por sua vez amplifica o sinal recebido. Como se pode verificar na tabela 1, para os casos de estudo foram estabelecidos um conjunto de gamas de valores para os parâmetros de energia em causa. Para os valores de amplitude da tensão, foram definidos 11 valores diferentes, com um tamanho de passo de 4% do valor de referência (230V), sendo o valor mínimo e máximo de 184V e 276V. Para os valores de frequência, foram definidos 5 valores diferentes com um tamanho de passo de 1% do valor de referência (50Hz), sendo o valor mínimo e máximo de 49Hz e 51Hz. Por sua vez, os valores de ângulo de fase mantiveram-se inalterados durante todo o caso de estudo. O ângulo da primeira fase foi definido com o valor 0rad, enquanto que os ângulos da segunda e terceira fase foram definidos com os valores $2\pi/3\text{rad}$ e $-2\pi/3\text{rad}$,

respetivamente Este conjunto de valores originaram 6655 combinações de cenários. Dentro deste número, só foram usados 3355 cenários, devido à restrição imposta pelo amplificador de potência, onde a soma das amplitudes das tensões de cada fase tem de ser menor ou igual a 690V. Este número vasto de combinações obtido, representam vários cenários de rede com parâmetros de energia diferentes. O tempo teórico necessário para realizar as 3355 combinações de cenários da tabela 1, foi de aproximadamente 4.86h.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros enviados para o amplificador.

Parâmetros de Energia	Valor de Referência	Tamanho do passo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Número de valores
Amplitude da Tensão 1 (V)	230	4%	184	276	11
Amplitude da Tensão 2 (V)	230	4%	184	276	11
Amplitude da Tensão 3 (V)	230	4%	184	276	11
Frequência da Fase 1 (Hz)	50	1%	49	51	5
Frequência da Fase 2 (Hz)					
Frequência da Fase 3 (Hz)					
Ângulo de Fase 1 (rad)	0	0%	-	-	1
Ângulo de Fase 2 (rad)	$2\pi/3$	0%	-	-	1
Ângulo de Fase 3 (rad)	$-2\pi/3$	0%	-	-	1

Cada carga elétrica testada, tem certos níveis de consumo e de configurações. Devido ao grande número de cenários obtidos dos parâmetros de energia, foram necessários diversos dias para que todas as simulações das cargas fossem executadas.

4.1. CARGA ELÉTRICA 1 – 8kW

A primeira carga elétrica a ser testada, foi uma carga resistiva trifásica com uma potência nominal de 8kW, com ligação em estrela sem neutro. Esta carga possui seis níveis de consumo diferentes, sendo eles de 5%, 10%, 15%, 20% e dois níveis de 25%, como se pode visualizar na figura 16. Devido a limitações técnicas do amplificador, não foi possível alimentar a carga de 8kW na sua total capacidade. Deste modo, foram realizadas 5 simulações de todas as combinações da tabela 1, ou seja, uma simulação para cada nível de consumo. A duração teórica para a realização de todos ensaios laboratoriais para esta carga elétrica, foi de 24.3h.



Figura 16 - Carga resistiva de 8kW.

4.2. CARGA ELÉTRICA 2 – 4kW

A segunda carga elétrica utilizada, foi um conjunto de três cargas resistivas monofásicas com uma potência nominal de 4kW. Cada carga de 4kW possui seis níveis de consumo, sendo eles de 5%, 10%, 15%, 20% e dois níveis de 25%, como se pode observar na figura 17.



Figura 17 - Cargas resistivas de 4kW.

Para esta carga eléctrica, devido às limitações técnicas do amplificador de potência, só foram utilizados 3 níveis de consumo. Ou seja, foi realizada uma simulação dos valores da tabela 1, onde a primeira carga estava conectada à primeira fase com um nível de consumo de 5%, a segunda carga estava conectada à segunda fase com um nível de consumo de 10% e a terceira carga estava conectada à terceira fase com um nível de consumo de 15%, como se pode verificar na figura 18. A duração teórica para a realização de todos ensaios laboratoriais para esta carga eléctrica, foi de 4.86h.

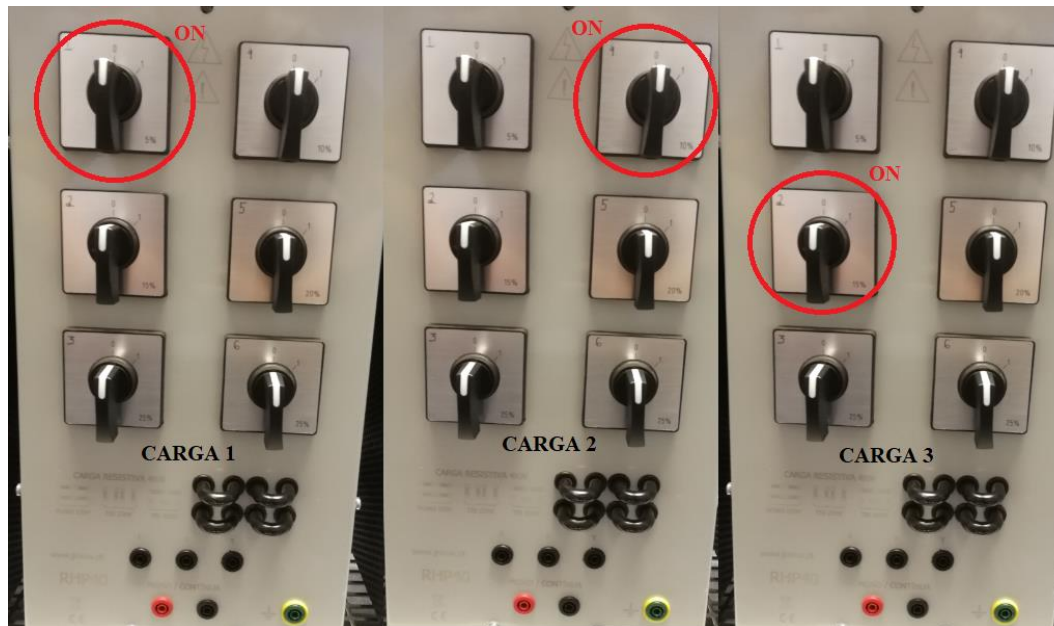


Figura 18 - Níveis de consumo ligados para a carga eléctrica 2.

4.3. CARGA ELÉTRICA 3 – 30kW

A terceira carga eléctrica testada, foi uma carga resistiva, que pode ser monofásica ou trifásica, com uma capacidade nominal de 30kW. O consumo desta carga, pode ser controlado através de um painel de controlo equipado com interruptores, onde no modo trifásico, são divididos em divisões de 1kW, 2 x 2kW, 5kW e 2 x 10kW, enquanto que no modo monofásico o consumo pode ser controlado em níveis de 0.3kW. Na figura 19, está ilustrada a estrutura da carga resistiva de 30kW.



Figura 19 - Carga resistiva de 30kW.

Sendo que nesta carga é possível definir o consumo em cada fase, foram realizadas quatro simulações das combinações apresentadas na tabela 1. Na primeira simulação o consumo total da carga foi de 1kW, sendo que cada fase estava definida para consumir 0.3kW (figura 20 - a). Nas restantes simulações, o consumo total da carga foi de 1.3kW, alterando o valor de consumo de cada fase. Na segunda simulação, a primeira fase estava definida para consumir 0.7kW e as restantes fases estavam definidas para consumir 0.3kW (figura 20 - b). Na terceira simulação, a segunda fase estava definida para consumir 0.7kW e as restantes fases estavam definidas para consumir 0.3kW (figura 20 - c). Na quarta simulação, a terceira fase estava definida para consumir 0.7kW e as restantes fases estavam definidas para consumir 0.3kW (figura 20 - d). Só se definiram estes níveis de consumo devido a limitações técnicas do amplificador de potência. A duração teórica para a realização de todos ensaios laboratoriais para esta carga elétrica, foi de 19.4h.

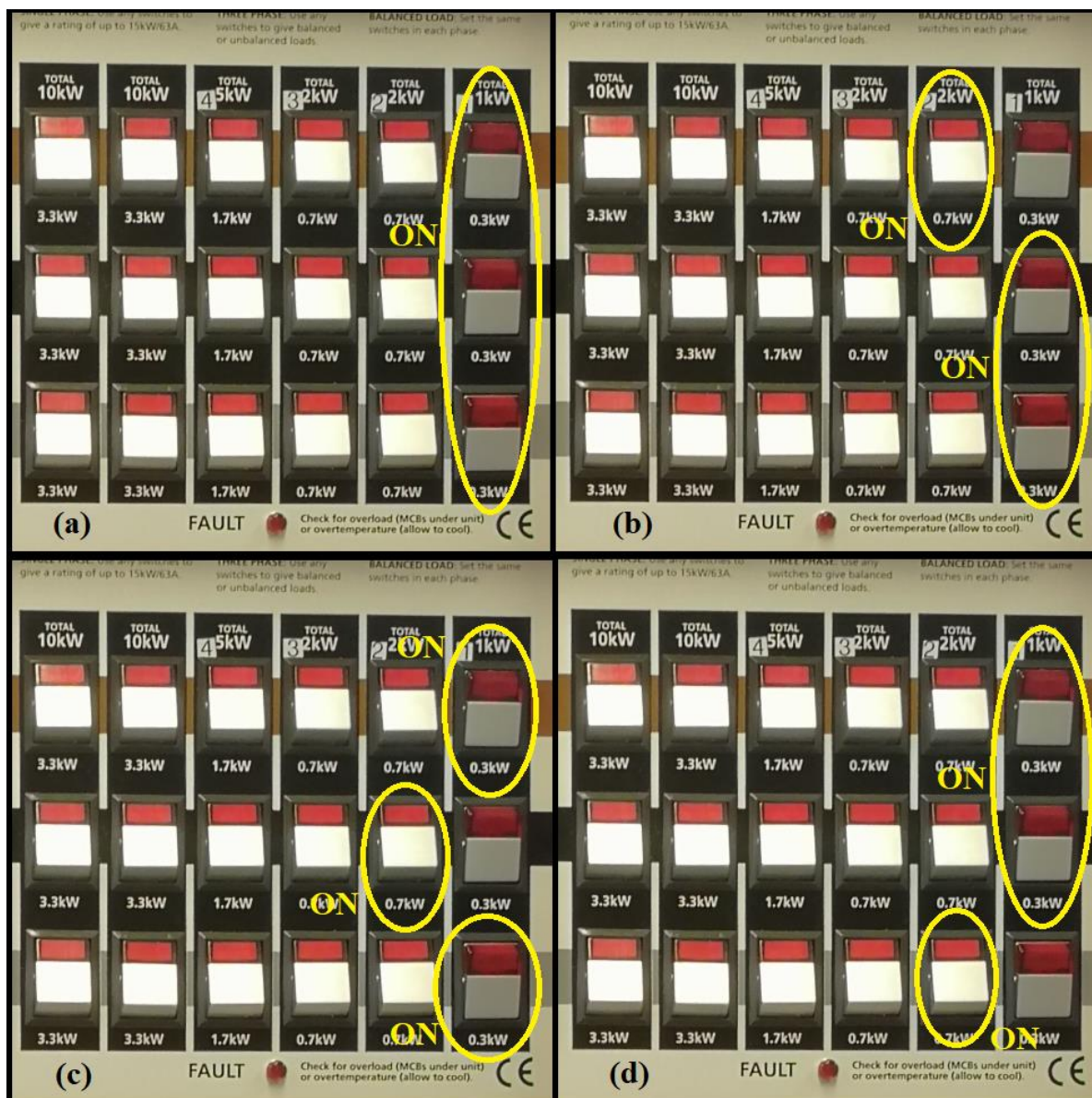


Figura 20 - Níveis de consumo ligados para a carga elétrica 3; (a) primeira simulação, (b) segunda simulação, (c) terceira simulação, (d) quarta simulação.

4.4. CARGA ELÉTRICA 4 – MOTORES DE INDUÇÃO

A quarta carga elétrica testada, foi um conjunto de dois motores trifásicos de indução, que são volantes de inércia. O motor 1 possui uma potência nominal de 1.5kW, enquanto que o motor 2 possui uma potência nominal de 3kW. Na figura 21, está ilustrada os dois motores utilizados. Estes motores têm sempre um valor constante de consumo de energia. Para esta carga elétrica foram realizadas duas simulações das combinações da tabela 1, ou seja, uma simulação para cada motor. A duração teórica para a realização de todos ensaios laboratoriais para esta carga elétrica, foi de 9.72h.



Figura 21 - Bancada com os motores de indução.

4.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os casos de estudo desta dissertação, utilizando a metodologia apresentada no capítulo 3. Foram também explicadas as várias cargas elétricas testadas, bem como os parâmetros de energia escolhidos para a realização dos ensaios laboratoriais.

No próximo capítulo irão ser analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de cada carga elétrica testada.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados dos ensaios laboratoriais das várias cargas elétricas testadas vão ser analisados. Na secção 5.1 vão ser analisados os resultados da primeira carga elétrica. Na secção 5.2 vão ser analisados os resultados da segunda carga elétrica. Na secção 5.3 vão ser analisados os resultados da terceira carga elétrica. Na secção 5.4 vão ser analisados os resultados da quarta carga elétrica.

A duração total para a realização de todos os ensaios laboratoriais dos casos de estudo, foi cerca de duas semanas, pois de vez em quando era necessário parar a simulação, para alterar a carga que estava ligada ao amplificador ou para reiniciar o simulador. Para cada carga e seu respetivo nível de consumo, um grande número de dados reais acerca da tensão, corrente e potência ativa foram medidos pelo contador de energia. Durante a simulação, as combinações dos parâmetros permaneceram inalterados por cinco segundos e só depois é que, automaticamente, o *OP5600* enviava um novo conjunto de valores. Como o contador de energia registava as medições reais a cada segundo, no final da simulação foram obtidos valores iguais. Ou seja, a informação adquirida dos parâmetros medidos pelo contador de energia a cada cinco segundos foi obtida cinco vezes. Por esta razão, em todas as cargas elétricas, começou-se por realizar uma limpeza, onde os valores repetidos foram eliminados.

5.1. CARGA ELÉTRICA 1 – 8kW

A tabela 2, ilustra a informação relacionada com a quantidade de resultados adquiridos dos ensaios laboratoriais da primeira carga elétrica.

Tabela 2 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 1.

Nível da Carga	Dados Esperados	Dados Reais obtidos	
		Antes da Limpeza	Depois da Limpeza
25%	16775	15302	11533
20%	16775	14239	9657
15%	16775	14495	8889
10%	16775	14495	8621
5%	16775	14516	8415

O número de dados esperados, na tabela 2, foi calculado multiplicando o número de combinações de cenários com a restrição, da tabela 1, por cinco. Os dados obtidos antes da limpeza foram as informações reais medidas pelo contador de energia, enquanto que os dados adquiridos depois da limpeza são os dados sem valores repetidos.

Após a limpeza dos dados, foram realizados os gráficos da figura 22. O gráfico da figura 22 – (a), demonstra o comportamento da potência total consumida durante a simulação, para um nível de consumo de 25%. O gráfico da figura 22 – (b), demonstra o comportamento da potência total consumida durante a simulação, para um nível de consumo de 20%. O gráfico da figura 22 – (c), demonstra o comportamento da potência total consumida durante a simulação, para um nível de consumo de 15%. O gráfico da figura 22 – (d), demonstra o comportamento da potência total consumida durante a simulação, para um nível de consumo de 10%. O gráfico da figura 22 – (e), demonstra o comportamento da potência total consumida durante a simulação, para um nível de consumo de 5%. Através da análise dos gráficos, foi possível perceber que a evolução do comportamento da potência foi idêntica para qualquer nível de consumo. Verificou-se também, que a variação do valor de frequência, provocou ligeiros desvios no comportamento da potência consumida.

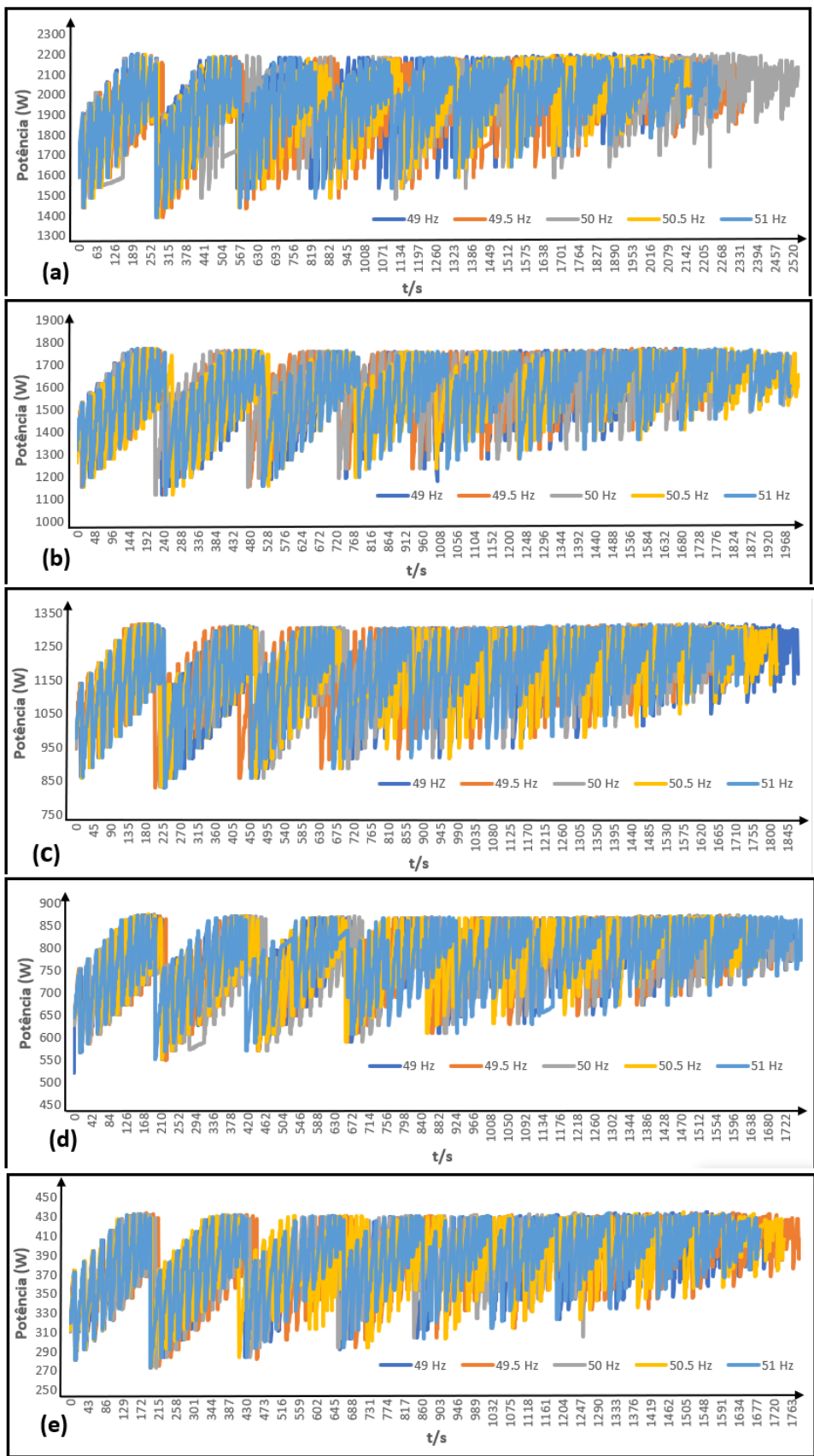


Figura 22 - Comportamentos da potência total consumida, para a carga elétrica 1; (a) Nível de consumo a 25%, (b) Nível de consumo a 20%, (c) Nível de carga a 15%, (d) Nível de consumo a 10%, (e) Nível de consumo a 5%.

Foram criadas três situações diferentes de relações matemáticas, visualizadas na tabela 3, entre a potência total consumida (PSUM) e a soma das tensões de cada fase (VSUM), para os diferentes níveis de consumo e de frequência. As equações de regressão linear da situação A, são as relações para cada nível de frequência fixo e para cada nível de consumo, ou seja, foram utilizados valores de um nível de frequência específico para um nível de consumo específico e foram calculadas as equações. As equações de regressão linear da situação B foram obtidas através do conjunto dos níveis de frequência e para cada nível de consumo, ou seja, foram agregados todos os níveis de frequência e foram calculadas as equações de regressão lineares para cada um dos níveis de consumo. As equações de regressão linear da situação C foram obtidas através de cada nível de frequência, mas com os valores de todos os níveis de consumo, ou seja, foi utilizado um nível de frequência de todos os níveis de consumo e foram calculadas as equações de regressão linear.

De seguida, foram calculados os valores de erro médio, erro mínimo e erro máximo, entre os valores de potência total consumida adquiridos na simulação, pelo contador de energia, e o valor de potência calculado através das equações de regressão linear da tabela 3, para cada nível de consumo e para o conjunto de todos os níveis de consumo. A figura 23, compara os erros obtidos das regressões lineares para cada nível de consumo (tabela 3 - situação A) e para o conjunto de todos os níveis de consumo (tabela 3 – situação B).

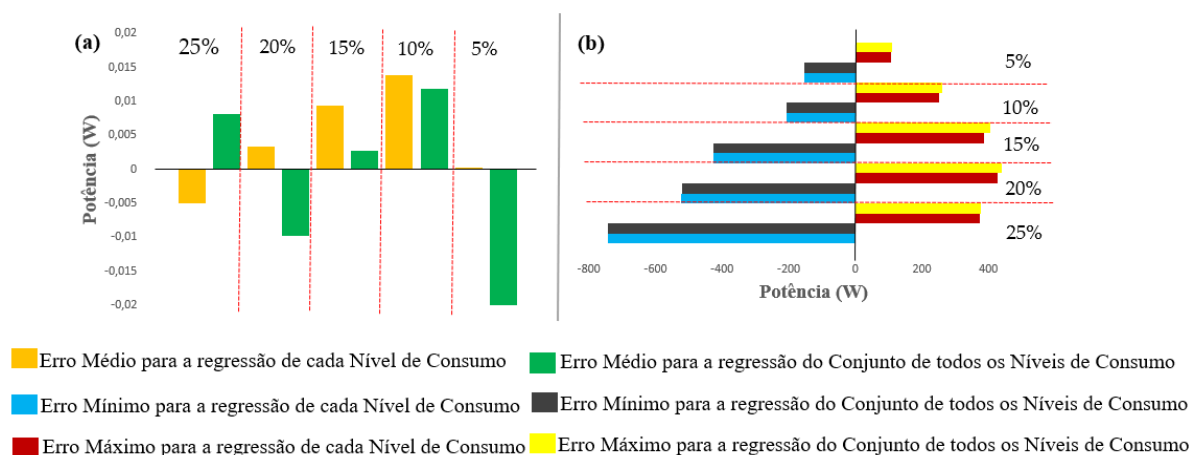


Figura 23 - Erros para a carga elétrica 1, variando o nível de consumo; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Tabela 3 – Relações matemáticas para a carga elétrica 1.

Nível de Carga	Nível de Frequência (Hz)	Situação A	Situação B	Situação C
25%	49,0	PSUM = 5,834VSUM - 1832,2	PSUM = 5,8326VSUM - 1833,9	PSUM = 4,0702VSUM - 1425,4
	49,5	PSUM = 5,8481VSUM - 1845,1		PSUM = 3,7487VSUM - 1211,9
	50,0	PSUM = 5,8396VSUM - 1838		PSUM = 3,8014VSUM - 1200,1
	50,5	PSUM = 5,796VSUM - 1811,5		PSUM = 3,726VSUM - 1200,9
	51,00	PSUM = 5,8357VSUM - 1836,4		PSUM = 3,8525VSUM - 1274,1
20%	49,0	PSUM = 4,6088VSUM - 1420,2	PSUM = 4,6815VSUM - 1467,2	PSUM = 4,0702VSUM - 1425,4
	49,5	PSUM = 4,6727VSUM - 1463,2		PSUM = 3,7487VSUM - 1211,9
	50,0	PSUM = 4,7302VSUM - 1499,1		PSUM = 3,8014VSUM - 1200,1
	50,5	PSUM = 4,6973VSUM - 1477,3		PSUM = 3,726VSUM - 1200,9
	51,0	PSUM = 4,6975VSUM - 1475,9		PSUM = 3,8525VSUM - 1274,1
15%	49,0	PSUM = 3,352VSUM - 1010,9	PSUM = 3,4497VSUM - 1074,4	PSUM = 4,0702VSUM - 1425,4
	49,5	PSUM = 3,4511VSUM - 1076,4		PSUM = 3,7487VSUM - 1211,9
	50,0	PSUM = 3,5123VSUM - 1114,3		PSUM = 3,8014VSUM - 1200,1
	50,5	PSUM = 3,4652VSUM - 1084,4		PSUM = 3,726VSUM - 1200,9
	51,0	PSUM = 3,4772VSUM - 1092,2		PSUM = 3,8525VSUM - 1274,1
10%	49,0	PSUM = 2,2676VSUM - 699,77	PSUM = 2,3134VSUM - 729,2	PSUM = 4,0702VSUM - 1425,4
	49,5	PSUM = 2,3227VSUM - 735,76		PSUM = 3,7487VSUM - 1211,9
	50,0	PSUM = 2,3342VSUM - 742,5		PSUM = 3,8014VSUM - 1200,1
	50,5	PSUM = 2,3189VSUM - 733,66		PSUM = 3,726VSUM - 1200,9
	51,0	PSUM = 2,3261VSUM - 738,53		PSUM = 3,8525VSUM - 1274,1
5%	49,0	PSUM = 1,1281VSUM - 348,87	PSUM = 1,1443VSUM - 359,24	PSUM = 4,0702VSUM - 1425,4
	49,5	PSUM = 1,1473VSUM - 360,92		PSUM = 3,7487VSUM - 1211,9
	50,0	PSUM = 1,1494VSUM - 362,94		PSUM = 3,8014VSUM - 1200,1
	50,5	PSUM = 1,1405VSUM - 356,68		PSUM = 3,726VSUM - 1200,9
	51,0	PSUM = 1,1569VSUM - 367,41		PSUM = 3,8525VSUM - 1274,1

Na figura 23 - (a), foram comparados os erros médios calculados e verificou-se que os erros médios para cada nível de consumo foram aproximadamente iguais a zero. Verificou-se também, que os erros calculados para a regressão de todos os níveis de consumo foram quase sempre maiores do que os erros calculados para a regressão de cada nível de consumo. Na figura 23 - (b), foram comparados os erros mínimos e máximos calculados e

averiguou-se que tanto para a regressão de cada nível de consumo, como para a regressão do conjunto de todos os níveis de consumo, os valores dos erros mínimo e máximo foram idênticos.

Da mesma forma, foram calculados os valores de erro médio, erro mínimo e erro máximo, entre os valores de potência total consumida adquiridos na simulação, pelo contador de energia, e o valor de potência calculado através das equações de regressão linear das situações da tabela 3, para cada nível de frequência e para o conjunto de todos os níveis de frequência. A figura 24, compara os erros obtidos das equações de regressão linear para cada nível de frequência (tabela 3 - situação A) e as equações de regressão linear para o conjunto de todos os níveis de frequência (tabela 3 - situação C).

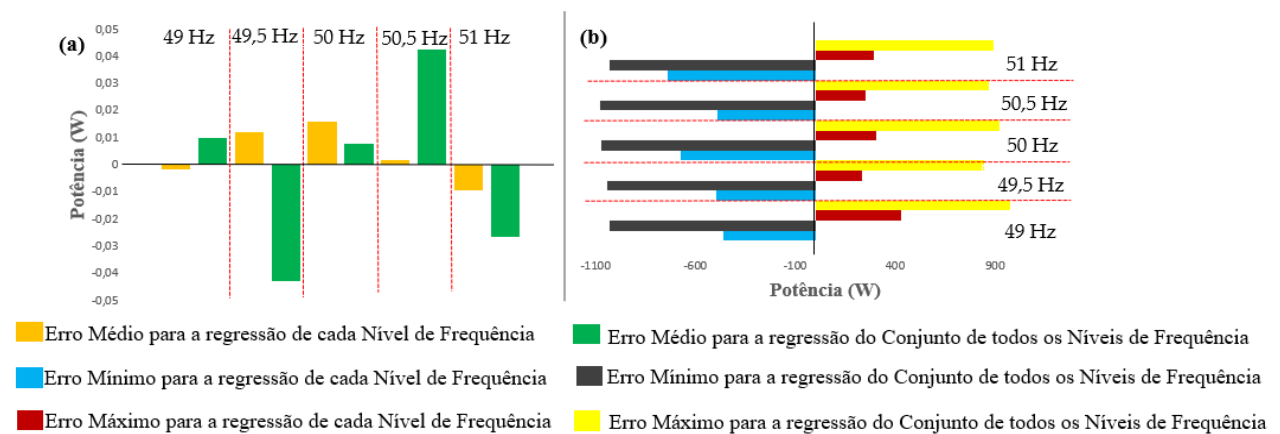


Figura 24 - Erros para a carga eléctrica 1, variando o nível de frequência; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Na figura 24 – (a), o erro médio da regressão singular para as frequências 49 Hz e 50.5 Hz, foi menor do que os erros dos restantes níveis de frequência. No entanto, na figura 24 – (b), os erros mínimos e máximos da regressão do conjunto de todos os níveis de frequência, foram sempre maiores do que os erros da regressão de cada nível de frequência.

Conclui-se assim, que para a modulação de cargas eléctricas deste tipo, relativamente à figura 23, para os níveis de consumo 25%, 20% e 5%, devem ser escolhidas as equações da tabela 3 – situação A, enquanto que para os níveis de consumo 20%, 15% e 10%, devem ser escolhidas as equações da tabela 3 – situação B. Relativamente à figura 24, para os valores de frequência 49Hz, 49.5Hz, 50.5Hz e 51 Hz, devem ser escolhidas as equações da tabela 3 - situação A, enquanto que para o valor de frequência de 50Hz, devem ser escolhidas as equações da tabela 3- situação C.

5.2. CARGA ELÉTRICA 2 – 4KW

A tabela 4, ilustra a informação relacionada com a quantidade de resultados adquiridos dos ensaios laboratoriais da segunda carga elétrica.

Tabela 4 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 2.

Carga Elétrica 2	Dados Esperados	Dados Reais obtidos	
		Antes da Limpeza	Depois da Limpeza
	16775	13056	8297

Após terem sido adquiridos os dados reais provenientes do contador de energia e realizada sua respetiva limpeza, foi criado um gráfico onde demonstra o comportamento da potência total consumida pela carga durante a simulação, variando o nível da frequência. Através da análise da figura 25, verificou-se que o comportamento da potência total consumida ao longo da simulação, evoluiu de igual forma para cada nível de frequência, havendo apenas pequenos desvios.

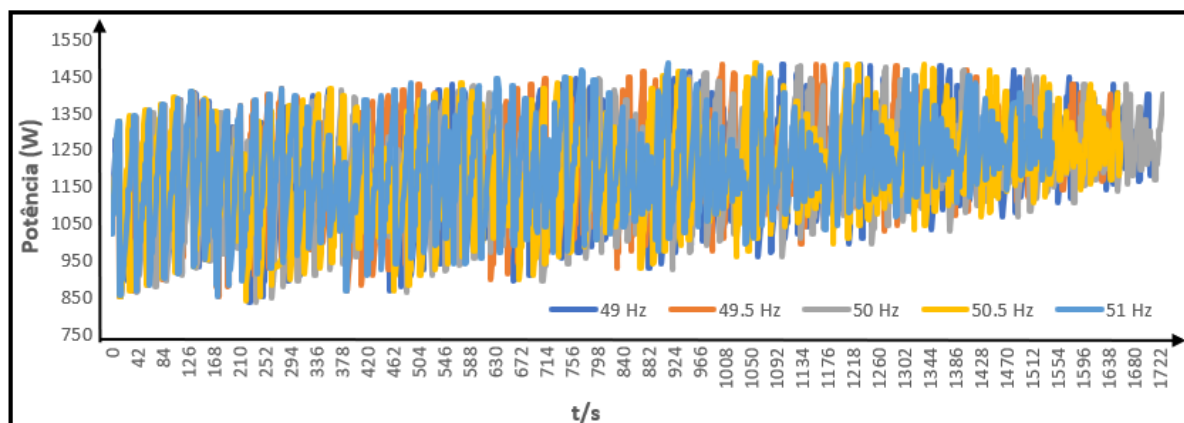


Figura 25 - Comportamento da potência total consumida, para a carga elétrica 2.

De seguida, foram criadas relações matemáticas, que podem ser visualizadas na tabela 5, entre a potência total consumida (PSUM) e a soma das tensões de cada fase (VSUM) para os diferentes níveis de frequência. Como se pode verificar na tabela 5, existem duas situações para esta carga elétrica. Na situação A, existe uma equação de regressão linear para cada nível de frequência, enquanto que na situação B, existe uma equação de regressão linear que engloba todos os níveis de frequência. Ou seja, as equações calculadas na situação A, foram baseadas nos dados de cada nível específico de frequência e na

situação B, a equação calculada foi baseada na agregação dos dados de todos os níveis de frequência.

Tabela 5 - Relações matemáticas para a carga eléctrica 2.

Nível de Carga (kW)			Nível de Frequência (Hz)	Situação A	Situação B
Fase 1	Fase 2	Fase 3			
0,20	0,40	0,60	49,0	$PSUM = 3,4783VSUM - 1073$	$PSUM=3,5483VSUM - 1116,5$
			49,5	$PSUM = 3,4929VSUM - 1081,6$	
			50,0	$PSUM = 3,4749VSUM - 1072,1$	
			50,5	$PSUM = 3,5636VSUM - 1126,5$	
			51,0	$PSUM = 3,6934VSUM - 1205,4$	

Com as equações de regressão linear calculadas, foi possível obter o erro médio, erro mínimo e o erro máximo para cada nível de frequência e para o conjunto de todos os níveis de frequência. Os erros obtidos foram resultado da comparação entre a potência consumida obtida pelo contador de energia, durante a simulação, e a potência consumida calculada utilizando as equações de regressão linear para cada nível de frequência e para o conjunto de todos os níveis de frequência. Assim, a figura 26 compara os erros obtidos das equações de regressão linear para todos os níveis de frequência (tabela 5 – situação A) e os erros obtidos da equação de regressão linear para o conjunto de todos os níveis de frequência (tabela 5 – situação B), considerando o consumo da carga fixo.

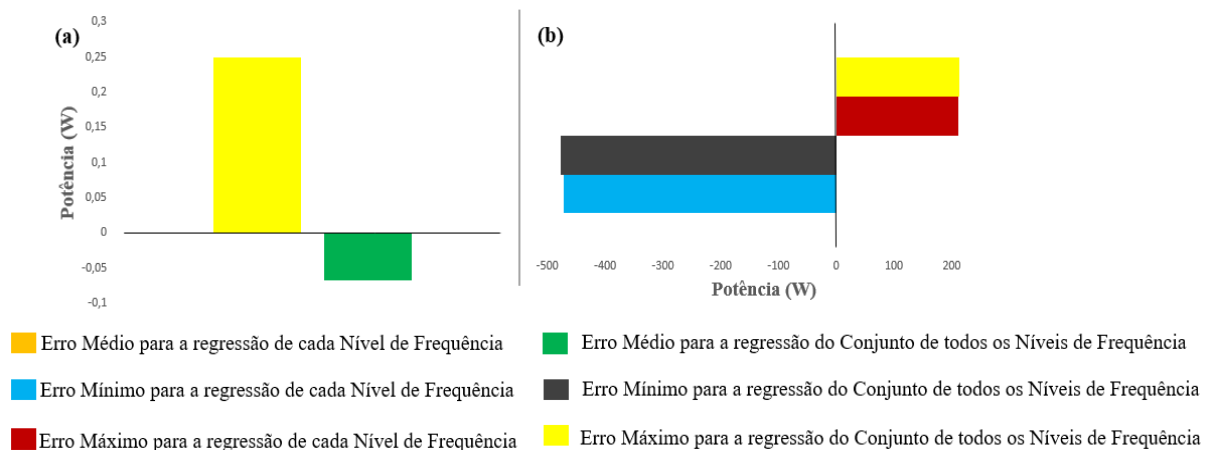


Figura 26 - Erros calculados para a carga eléctrica 2; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Analisando a figura 26 – (a), verificou-se um maior erro médio calculado para a regressão de cada nível de frequência do que para a regressão do conjunto de todos os níveis de frequência. Enquanto que na figura 26 - (b), foi mínima a diferença dos erros mínimos e

máximos para a regressão de cada nível de frequência e para a regressão do conjunto de todos os níveis de frequência.

Conclui-se assim, que para a modulação de cargas elétricas deste tipo, relativamente à figura 26, deve ser escolhida a equação da tabela 5 - situação B.

5.3. CARGA ELÉTRICA 3 – 30kW

A tabela 6, ilustra a informação relacionada com a quantidade de resultados adquiridos dos ensaios laboratoriais da terceira carga elétrica.

Tabela 6 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 3.

Simulação	Dados Esperados	Dados Reais obtidos	
		Antes da Limpeza	Depois da Limpeza
1	16775	13899	9477
2	16775	12371	8276
3	16775	13641	9134
4	16775	13431	9045

Após a limpeza dos dados, foram realizados os gráficos da figura 27. O gráfico da figura 27 – (a), demonstra o comportamento da potência total consumida durante o ensaio laboratorial, para o nível de consumo da primeira simulação. O gráfico da figura 27 – (b), demonstra o comportamento da potência total consumida durante o ensaio laboratorial, para o nível de consumo da segunda simulação. O gráfico da figura 27 – (c), demonstra o comportamento da potência total consumida durante o ensaio laboratorial, para o nível de consumo da terceira simulação. O gráfico da figura 27 – (d), demonstra o comportamento da potência total consumida durante o ensaio laboratorial, para o nível de consumo da quarta simulação. Através da análise dos gráficos da figura 27, foi possível perceber que a evolução do comportamento da potência varia ligeiramente no gráfico da figura 27 – (b), comparando com o resto dos gráficos. Apurou-se também, que a variação do valor de frequência provocou ligeiros desvios no comportamento da potência consumida.

Foram criadas três situações diferentes de relações matemáticas, que podem ser visualizadas na tabela 7, entre a potência total consumida (PSUM) e a soma das tensões de cada fase (VSUM) para os diferentes níveis de consumo e de frequência. As equações de regressão linear da situação A, são as relações para cada nível de frequência fixo e para

cada nível de consumo, ou seja, foram utilizados valores de um nível de frequência específico para um nível de consumo específico e foram calculadas as equações. As equações de regressão linear da situação B foram obtidas através do conjunto dos níveis de frequência e para cada nível de consumo, ou seja, foram agregados todos os níveis de frequência e foram calculadas as equações de regressão lineares para cada um dos níveis de consumo. As equações de regressão linear da situação C foram obtidas através de cada nível de frequência, mas com os valores de consumo de todos os níveis de consumo, ou seja, foram utilizados um nível de frequência de todos os níveis de consumo e foram calculadas as equações de regressão linear.

Tabela 7 - Relações matemáticas para a carga elétrica 3.

Simulação	Nível de Frequência (Hz)	Situação A	Situação B	Situação C
1	49,0	$PSUM = 2,7734VSUM - 889,38$	$PSUM = 2,7575VSUM - 879,95$	$PSUM = 3,3432VSUM - 1060,6$
	49,5	$PSUM = 2,7557VSUM - 878,88$		$PSUM = 3,4077VSUM - 1101,4$
	50,0	$PSUM = 2,7696VSUM - 888,08$		$PSUM = 3,4183VSUM - 1109,6$
	50,5	$PSUM = 2,7545VSUM - 878,35$		$PSUM = 3,3217VSUM - 1045,7$
	51,00	$PSUM = 2,7347VSUM - 865,16$		$PSUM = 3,365VSUM - 1076,1$
2	49,0	$PSUM = 3,2887VSUM - 957,99$	$PSUM = 3,4646VSUM - 1070$	$PSUM = 3,3432VSUM - 1060,6$
	49,5	$PSUM = 3,5048VSUM - 1094,8$		$PSUM = 3,4077VSUM - 1101,4$
	50,0	$PSUM = 3,4836VSUM - 1083,5$		$PSUM = 3,4183VSUM - 1109,6$
	50,5	$PSUM = 3,5048VSUM - 1094,2$		$PSUM = 3,3217VSUM - 1045,7$
	51,0	$PSUM = 3,5112VSUM - 1100,5$		$PSUM = 3,365VSUM - 1076,1$
3	49,0	$PSUM = 3,5077VSUM - 1099,9$	$PSUM = 3,5211VSUM - 1108,6$	$PSUM = 3,3432VSUM - 1060,6$
	49,5	$PSUM = 3,5533VSUM - 1123,3$		$PSUM = 3,4077VSUM - 1101,4$
	50,0	$PSUM = 3,5984VSUM - 1157,2$		$PSUM = 3,4183VSUM - 1109,6$
	50,5	$PSUM = 3,5051VSUM - 1097,1$		$PSUM = 3,3217VSUM - 1045,7$
	51,00	$PSUM = 3,4493VSUM - 1070,3$		$PSUM = 3,365VSUM - 1076,1$
4	49,0	$PSUM = 3,6339VSUM - 1171,2$	$PSUM = 3,6422VSUM - 1177,4$	$PSUM = 3,3432VSUM - 1060,6$
	49,5	$PSUM = 3,6292VSUM - 1170,3$		$PSUM = 3,4077VSUM - 1101,4$
	50,0	$PSUM = 3,6338VSUM - 1171,2$		$PSUM = 3,4183VSUM - 1109,6$
	50,5	$PSUM = 3,6381VSUM - 1174$		$PSUM = 3,3217VSUM - 1045,7$
	51,00	$PSUM = 3,6739VSUM - 1198,6$		$PSUM = 3,365VSUM - 1076,1$

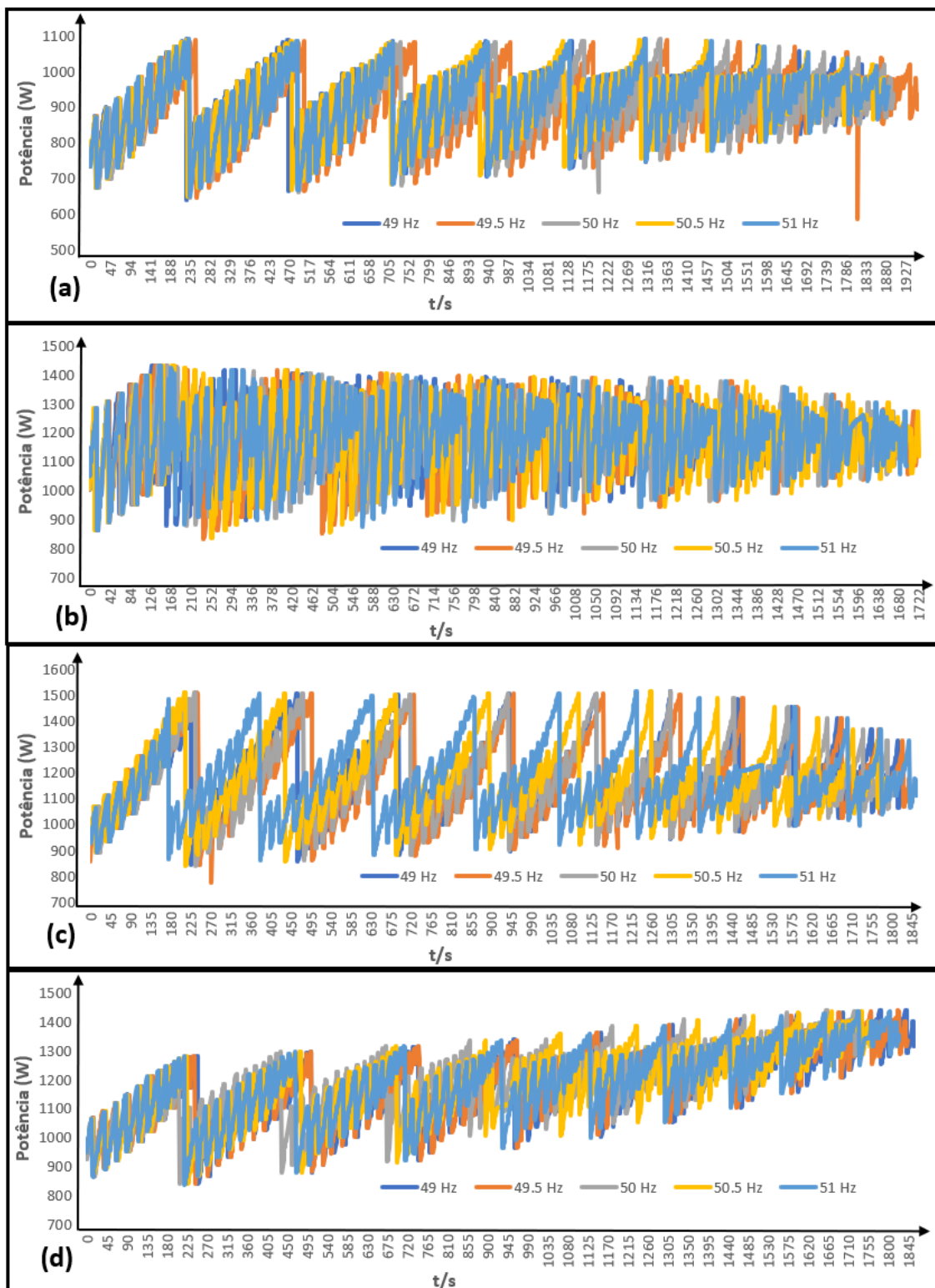


Figura 27 - Comportamentos da potência total consumida, para a carga elétrica 3; (a) primeira simulação, (b) segunda simulação, (c) terceira simulação, (d) quarta simulação.

Posteriormente, foram calculados os valores de erro médio, erro mínimo e erro máximo, entre os valores de potência total consumida adquiridos pelo contador de energia e o valor

de potência calculado através das equações de regressão linear da tabela 7, para cada nível de consumo e para o conjunto de todos os níveis de consumo. A figura 28, compara os erros obtidos das regressões lineares para cada nível de consumo (tabela 7 - situação A) e para o conjunto de todos os níveis de consumo (tabela 7 – situação B).

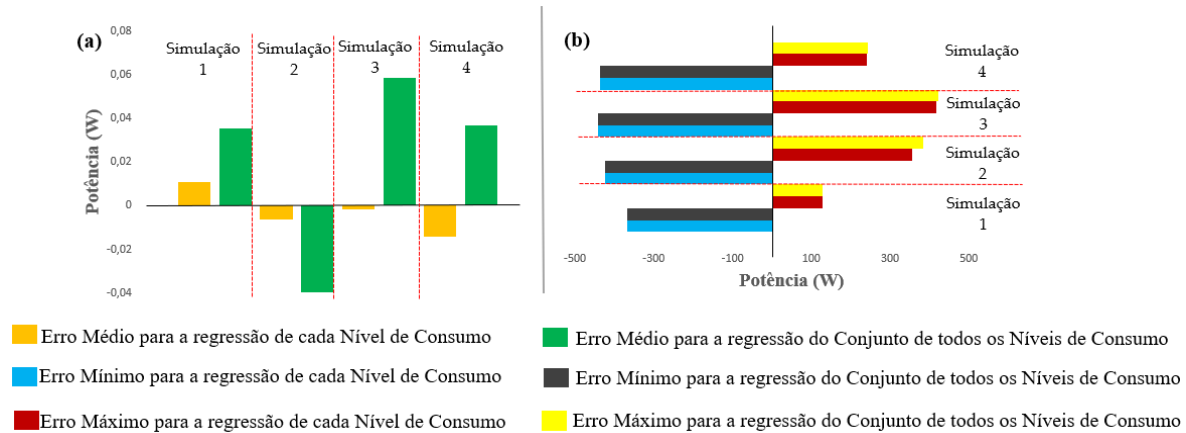


Figura 28 - Erros para a carga elétrica 3, variando o nível de consumo; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Na figura 28 - (a), foram comparados os erros médios calculados e verificou-se que os erros médios para cada nível de consumo foram aproximadamente iguais a zero, embora o erro médio da regressão de cada nível de consumo da simulação 3 obteve um valor inferior à das restantes simulações. Verificou-se também que os erros calculados para a regressão de todos os níveis de consumo, foram quase sempre maiores do que os erros calculados para a regressão de cada nível de consumo. Na figura 28 – (b) foram comparados os erros mínimos e máximos calculados e averiguou-se que tanto para a regressão de cada nível de consumo como para a regressão do conjunto de todos os níveis de consumo, a variação dos valores dos erros mínimo e dos erros máximo foram ínfimas.

Da mesma forma, foram calculados os valores de erro médio, erro mínimo e erro máximo, entre os valores de potência total consumida adquiridos na simulação, pelo contador de energia, e o valor de potência calculado através das equações de regressão linear das situações da tabela 7, para cada nível de frequência e para o conjunto de todos os níveis de frequência. A figura 29, compara os erros obtidos das equações de regressão linear para cada nível de frequência (tabela 7 - situação A) e as equações de regressão linear para o conjunto de todos os níveis de frequência (tabela 7 - situação C).

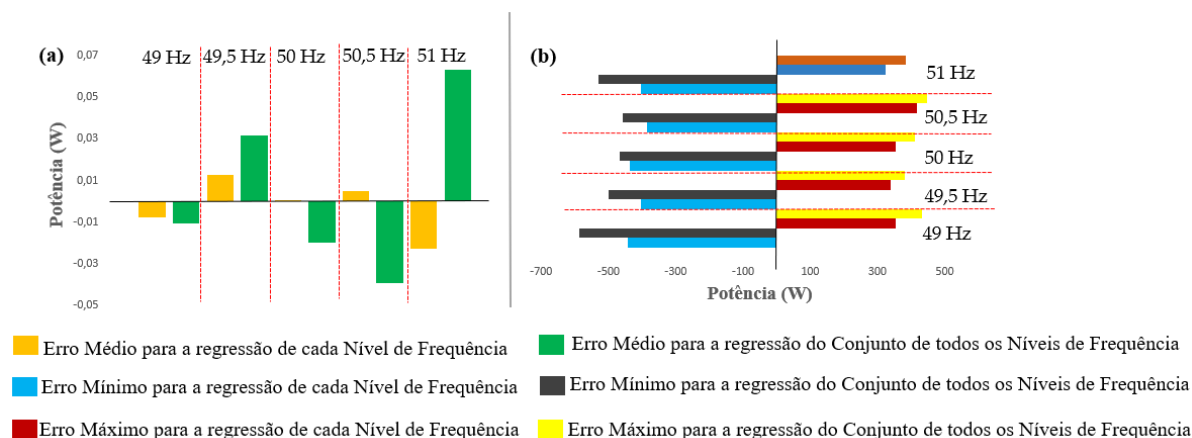


Figura 29 - Erros para a carga elétrica 3, variando o nível de frequência; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Na figura 29 – (a), o erro médio da regressão singular para a frequência de 50Hz foi muito menor do que os erros dos restantes níveis de frequência. No entanto, na figura 29 – (b), os erros mínimos e máximos da regressão do conjunto de todos os níveis de frequência, foram sempre maiores do que os erros da regressão de cada nível de frequência.

Conclui-se assim, que para a modulação de cargas elétricas deste tipo, relativamente à figura 28, devem ser escolhidas as equações da tabela 7 – situação A. Relativamente à figura 29, devem ser também escolhidas as equações da tabela 7 - situação A.

5.4. CARGA ELÉTRICA 4 – MOTORES DE INDUÇÃO

A tabela 8, ilustra a informação relacionada com a quantidade de resultados adquiridos dos ensaios laboratoriais da quarta carga elétrica.

Tabela 8 - Quantidade de resultados obtidos da carga elétrica 4.

Motor	Dados Esperados	Dados Reais obtidos	
		Antes da Limpeza	Depois da Limpeza
1	16775	13775	12988
2	16775	13571	12766

Com os resultados obtidos, foram desenvolvidos os gráficos da figura 30. O gráfico da figura 30 – (a), demonstra o comportamento da potência total consumida durante a simulação do motor 1, enquanto que o gráfico da figura 30 – (b), demonstra o comportamento da potência total consumida do motor 2. Analisando os dois gráficos da figura 30, observou-se que no início da execução das simulações existiu um pico de

potência mais elevado, devido à curva de potência de arranque dos motores. No gráfico da figura 30 – (a), o pico de potência foi mais elevado, porque quando se ligou o motor, este demorou cerca de 5 segundos até estar funcional. Na segunda simulação que se sucedeu, já ocorreu um arranque mais lento, onde se configurou o conversor de frequência, para que o motor demorasse cerca de 12 segundos até estar operacional, diminuindo assim o valor do pico de potência. Na figura 30, verificou-se ainda que o comportamento da potência total consumida evoluiu da mesma forma para os dois motores testados e que a variação de frequência provocou variações mínimas no comportamento da potência.

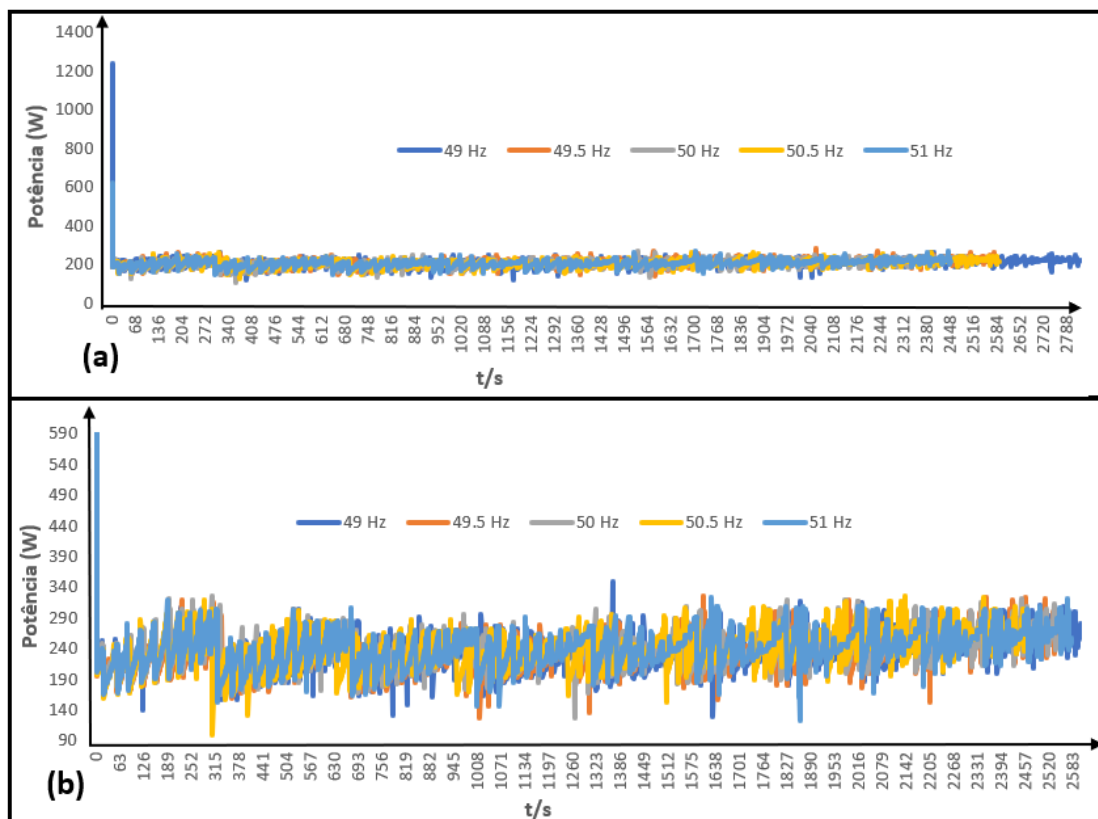


Figura 30 - Comportamentos da potência total consumida, para a carga elétrica 4; (a) Simulação Motor 1, (b) Simulação Motor 2.

Para esta carga elétrica, foram obtidas relações matemáticas para três situações diferentes, apresentadas na tabela 9. As equações de regressão linear da situação A, foram obtidas através da relação entre a potência total consumida (PSUM) e a soma das tensões de cada fase (VSUM), para cada nível de frequência fixo e para cada motor, ou seja, foram utilizados os valores para o nível de frequência específico para um dos motores e foram calculadas as equações de regressão linear. As equações de regressão linear da situação B, foram obtidas através da relação entre PSUM e VSUM para o conjunto dos níveis de frequência e para cada motor, ou seja, foram agregados todos os níveis de frequência e

calculou-se as equações para cada nível de consumo. As equações de regressão linear da situação C, foram obtidas através da relação entre PSUM e VSUM para cada nível de frequência, mas com os dois motores, ou seja, foi utilizado um nível de frequência das duas cargas e calculou-se as equações de regressão linear.

Tabela 9 - Relações matemáticas para a carga elétrica 4.

Motor	Nível de Frequência (Hz)	Situação A	Situação B	Situação C
1	49,0	$PSUM = 0,4183V_{SUM} - 65,058$	$PSUM = 0,4556V_{SUM} - 89,834$	$PSUM = 0,6108V_{SUM} - 176,06$
	49,5	$PSUM = 0,4798V_{SUM} - 103,33$		$PSUM = 0,6602V_{SUM} - 207,86$
	50,0	$PSUM = 0,4681V_{SUM} - 98,518$		$PSUM = 0,6428V_{SUM} - 195,23$
	50,5	$PSUM = 0,4618V_{SUM} - 95,259$		$PSUM = 0,6506V_{SUM} - 201,94$
	51,00	$PSUM = 0,4577V_{SUM} - 92,067$		$PSUM = 0,6451V_{SUM} - 196,5$
2	49,0	$PSUM = 0,7966V_{SUM} - 282,02$	$PSUM = 0,8211V_{SUM} - 296,54$	$PSUM = 0,6108V_{SUM} - 176,06$
	49,5	$PSUM = 0,8387V_{SUM} - 311,03$		$PSUM = 0,6602V_{SUM} - 207,86$
	50,0	$PSUM = 0,8088V_{SUM} - 286,61$		$PSUM = 0,6428V_{SUM} - 195,23$
	50,5	$PSUM = 0,8453V_{SUM} - 311,74$		$PSUM = 0,6506V_{SUM} - 201,94$
	51,0	$PSUM = 0,8181V_{SUM} - 292,56$		$PSUM = 0,6451V_{SUM} - 196,5$

Com as equações de regressão linear da tabela 9, foi possível obter o erro médio, erro mínimo e o erro máximo para cada motor e para o conjunto dos dois motores. Os erros obtidos, foram resultado da comparação entre a potência consumida obtida pelo contador de energia, durante a simulação, e a potência consumida calculada utilizando as equações de regressão linear para cada motor e o conjunto dos dois motores. A figura 31, compara os erros obtidos das equações de regressão linear para cada motor (tabela 9 – situação A) com a equação de regressão linear para o conjunto dos dois motores (tabela 9 – situação B).

Na figura 31 - (a), verificou-se que os erros médios para cada motor e para o conjunto dos dois motores foram aproximadamente zero. Observou-se também, que os erros médios para o conjunto dos dois motores foram relativamente maiores do que o erro médio para cada motor. Na figura 31 - (b), verificou-se que tanto para a regressão de cada motor, como para a regressão conjunta dos dois motores, os erros máximos e mínimos foram idênticos.

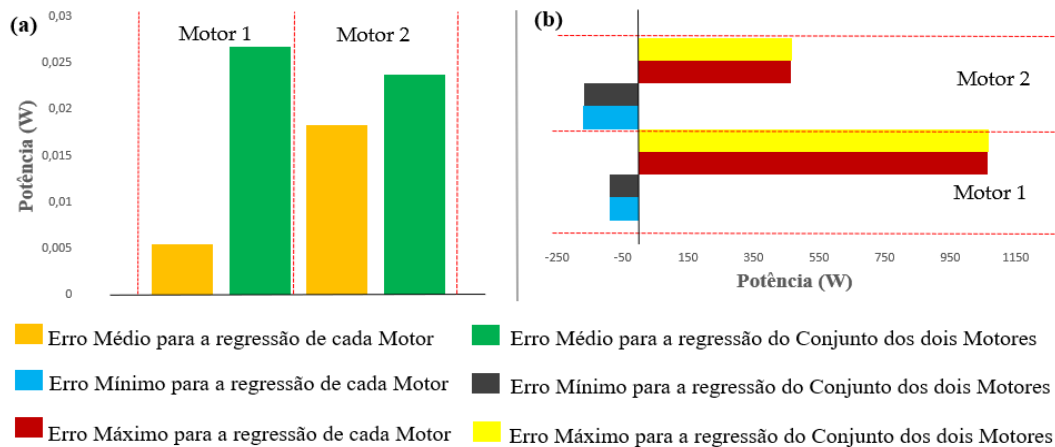


Figura 31 - Erros para a carga elétrica 4, variando o motor; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Da mesma forma, na figura 32 - (a), verificou-se que os valores dos erros médios foram aproximadamente iguais a zero e que os valores dos erros para a regressão do conjunto de todos os níveis de frequência, foram quase sempre superiores aos valores dos erros para a regressão de cada nível de frequência. Na figura 32 - (b), observou-se que tanto para a regressão de cada nível de frequência, como para a regressão do conjunto de todos os níveis de frequência, os valores dos erros máximos e mínimos foram idênticos.

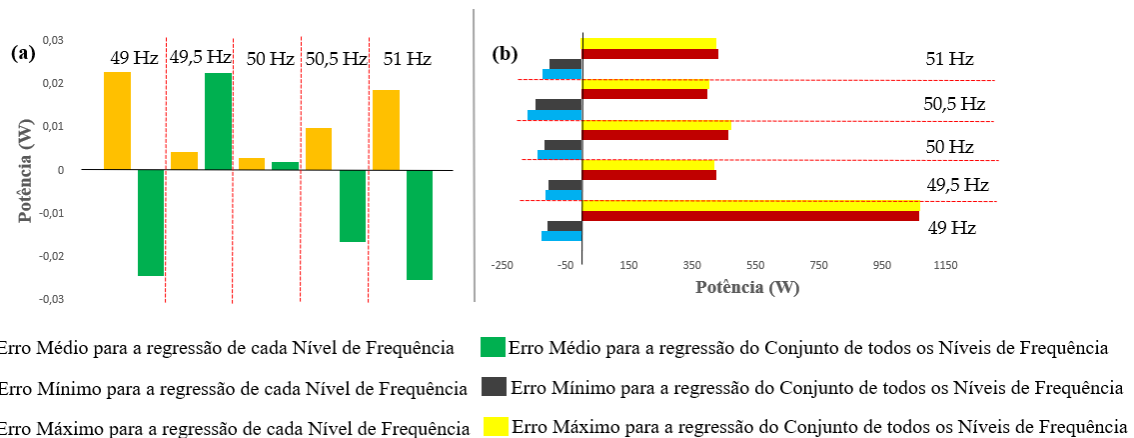


Figura 32 - Erros para a carga elétrica 4, variando o nível de frequência; (a) Erros médios, (b) Erros mínimos e máximos.

Conclui-se assim, que para a modulação de cargas elétricas deste tipo, relativamente à figura 31, para os dois motores, devem ser escolhidas as equações da tabela 9 – situação A. Relativamente à figura 32, para os valores de frequência 49Hz, 49.5Hz, 50.5Hz e 51 Hz, devem ser escolhidas as equações da tabela 9 - situação A, enquanto que para o valor de frequência de 50Hz, devem ser escolhidas as equações da tabela 9 - situação C.

5.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, todos os resultados dos casos de estudo foram analisados. Foram criados gráficos que demonstram o comportamento da potência total consumida durante os diversos ensaios laboratoriais, foram calculadas as relações matemáticas e desenvolvidos gráficos que apresentam os erros médios, os erros mínimos e os erros máximos das relações matemáticas.

No próximo capítulo irá ser apresentado as principais conclusões da dissertação, bem como a sugestão de trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

As utilizações de redes elétricas inteligentes tornaram-se num contexto interessante para a sociedade no que se refere aos sistemas elétricos de energia. Por isso, a modulação de cargas é muito importante no que diz respeito às *smartgrids* e *microgrids*. Contudo, antes da implementação deste tipo de projetos, é necessário analisar e testar os seus protótipos. Por esta razão, os simuladores digitais de tempo real satisfazem estas necessidades.

O objetivo do trabalho desta dissertação foi a modulação de cargas elétricas, baseadas nos dados experimentais adquiridos nos ensaios laboratoriais. Nesta dissertação foi apresentado um modelo para esse mesmo propósito, utilizando um sistema flexível de simulação através do conceito *Power Hardware-In-The-Loop* (PHIL). O sistema foi constituído por diversos equipamentos laboratoriais, sendo que o núcleo principal foi o simulador de tempo real *OP5600-OPAL-RT*. O *OP5600* tem a capacidade de controlar todos os outros equipamentos, obtendo a supervisão total da *microgrid* para poder analisar os dados medidos da energia. Para que fosse possível utilizar o conceito PHIL, foi necessário o uso de um amplificador de potência. Este amplificador de potência foi controlado pelo *OP5600* e serviu para alimentar as cargas elétricas que se pretendiam testar. Para a medição real da energia, foi utilizado um contador inteligente de energia, que através do protocolo TCP/IP, enviava os dados medidos para o *OP5600*. Depois de adquiridos todos os dados e

resultados foi necessário realizar uma limpeza e organização dos mesmos, de forma a poderem ser analisados e conseqüentemente ser possível calcular as relações matemáticas.

Para os casos de estudo, foram estabelecidos valores de parâmetros de energia. Para os valores de amplitude da tensão, foram definidos 11 valores diferentes, com um tamanho de passo de 4% do valor de referência (230V), sendo o valor mínimo e máximo de 184V e 276V. Para os valores de frequência, foram definidos 5 valores diferentes com um tamanho de passo de 1% do valor de referência (50Hz), sendo o valor mínimo e máximo de 49Hz e 51Hz. Por sua vez, os valores de ângulo de fase mantiveram-se inalterados durante todo o caso de estudo, onde o ângulo da primeira fase foi definido com o valor 0rad, enquanto que os ângulos da segunda e terceira fase foram definidos com os valores $2\pi/3\text{rad}$ e $-2\pi/3\text{rad}$, respetivamente. Através do conjunto destes valores, foram obtidos um vasto número de combinações, que representam vários cenários da rede. O caso de estudo foi dividido pelo tipo de carga elétrica testada. Como primeira carga elétrica, utilizou-se uma carga resistiva trifásica, com uma potência nominal de 8kW. Como segunda carga elétrica, foram utilizadas um conjunto de três cargas resistiva monofásicas, com uma potência nominal de 4kW. Como terceira carga elétrica, utilizou-se uma carga resistiva, que pode ser monofásica ou trifásica, com uma potência nominal de 30kW. Como quarta carga elétrica, foram utilizados dois motores elétricos trifásicos de indução, com potências nominais diferentes, um com 1.5kW e outro com 3kW.

Os resultados das simulações demonstram que o comportamento da potência total consumida sob mesmas condições de alimentação, em quase todas as cargas elétricas, evolui da mesma maneira, existindo ligeiros desvios relacionados com a variação do valor da frequência. Das relações matemáticas obtidas, para uma modulação mais precisa das cargas elétricas, o utilizador deve utilizar as várias equações de nível de consumo e de frequência com menor erro médio possível, que foram obtidas para cada carga testada. O utilizador pode também optar por utilizar uma só equação para cada carga, só que irá obter resultados com uma maior margem de erro em relação à utilização de mais do que uma equação. Pode-se afirmar, que foi cumprido o objetivo proposto para este trabalho, pois através das equações calculadas e com a verificação que o erro médio foi ínfimo, é possível antecipar em tempo real a potência total que cada carga elétrica consome, para qualquer valor de tensão e de frequência.

Como sugestão de trabalho futuro, seria interessante injetar vários tipos de geração na *microgrid*, podendo assim simular uma rede elétrica com geração integrada. Outro trabalho que pode ser feito, seria a criação de um modelo de *microgrid* em ambiente *Simulink*, e executar a simulação *offline* do modelo, com o objetivo de comparar com os resultados adquiridos nos ensaios laboratoriais mencionados nesta dissertação.

Referências Bibliográficas

- [1] M. Khorasany, D. Azuatalam, R. Glasgow, A. Liebman, and R. Razzaghi, “Transactive energy market for energy management in microgrids: The Monash microgrid case study,” *Energies*, vol. 13, no. 8, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/en13082010.
- [2] Endensa Portugal, “O que são as Smart Grids?”, [Online]. Available: <https://www.endesa.pt/particulares/news-endesa/inovacao/o-que-sao-smart-grids>. [Accessed 26-09-2020].
- [3] F. R. Pazheri, H. Khan, and I. Ahamed, “Smart grid implementation across the globe: A survey,” *2011 IEEE PES Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT India 2011*, pp. 1–5, 2011, doi: 10.1109/ISET-India.2011.6145352.
- [4] J. Soares *et al.*, “Two-stage Stochastic Model using Benders ’ Decomposition for Large-scale Energy Resources Management in Smart grids,” vol. 9994, no. c, 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2723339.
- [5] S. J. H. E. Baktiono *et al.*, “The CERTS Microgrid Concept , as Demonstrated at the CERTS / AEP Microgrid Test Bed Authors and Contributors :,” *CERTS*, no. October, pp. 7–46, 2018.
- [6] Z. Vale, H. Morais, P. Faria, H. Khodr, and J. Ferreira, “Distributed Energy Resources Management with Cyber-Physical SCADA in the Context of Future Smart Grids,” no. December 2015, 2010, doi: 10.1109/MELCON.2010.5476239.
- [7] G. Santos *et al.*, “House Management System with Real and Virtual Resources : Energy Efficiency in Residential Microgrid,” *2016 Glob. Inf. Infrastruct. Netw. Symp.*, pp. 1–6, 2016.
- [8] R. Morales González, S. Shariat Torbaghan, M. Gibescu, and S. Cobben, “Harnessing the Flexibility of Thermostatic Loads in Microgrids with Solar Power

- Generation,” *Energies*, vol. 9, no. 7, p. 547, 2016, doi: 10.3390/en9070547.
- [9] O. Abrishambaf, P. Faria, and Z. Vale, “Application of an optimization-based curtailment service provider in real-time simulation,” *Energy Informatics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1186/s42162-018-0006-6.
- [10] M. Khorram, P. Faria, O. Abrishambaf, and Z. Vale, *Demand Response Implementation in an Optimization Based SCADA Model Under Real-Time Pricing Schemes*, no. 641794. Springer International Publishing, 2019.
- [11] F. Fernandes *et al.*, “Genetic Algorithm Methodology applied to Intelligent House Control,” *2011 IEEE Symp. Comput. Intell. Appl. Smart Grid*, pp. 1–9, 2011.
- [12] J. F. Martins, A. G. Pronto, V. Delgado-Gomes, and M. Sanduleac, “Smart Meters and Advanced Metering Infrastructure,” *Pathways to a Smarter Power Syst.*, pp. 89–114, 2019, doi: 10.1016/b978-0-08-102592-5.00004-1.
- [13] D. Ramos, B. Teixeira, P. Faria, L. Gomes, O. Abrishambaf, and Z. Vale, “Use of Sensors and Analyzers Data for Load Forecasting : A Two Stage Approach,” pp. 1–16, 2020.
- [14] J. Bélanger, J; Venne, P; Paquin, “The What, Where and Why of Real-Time Simulation,” in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 37–49.
- [15] OPAL-RT, “Key considerations when selection amplifiers for your Power Hardware in the loop (PHIL) Testbed,” *OPAL-RT Technol.*, p. 18, 2019.
- [16] P. Forsyth, T. Maguire, and R. Kuffel, “Real time digital simulation for control and protection system testing,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 1, pp. 329–335, 2004, doi: 10.1109/pesc.2004.1355765.
- [17] H. T. Su, K. W. Chan, and L. A. Snider, “Hybrid simulation of large electrical networks with assymmetrical fault modelling,” *Int. J. Model. Simul.*, vol. 28, no. 2, pp. 124–131, 2008, doi: 10.1080/02286203.2008.11442459.
- [18] S. Mikkili and A. K. Panda, “Review of RT-LAB and steps involved for implementation of a simulink model from MATLAB to REAL-TIME,” *Int. J.*

-
- Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 14, no. 6, pp. 641–658, 2013, doi: 10.1515/ijeeps-2012-0031.
- [19] S. S. Noureen, V. Roy, and S. B. Bayne, “An overall study of a real-time simulator and application of RT-LAB using MATLAB simpowersystems,” in *2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference, IGESSC 2017*, 2018, vol. 2017-Novem, pp. 1–5, doi: 10.1109/IGESC.2017.8283453.
- [20] J. Bélanger, C. Dufour, and L. Schoen, “eMEGAsim : An Open High-Performance Architecture and Specification,” *Proc. Int. Conf. Power Syst.*, pp. 1–6, 2007.
- [21] L. Wei, “Tutorial: RT-LAB for Real-Time Simulation Applications in Power Electronics,” *South. Power Electron. Conf. 2017*, p. 71, 2017.
- [22] V. Hölttä, L. Palmroth, and a Overview, “Rapid control prototyping tutorial with application examples,” *Technology*, no. August, 2015.
- [23] D. Potnuru, A. M. K., and S. Ch., “Design and implementation methodology for rapid control prototyping of closed loop speed control for BLDC motor,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 99–111, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2016.12.005.
- [24] L. Palmroth, “Rapid control prototyping in test sequence design for condition monitoring of a hydraulic valve Rapid control prototyping in test sequence design for condition monitoring of a hydraulic valve,” no. January 2004, 2015.
- [25] OPAL-RT Technologies, “Rapid Control Prototyping | RCP solutions | OPAL-RT.”, [Online]. Available: <https://www.opal-rt.com/rapid-control-prototyping/> [Accessed 26-09-2020].
- [26] OPAL-RT Technologies, “Hardware in the loop | HIL simulation | OPAL-RT.”, [Online]. Available: <https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/> [Accessed 26-09-2020].
- [27] B. Sparn, D. Krishnamurthy, A. Pratt, M. Ruth, and H. Wu, “Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulations for Smart Grid Impact Studies,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-August, no. August, 2018, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586357.

- [28] S. J. Oh, C. H. Yoo, I. Y. Chung, and D. J. Won, “Hardware-in-the-Loop simulation of distributed intelligent energy management system for microgrids,” *Energies*, vol. 6, no. 7, pp. 3263–3283, 2013, doi: 10.3390/en6073263.
- [29] O. Abrishambaf, P. Faria, L. Gomes, J. Spínola, Z. Vale, and J. M. Corchado, “Implementation of a real-time microgrid simulation platform based on centralized and distributed management,” *Energies*, vol. 10, no. 6, 2017, doi: 10.3390/en10060806.
- [30] OPAL-RT Technologies, “Software-in-the-loop | SIL testing | SIL software.”, [Online]. Available: <https://www.opal-rt.com/software-in-the-loop/> [Accessed 26-09-2020].
- [31] M. F. Syed Ahamed, G. Tewolde, and J. Kwon, “Software-in-the-Loop Modeling and Simulation Framework for Autonomous Vehicles,” *IEEE Int. Conf. Electro Inf. Technol.*, vol. 2018-May, pp. 305–310, 2018, doi: 10.1109/EIT.2018.8500101.
- [32] M. Muresan and D. Pitica, “Software in the Loop environment reliability for testing embedded code,” *2012 IEEE 18th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag. SIITME 2012 - Conf. Proc.*, pp. 325–328, 2012, doi: 10.1109/SIITME.2012.6384402.
- [33] OPAL-RT Technologies, “Power hardware in the loop | HIL simulation | OPAL-RT.”, [Online] Available: <https://www.opal-rt.com/power-hardware-in-the-loop/> [Accessed: 26-09-2020].
- [34] C. Aldejohann, J. Maasmann, and C. Rehtanz, “Low voltage grid simulation environment for testing electric mobility hardware,” in *9th International: 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, PQ 2014 - Proceedings*, 2014, pp. 31–36, doi: 10.1109/PQ.2014.6866778.
- [35] F. Ebe *et al.*, “Comparison of power hardware-in-the-loop approaches for the testing of smart grid controls,” *Energies*, vol. 11, no. 12, pp. 1–29, 2018, doi: 10.3390/en11123381.
- [36] I. Serban and C. P. Ion, “A PHIL system designed for testing the dynamic response

-
- of microgrid units,” *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, pp. 4–9, 2017, doi: 10.1109/IEEEIC.2017.7977763.
- [37] N. D. Marks, W. Y. Kong, and D. S. Birt, “Impacts of linear controllers for power interfaces in ideal transformer model based power hardware-in-the-loop,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2019-Febru, pp. 472–479, 2019, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755001.
- [38] S. Alzate-Drada, K. Montano-Martinez, and F. Andrade, “Energy Management System for a Residential Microgrid in a Power Hardware-in-the-Loop Platform,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2019-Augus, pp. 2–6, 2019, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8974002.
- [39] Z. Zhang and L. Fickert, “Power hardware-in-the-loop test of the energy feedback device in urban rail transportation system,” *2018 19th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. EPE 2018 - Proc.*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/EPE.2018.8395944.
- [40] C. Seitzl, J. Kathan, G. Lauss, and F. Lehfuss, “Power hardware-in-The-loop implementation and verification of a real time capable battery model,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, no. June, pp. 2285–2290, 2014, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864974.
- [41] OPAL-RT Technologies, “Real-Time Digital Simulator: OP5600”, [Online]. Available: <https://www.opal-rt.com/simulator-platform-op5600/>. [Accessed: 26-09-2020]