

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Projeto e Desenvolvimento de um Laboratório de Máquinas Elétricas

José Pedro de Neto Castro

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador: Professor Rui Manuel Esteves Araújo

22 de julho de 2023

Resumo

Este documento serve de relatório de dissertação de final de ciclo de estudos do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cujo trabalho teve como principal objetivo o **projeto e desenvolvimento de um laboratório de máquinas elétricas**, na empresa IEME.

Neste âmbito, no presente documento, estão descritos todos os temas relativos ao trabalho desenvolvido, entre eles: os objetivos inicialmente definidos e os cumpridos, as tarefas estipuladas e as abordagens utilizadas, a utilidade do trabalho desenvolvido, os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do projeto, o projeto de laboratório propriamente dito, os resultados e, por fim, as considerações finais, incluindo também possíveis sugestões para trabalhos futuros.

Para atingir o principal objetivo, foi necessário, em primeiro lugar, realizar um estudo prévio dos conceitos relevantes associados ao tema. Em segundo lugar, foi realizado um levantamento do estado atual do laboratório, identificando todos os equipamentos e o *modus operandi*. Em terceiro lugar, recolheram-se os requisitos operacionais do laboratório. Em quarto lugar, foi apresentada uma sugestão de implementação de um “novo” laboratório, abordando as fontes de alimentação (tanto das máquinas auxiliares como máquinas a ensaiar), a instrumentação de medição das grandezas e a aparelhagem de comando, fazendo-se acompanhar pelos respetivos esquemas de ligação e diagramas de funcionamento, sendo ainda referidas considerações de segurança e boas práticas. Nesta fase, teve-se o cuidado de cumprir com as normas e padrões internacionais, bem como seguir as recomendações de entidades especializadas nas matérias abordadas.

Ao longo da realização do trabalho, houve também a oportunidade de acompanhar a realização de ensaios a máquinas elétricas e assistir a procedimentos de manutenção e reparação das mesmas, o que contribuiu para a aquisição de novas competências académicas, empresariais e sociais.

Palavras chave: máquina elétrica, motor, alternador, gerador, laboratório, ensaio, norma, medida.

Abstract

This document intends to be the report of the dissertation that concludes the study cycle of Master in Electrical and Computers Engineering, in the Faculty of Engineering of the University of Porto, which work's main goal was to design and develop an electrical machines test station, at IEME.

In this context, all the subjects regarding the work developed are depicted in this document, such as: the objectives that were set and completed, the tasks at hand and the approaches used to complete them, the usefulness of the assignment, the theoretical concepts required to develop the project, the project and design of the test station itself, the results obtained and final considerations, including suggestions about future iterations of the project.

In order to achieve the main objective, it was necessary to, before anything else, carry out preliminary studies regarding relevant concepts associated with the topic and its subjects. Secondly, a survey of the current state of the facilities was carried out, identifying the equipment and the *modus operandi*. The third task was to compile the operational requirements expected from the test station. Fourthly, a new design of the test facilities and its implementation was suggested, addressing energy supplies (for both auxiliary machines and the machines under test), measuring instruments and control equipment, followed up with connection diagrams and working principles, mentioning safety considerations and good practices. During this stage of development, to be in accordance with the international standards, to follow recommendations of specialized entities specialized in the matters entities and governing bodies, was always a concern.

Throughout the execution of the work, there was also the opportunity to witness tests on electrical machines, as well as some maintenance and repair procedures, which contributed to the acquisition of new academic, work and social skills.

Keywords: electric machine, motor, alternator, generator, test, test station, international standard, measurement.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostava de agradecer a todos aqueles que contribuíram para eu ser a pessoa que sou hoje. A quem me acompanhou ao longo deste percurso e o tornaram possível, obrigado.

Ao Professor Rui Esteves Araújo, pelo esclarecimento das dúvidas que me foram surgindo sobre os diversos temas no decorrer do trabalho, pela orientação na realização desta dissertação e das tarefas propostas, e pelo voto de confiança.

Ao Engenheiro Francisco Oliveira, por ter partilhado comigo a sua secretária na empresa nos últimos meses, onde estive sempre disponível e disposto a ajudar-me com as minhas dúvidas, transmitindo-me os seus conhecimentos e experiência, sobre engenharia e do mundo do trabalho. Agradeço também pela mentoria e por despertar e satisfazer a minha curiosidade nata.

À IEME e aos seus colaboradores, por me terem disponibilizado esta experiência. Em particular ao Sr. Paulino por me receber e incentivar a minha aprendizagem, e ao Sr. Joaquim Santos, técnico do laboratório, pela ajuda com os equipamentos e os ensaios.

Aos meus colegas, com quem partilhei este percurso, que me acompanharam nas aulas e nas sessões de estudo, e com quem discuti as matérias e realizei os trabalhos, alguns dos quais passaram a ser também grandes amigos.

Aos amigos, tanto aos mais antigos, como àqueles que a faculdade me deu a conhecer, por me animarem e ajudarem a descontraír nos momentos de maior stress, tornaram a minha experiência universitária mais agradável, proporcionando-me um ambiente bem disposto.

À minha família, por me apoiar durante todos estes anos de estudos.

À minha mãe, por me ter criado e educado, dando-me sempre as ferramentas necessárias para alcançar um futuro promissor. Por, ao longo destes anos, me ter libertado das tarefas mais aborrecidas, permitindo, por isso, que sempre me concentrasse nos estudos.

À minha irmã, que me viu crescer e cuidou de mim, com quem partilhei os melhores e os piores momentos, que me ajudou desde o primeiro dia, e que sempre teve como prioridade a minha felicidade. Ao meu cunhado, pelo incentivo, preocupação e reconhecimento.

À minha avó, que sempre me mimou e ajudou a crescer como pessoa.

Aos meus tios, por terem estado sempre presentes e cultivado o meu espírito crítico, contribuindo fortemente para a minha formação académica.

À minha sobrinha, pela inocência das suas gargalhadas e por me deixar envolver nas suas brincadeiras.

À minha namorada, por todo o carinho e dedicação, pela ajuda imprescindível, pela sua constante preocupação e por ter acompanhado de perto esta etapa. Por ser a minha companheira de aventuras e por trazer ao de cima o melhor de mim.

Ao meu pai, estou certo que está orgulhoso de mim e será sempre o meu anjo da guarda.

José Pedro de Neto Castro

“Each day we go to our work in the hope of discovering.”

N. Tesla

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivo da dissertação	1
1.2	Contexto e local de trabalho	2
1.3	Motivações	2
1.4	Abordagens e métodos de trabalho	3
1.4.1	Planeamento das tarefas e metodologias	3
1.5	Estrutura da dissertação	5
2	Máquinas elétricas, Laboratório de medidas e Aspetos normativos	7
2.1	Máquina elétrica rotativa	8
2.1.1	Máquina AC - Corrente Alternada	8
2.1.2	Máquina DC - Corrente Contínua	13
2.2	Laboratório de medidas	21
2.3	Aspetos normativos	22
2.3.1	Definição, Terminologia e Contexto	22
2.3.2	ISO 9001 - Sistemas de Gestão da Qualidade	24
2.3.3	IEC 60034 - Máquinas Elétricas Rotativas	25
2.3.4	IEC 60034 - Parte 1 - <i>Rating and Performance</i>	27
3	Ensaaios a máquinas elétricas	43
3.1	Ensaaios de receção	44
3.1.1	Medição da resistência óhmica dos condutores	44
3.1.2	Medição da resistência óhmica do isolamento	44
3.1.3	Índice de polarização (IP)	46
3.1.4	Ensaio em vazio	47
3.1.5	Ensaio de vibrações	47
3.1.6	Ensaio dos circuitos auxiliares	48
3.1.7	Ensaio de tensão rotórica - motores de rotor bobinado	49
3.1.8	Ensaio em curto-circuito e de oscilação de corrente - motores de rotor em curto-circuito	50
3.2	Ensaaios Complementares	50
3.2.1	Ensaio de onda de choque (<i>Surge Test</i>)	50
3.2.2	Ensaio de anel	51
3.2.3	Controlo do enchavetamento	53
3.2.4	Ensaio de rigidez dielétrica (Sobretensão)	53
3.2.5	Ensaio de campo girante	54
3.3	Ensaaios finais	54
3.3.1	Outros ensaios	55

3.3.2	Registo dos resultados	55
3.3.3	Condições de segurança e Local de ensaios	55
4	Laboratório de máquinas elétricas	57
4.1	Situação atual e aparelhagem existente	58
4.1.1	Alimentação	58
4.1.2	Medição das grandezas	65
4.1.3	Esquemas de ligação e funcionamento	66
4.1.4	<i>Layout</i>	68
4.1.5	Aparelhagem extra	69
4.2	Requisitos operacionais	71
4.2.1	Alimentação	71
4.2.2	Medição das grandezas	72
4.2.3	<i>Layout</i>	72
4.3	Projeto do novo laboratório	73
4.3.1	Alimentação	73
4.3.2	Medição das grandezas	76
4.3.3	Esquema final e Controlo do laboratório	83
4.3.4	Novo <i>layout</i> , Segurança e Boas práticas	97
5	Conclusões e Trabalho futuro	99
5.1	Considerações finais	99
5.2	Trabalho futuro	100
	Referências	101
A	IEC 60034	103
A.1	Partes constituintes da norma IEC 60034	103
B	Simbologia utilizada nos esquemas	105

Lista de Figuras

1.1	Logótipo da IEME.	2
2.1	Componentes de uma máquina elétrica rotativa.	9
2.2	Zonas limites de tensão e frequência para motores e geradores, excluindo geradores ou compensadores síncronos contemplados na IEC 60034-3 e geradores hídricos contemplados na IEC 60034-33.	31
3.1	Megaohmímetro.	45
3.2	Deformação dos calços de borracha em função da velocidade de rotação.	47
3.3	Orientação das medições de vibração.	48
3.4	Forma de onda do ensaio de onda de choque (<i>Surge Test</i>).	51
3.5	Imagem da câmara termográfica.	52
4.1	Primeiro esquema de funcionamento do laboratório atual.	59
4.2	Sistema <i>Ward-Leonard</i> da bancada de máquinas pequenas.	60
4.3	Características do Motor DC.	60
4.4	Características do Gerador AC.	60
4.5	Voltímetro da BMP.	65
4.6	Frequencímetro da BMP.	65
4.7	Amperímetro da BMP.	65
4.8	Wattímetro da BMP.	65
4.9	Antigo esquema de ligação de parte da BMP - Exemplo 1.	67
4.10	Antigo esquema de ligação de parte da BMP - Exemplo 2	67
4.11	Antigo esquema dos TT's.	68
4.12	Antigo esquema de ligação de parte da BMP - Exemplo 3	68
4.13	Disposição atual do laboratório.	69
4.14	<i>DC Drive</i> - DCS550 da ABB	74
4.15	Esquema de alimentação do laboratório.	75
4.16	Analizador de potência - Yokogawa WT333E.	77
4.17	Esquema de ligação dos circuitos dos TT's.	79
4.18	TI - Elmark MES-86/60 400/5 0.5	79
4.19	Esquema de ligação dos circuitos dos TI's.	82
4.20	Esquema de ligação dos circuitos dos TT's e TI's.	82
4.21	Esquema total de ligação do laboratório.	84
4.22	Sugestão da disposição da bancada do laboratório.	91
4.23	Fluxograma de funcionamento do laboratório.	95
4.24	Fluxograma do controlo da tensão.	96
4.25	Novo <i>layout</i> do laboratório.	97

B.1	Disjuntor.	105
B.2	Contactador.	105
B.3	Relé Térmico.	105
B.4	Contacto Normalmente Aberto (NA).	105
B.5	Contacto Normalmente Fechado (NF).	105
B.6	Transformador de Tensão (TT).	105
B.7	Transformador de Intensidade (TI).	105
B.8	Ponte Retificadora.	106

Lista de Tabelas

2.1	Combinações preferíveis de tensões e potências	29
2.2	Funções primárias das máquinas	31
3.1	Tensão a aplicar para medição da resistência de isolamento.	45
3.2	Avaliação do Índice de Envelhecimento.	46
3.3	Limite de velocidade de vibração (<i>mm/s</i>).	48
4.1	Características do analisador de potência WT333E.	76
4.2	Caso de estudo 1 - 1 TT por fase.	78
4.3	Caso de estudo 2 - 2 TT's por fase.	78
4.4	Caso de estudo 0 - Todos os TI's por fase.	80
4.5	Caso de estudo 1 - 2 TI's por fase (25 e 400 A).	80
4.6	Caso de estudo 2 - 3 TI's por fase (25, 75 e 400 A).	81
4.7	Caso de estudo 3 - 3 TI's por fase (25, 100 e 400 A).	81
4.8	Caso de estudo 4 - 3 TI's por fase (25, 150 e 400 A).	81
4.9	Comutadores rotativos.	86
4.10	Botões de pressão.	87
4.11	Sensores.	87
4.12	Contactores.	88
4.13	Transformadores de medida - TI's e TT's.	89
4.14	Relés Térmicos.	89
4.15	Disjuntores.	90
4.16	Nomenclaturas e siglas normalizadas utilizadas nos esquemas.	91
4.17	Lógica de comando dos contactores - reação aos comutadores rotativos.	93

Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas:

AC	Corrente Alternada (<i>Alternating current</i>)
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
EASA	Associação de Serviço de Aparelhos Elétricos
ETD	Sensor de Temperatura Embebido
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IEME	Indústria Eletromecânica de Motores
IEV	Vocabulário Eletrotécnico Internacional
ISO	Organização Internacional de Normalização
LA	Lado do Ataque
LOA	Lado Oposto ao Ataque
MT	Média Tensão
QMS	Modelo de Gestão de Qualidade
RMS	Valor Eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
THD	Distorção Harmónica Total
UC	Unidade Curricular

Símbolos:

U	Tensão
ΔU	Queda de tensão
I	Intensidade de corrente
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
S	Potência aparente
R	Resistência
V_f	Tensão de campo (<i>field</i>);
R_f	Resistência de campo;
I_f	Corrente de campo;
V_T	Tensão aos terminais da máquina;
V_A	Tensão da armadura;
R_A	Resistência da armadura;
I_A	Corrente da armadura;
E_A	Tensão interna do circuito da armadura;
ϕ	Fluxo do campo magnético;
ω_m	Velocidade angular mecânica;
rpm	Rotações por minuto
τ	Binário.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório são mencionados aspetos relativos ao contexto e local onde será realizado o trabalho, as motivações que o levaram a ser proposto pela entidade responsável, alguns dos aspetos que se enquadram na aquisição de conhecimento e formação profissional, os objetivos que se pretendem atingir aquando da conclusão e no decorrer do processo, algumas das abordagens que foram utilizadas e ainda a estrutura do documento.

1.1 Objetivo da dissertação

O trabalho de dissertação, que serve de conclusão de um ciclo de estudos, tem como objetivo principal ser um elemento enriquecedor da aprendizagem para quem o realiza.

As suas mais-valias são originárias de vários fatores, que diferenciam consoante o tipo de trabalho, tema e meio em que é desenvolvido. Desde: proporcionar tempo e ferramentas para debruçar a fundo sobre um tema de interesse; promover a oportunidade e liberdade de desenvolver algo revolucionário ou encontrar novas abordagens e aplicações para problemas existentes; dar a conhecer o mundo do trabalho e as suas implicações assim como pôr em prática o conhecimento adquirido nos últimos anos de estudo.

O grande foco deste trabalho prático foi **estudar, projetar e especificar um laboratório de medidas de máquinas elétricas**.

De um modo paralelo, esperava-se também adquirir conhecimentos relativos às normas e padrões internacionais que regem a indústria, assim como tirar o máximo proveito do local onde foi desenvolvida.

A dissertação elaborada revelou-se especialmente valiosa, por ter sido realizada em colaboração com a IEME, enquadrando-se no ambiente empresarial. Permitindo não só o desenvolvimento do projeto do laboratório de máquinas proposto, como foi também importantíssimo ao proporcionar o primeiro contacto com o mundo do trabalho e todas as suas especificidades: dando a conhecer os procedimentos da indústria onde se exerce engenharia no dia a dia, adquirindo competências sociais, promovendo o pensamento crítico e tomadas de decisão ao observar e acompanhar os profissionais que exercem as suas funções na área.

No decorrer deste documento estão descritas as vertentes consideradas contributivas para a valorização pessoal, académica e profissional, merecendo ser tidas em consideração e relatadas.

1.2 Contexto e local de trabalho

Esta dissertação encontra-se inserida na área da engenharia que diz respeito às máquinas eléctricas rotativas, com foco nos procedimentos de ensaio e obtenção de medições das grandezas envolvidas.

Tal como acima referido, trata-se de uma dissertação realizada no contexto empresarial, na IEME – Indústria Eletromecânica de Motores. Foi nas instalações da empresa que decorreram a maior parte das atividades.

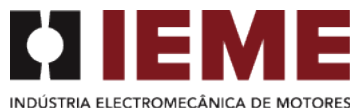


Figura 1.1: Logótipo da IEME.

Fundada em 1988 e os serviços prestados focam-se na manutenção, diagnóstico e posterior reparação de máquinas eléctricas de vários tipos. O seu trabalho engloba também o projeto e fabrico de motores eléctricos normalizados de baixa tensão que, tanto mecânica como eletricamente, tem características especiais que os diferem dos restantes existentes no mercado.

A qualidade dos serviços prestados e o foco no constante melhoramento da satisfação dos clientes são os principais lemas pelos quais todos os colaboradores se regem.

1.3 Motivações

A motivação da empresa por detrás da proposta deste tema reside no desejo de atualizar e modernizar os processos de realização e análise dos resultados dos ensaios efetuados a máquinas eléctricas, tanto ao nível do equipamento de medida como no que toca às ferramentas tecnológicas utilizadas. Garantindo ou até melhorando os padrões de qualidade praticados atualmente e tendo em atenção aspetos normativos pelos quais a empresa pretende obter certificação.

Os ensaios realizados às máquinas eléctricas constituem um ponto fulcral em toda a operação da empresa, uma vez que todas as unidades com que lidam passam obrigatoriamente por este processo. No que diz respeito ao serviço pós-venda (entenda-se: manutenção, diagnóstico e reparação) as máquinas são sujeitas a estes ensaios múltiplas vezes.

Assim sendo, o desejo de melhorar o processo de ensaio reside na diminuição do tempo gasto, dos custos (energéticos) associados e na certificação dos procedimentos por normas internacionais que os regulam. Assim como na automatização e digitalização dos processos.

Uma vez concluído este trabalho, pretendia-se que fosse possível dar uma nova vida ao processo de ensaio das máquinas, tornando-o mais eficiente e preparando-o para um futuro digital.

1.4 Abordagens e métodos de trabalho

Várias abordagens e métodos de trabalho foram adotados no desenvolvimento do desafio em mãos, uns mais eficazes na fase preparatória, outros mais adequados durante a realização das tarefas estipuladas.

Na fase inicial, grande parte do trabalho consistiu na leitura, análise e compreensão de documentos, entre eles: descrições normativas, especificações de padronização, métodos de realização de ensaios, implementações de laboratórios semelhantes, especificações técnicas de equipamentos de medida (nomeadamente no que diz respeito à exatidão das medições) e das próprias máquinas elétricas a analisar, e historial da empresa (procedimentos, catalogação, registos, etc...) de modo a que a solução encontrada seja o mais personalizada possível e satisfaça todas as necessidades previstas.

Na fase intermédia foi necessário, tal como mencionado anteriormente, trabalhar presencialmente na empresa, a fim de caracterizar o local destinado à instalação do laboratório, fazer o levantamento da aparelhagem existente, registar os atuais procedimentos de ensaio e capacidades técnicas que se pretende alcançar, assim como observar a sua execução e *workflow*.

Diferentes abordagens foram adotadas ao longo do projeto para encarar os problemas que surgiram, assim como adaptar consoante o tipo de trabalho a realizar ou soluções que se pretendiam encontrar. A subsecção seguinte (1.4.1) entra em mais pormenor nestes aspetos e sobre as tarefas propostas.

1.4.1 Planeamento das tarefas e metodologias

Nesta subsecção expõe-se as metodologias que foram aplicadas durante a realização do trabalho e as tarefas principais, que foram cumpridas.

1.4.1.1 Metodologia

Durante a realização desta dissertação, as diferentes etapas de desenvolvimentos requerem, por vezes, o estudo, projeto e planeamento de diversas matérias, e, noutras alturas, residem em procedimentos mais práticos.

Estudo, projeto e planeamento

As etapas iniciais foram aquelas que envolveram mais trabalho de pesquisa e estudo, nomeadamente a leitura das normas emitidas pelas organizações internacionais, a análise da legislação em vigor, o projeto do espaço onde será implementado o laboratório, a listagem dos requisitos dos aparelhos de medida e posterior análise das opções disponíveis no mercado, incluindo a revisão da documentação de tais aparelhos, estudando eventuais soluções de automatização tendo consciência em incorporar componentes dotados destas capacidades para uma futura implementação, e o registo escrito de todo o trabalho realizado.

Trabalho prático

Os procedimentos que envolveram trabalho no local, contemplando uma experiência mais prática, foram os relacionados com o levantamento dos equipamentos e da instalação existente na empresa, ficar a conhecer os requisitos dos novos aparelhos a projetar, contando com a realização ou acompanhamento de diversos ensaios a variadas máquinas elétricas, a fim de melhor conhecer o trabalho que é feito diariamente e a utilidade do laboratório.

1.4.1.2 Tarefas

A dissertação é um trabalho com uma duração alargada, na qual se passou por varias fases até à sua conclusão e apresentação, sendo possível listar as 6 principais tarefas a elaborar:

T1 → Recolha, análise e sistematização das normas técnicas e legislação aplicável, enriquecimento dos conhecimentos de máquinas elétricas;

T2 → Levantamento dos equipamentos existentes no local e averiguação dos requisitos do laboratório;

T3 → Acompanhamento e realização de ensaios a máquinas elétricas rotativas;

T4 → Planeamento do laboratório, especificação dos aparelhos: alimentação, comando, medida e proteção;

T5 → Elaboração de esquemas de ligação, tabelas de componentes e funções, e fluxogramas de funcionamento do laboratório;

T6 → Redação da Dissertação.

O primeiro ponto (**T1**) corresponde à fase inicial preparatória da dissertação e cujas conclusões e anotações importantes encontram-se apresentadas no capítulo 2. Consistiu essencialmente em aprofundar e solidificar conhecimentos relativos às máquinas elétricas, e na análise das normas e padrões existentes, juntamente com leis aplicáveis no contexto do trabalho.

As tarefas **T2** e **T3** foram desenvolvidas em colaboração e sobre a orientação da empresa, neste período tratou-se de:

→ Averiguar o espaço disponível para a implementação do laboratório de medidas, os equipamentos já existentes, alguns dos quais com possibilidade de virem a ser aproveitados, e quais as potencialidades dos dispositivos a incorporar.

→ Conhecer os ensaios que são efetuados nas máquinas, os procedimentos e precauções a tomar, as grandezas a medir e resultados esperados, enriquecidos pela análise critica dos mesmos.

As **T4** e **T5**, também concebidas com o aconselhamento da empresa, focaram-se em:

→ Planear os equipamentos que fazem parte do novo laboratório, nomeadamente as opções de alimentação das máquinas a ensaiar, os equipamentos de comando das diferentes configurações disponíveis, os sensores e instrumentos responsáveis pela recolha das grandezas a medir e o aparelho que as reúne, analisa e apresenta os resultados, e os dispositivos de proteção dos equipamentos e pessoas.

→ Desenvolver os esquemas de ligação elétrica dos constituintes do laboratório, composição das tabelas que contém informação dos possíveis estados dos dispositivos, representação através de fluxogramas o funcionamento do laboratório.

O ultimo ponto (**T6**) representa a documentação de todo o trabalho realizado, previa-se que o relatório da dissertação fosse escrito de forma continuada, à medida que as tarefas fossem elaboradas e, de uma maneira mais aprofundada, nas semanas finais, e tal decorreu como previsto.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1 → O primeiro capítulo serve de introdução ao documento e apresenta os objetivos, o contexto e o local de trabalho, as motivações da proposta, informações relativas às abordagens e métodos de trabalho e, por fim, explica a estruturação do documento.
- Capítulo 2 → Já o segundo capítulo serve para relatar os conhecimentos prévios que se estipulou necessários a adquirir na fase inicial de pesquisa, antes de começar a desenvolver o trabalho em si. Aborda as matérias: máquinas elétricas, de corrente alternada e corrente contínua; laboratório de medidas; e aspetos normativos, com incidência especial numa norma internacional.
- Capítulo 3 → No terceiro capítulo são detalhados os ensaios a máquinas elétricas, realizados na IEME, que se teve a oportunidade de acompanhar.
- Capítulo 4 → É no quarto capítulo que estão relatados os principais assuntos do trabalho desenvolvido neste projeto de dissertação, acerca do laboratório de máquinas elétricas. Incluindo o estado atual, os estudos efetuados que servem de suporte às escolhas efetuadas durante o projeto do novo laboratório, e esquemas de ligação e funcionamento.
- Capítulo 5 → O último capítulo serve de conclusão, dando mais uma vez nota do trabalho realizado, realçando os aspetos mais enriquecedores e referindo ainda trabalho futuro a desenvolver.

Capítulo 2

Máquinas elétricas, Laboratório de medidas e Aspectos normativos

Uma das primeiras fases de qualquer trabalho de engenharia deve englobar conhecer o melhor possível o problema que é apresentado: estudando as variáveis que lhe são constituintes; as restrições a serem consideradas; as especificações que devem constar na solução final; os diversos fatores a tomar em consideração; assim como averiguar se já existe alguma solução para o problema que se pretende resolver, no caso de existir é relevante perceber naquilo que tal solução difere da que se tenciona alcançar.

Para este trabalho, os conceitos **máquina elétrica**, **laboratório de medidas** e **aspectos normativos**, assim como respetivos sub-tópicos que deles derivam, foram considerados como importantes, e cujo conhecimento e entendimento permitiu aumentar a probabilidade de encontrar com êxito uma solução adequada ao projeto em mãos.

Este capítulo documenta os principais e/ou mais relevantes aspetos destes conceitos.

Uma vez que o “sujeito” principal do trabalho são as **máquinas elétricas rotativas**, é de elevada importância certificar que os conceitos fundamentais do seu funcionamento estão adquiridos. Apesar do tema ter sido abordado em várias Unidades Curriculares (UC) durante a licenciatura e mestrado, optou-se por fazer uma recapitulação geral, com o intuito de verificar e solidificar ainda mais os conhecimentos, e servir também de consulta futura, caso surjam dúvidas pontuais no decorrer do trabalho.

Assim sendo, a secção 2.1 é composta pela enumeração dos componentes das máquinas elétricas rotativas e pela explicação dos princípios de funcionamento das diversas tipologias.

A principal função de um **laboratório de medidas** é de servir como local apropriado, devidamente equipado com instrumentação específica, para realizar medições a variadas grandezas. Como tal, a área da instrumentação e medição é igualmente relevante no contexto do trabalho.

Infelizmente não foi possível frequentar a UC de Instrumentação e Medição, fruto da reformulação que o curso sofreu nos últimos 2 anos, e na qual são abordados temas que seriam oportunos e valiosos. Como tal, procurou-se obter algum conhecimento sobre o tema através de literatura

complementar. Na secção 2.2 é referido brevemente alguns aspetos ligados com este espaço, mais concretamente a importância que tem para a empresa que propôs o tema da dissertação.

Os **aspetos normativos** foram também objeto de estudo, devendo ao facto de serem de elevada relevância a nível global, sendo cada vez mais alvo de preocupação da indústria e da comunidade científica. Assim como ter interesse para a empresa onde o trabalho foi desenvolvido, na eventualidade de certificar os seus procedimentos e validar resultados. Como tal, na secção 2.3 é elaborado o tema das normas e padrões internacionais, assim como feita uma extensiva documentação da primeira parte da norma IEC 60034, relativa a máquinas elétricas rotativas, na secção 2.3.4.

2.1 Máquina elétrica rotativa

O conceito de máquina elétrica rotativa é possivelmente o de maior significância no contexto do trabalho a desenvolver, deste modo e traduzindo da descrição presente na *Electropedia* [1]: uma máquina elétrica é um transdutor energético capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica e vice-versa.

Durante o trabalho a desenvolver, as máquinas elétricas analisadas terão as duas funcionalidades descritas anteriormente, quando implementadas na sua localização final: umas tem como objetivo principal a transformação de energia elétrica em energia mecânica, recebendo assim também o nome de **motores** elétricos; outras funcionarão maioritariamente para transformar energia (mecânica) em energia elétrica, sendo possível referenciá-las como **geradores** elétricos. Há máquinas que funcionam em corrente contínua (DC) e outras que funcionam com corrente alternada (AC).

Inicialmente previa-se que, no decorrer deste trabalho, só se iria lidar com máquinas rotativas de corrente alternada, tendo sido portanto esse o principal foco do estudo da fase preparatória. Mais tarde porém, após o contacto com o equipamento existente e perante as soluções ponderadas, considerou-se importante também o estudo sobre máquinas de corrente contínua. Os resultados dessa pesquisa sobre máquinas DC, que decorreu numa fase intermédia do trabalho, estão apresentados na sub-secção 2.1.2, mais adiante no documento.

2.1.1 Máquina AC - Corrente Alternada

Há duas grandes classes de máquinas AC [2], as **máquinas síncronas** e as **máquinas assíncronas** (também designadas como **máquinas de indução**). A principal diferença entre elas é a velocidade de rotação, as máquinas síncronas rodam à mesma velocidade que o campo magnético (velocidade de sincronismo) e as máquinas assíncronas rodam a uma velocidade próxima da velocidade de sincronismo. Outra diferença construtiva é o facto das máquinas síncronas necessitarem de uma fonte externa para fornecer a corrente responsável pela criação do campo magnético, enquanto que, nas máquinas assíncronas (de indução), a corrente que cria este campo é fornecida através da indução magnética (dai o nome) nos enrolamentos, semelhante ao que acontece nos transformadores.

Máquinas Síncronas: Estas máquinas apenas desenvolvem binário à velocidade nominal específica, designada de velocidade de sincronismo, estando diretamente relacionada com as suas características construtivas e com a frequência da tensão de alimentação.

Máquinas Assíncronas: As máquinas assíncronas são máquinas cuja velocidade nominal é ligeiramente diferente da velocidade de sincronismo e não necessitam de fontes externas para funcionar. O campo magnético é criado pela própria máquina, devido aos seus aspetos construtivos.

Igualmente oportuno é conhecer os **constituintes** e **princípios** de funcionamento de uma máquina elétrica de corrente alternada. Expostos resumidamente nas subsecções seguintes.

2.1.1.1 Constituintes

Listados abaixo estão os constituintes das máquinas elétricas (com as respetivas designações em *inglês*), seguidas de uma breve descrição:

- **Invólucro** (*Enclosure*)
- **Estator** (*Stator*)
- **Rotor**
- **Veio ou Eixo** (*Shaft*)
- **Elementos complementares:**
 - **Caixa de terminais** (*Terminal box*)
 - **Ventilador** (*Cooling fan*)
 - **Chapa de características** (*Name plate*)

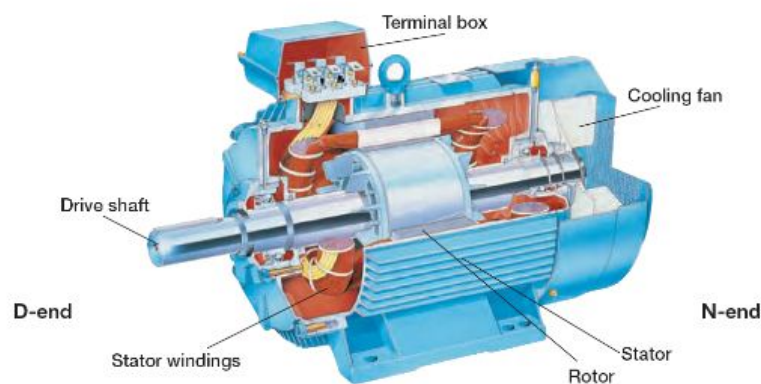


Figura 2.1: Componentes de uma máquina elétrica rotativa [3].

Invólucro (*Enclosure*)

É a estrutura (constituída pela carcaça e tampas) que envolve e dá suporte ao estator, podendo também apoiar o veio, através de rolamentos. Protege a máquina do meio exterior e muito frequentemente auxilia na transferência (passiva) de calor.

Não contribui para nenhum dos componentes magnéticos da máquina, mas possui os suportes utilizados para fixação ou movimentação. As suas características definem qual o Índice de Proteção (IP) da máquina e, deste modo, os locais e atmosferas onde poderá estar em funcionamento.

Estator (*Stator*)

É a parte estacionária da máquina, o seu circuito magnético, também designado por núcleo, consiste em laminas metálicas que possuem ranhuras. O uso de chapas está relacionado com a diminuição de perdas energéticas.

O enrolamento do estator é composto pelo circuito elétrico, ou vários dependendo do número de fases da máquina, e cujas extremidades estão reunidas no mesmo lugar, a caixa de terminais.

Rotor

É a componente rotativa de uma máquina elétrica, o circuito magnético é de igual modo laminado e com ranhuras. O seu material e disposição está em coerência com os utilizados no estator.

No que diz respeito ao circuito elétrico este pode ser construído de duas maneiras, designadas por **rotor em gaiola de esquilo** e por **rotor bobinado** [2].

Um **rotor em gaiola de esquilo** consiste numa série de barras condutoras dispostas em ranhuras encastradas na superfície do rotor, e curto-circuitadas nas extremidades por largos anéis. Este design é tipicamente apelidado de gaiola de esquilo, pelas semelhanças às rodas frequentemente presentes nas gaiolas dos *hamsters* e dos esquilos, que as usam para correr e se entreter.

O design das ranhuras do rotor contribuem muito para as características das máquinas, havendo diversas opções, cada uma com vantagens e desvantagens, perante a utilização que se pretende obter com a máquina. Uma permitem condições de arranque mais favoráveis, outras permitem alterar as curvas de característica (binário, velocidade) da máquina.

O **rotor bobinado**, o outro tipo de rotor alternativo ao em gaiola de esquilo, é composto por um circuito trifásico completo, que espelha os enrolamentos do estator. Os enrolamentos do rotor estão tipicamente ligados em estrela (Y) e as extremidades conectadas a anéis coletores no veio do rotor. Os enrolamentos estão por sua vez curto-circuitados através de escovas que deslizam sobre os anéis coletores.

O facto de se ter acesso ao circuito elétrico deste tipo de rotor possibilita modificar as curvas características no caso dos motores de indução, trazendo algumas vantagens à sua utilização. A construção é, porém, mais cara, e a manutenção mais dispendiosa, proveniente do desgaste com as escovas e os anéis coletores. Como tal a sua utilização, na generalidade, é muito pouco frequente.

Veio ou Eixo (*Shaft*)

O veio, também designado por eixo, está localizado no centro do circuito magnético do rotor e é a parte da máquina que contém os elementos rotativos.

É o responsável pela transferência de energia mecânica, de ou para o exterior (transferindo para o exterior nas máquinas que funcionam como motor e recebendo do exterior no caso dos geradores).

Elementos Complementares

Alguns dos elementos complementares que estão presentes na maioria das máquinas são os seguintes:

→ **Ventilador:** Responsável por dissipar o calor gerado nos enrolamentos elétricos para a parte exterior. As máquinas podem ser auto ventiladas, usando uma ventoinha montada diretamente ao veio, ou ter um sistema de refrigeração autónomo.

→ **Caixa de Terminais:** Contem os terminais dos enrolamentos e possibilita a comutação da ligação dos enrolamentos do estator em estrela (Y) e em triângulo (Δ).

→ **Chapa de Características:** Inclui informações variadas, como as principais grandezas estipuladas. É fundamental para o funcionamento seguro da máquina sem arriscar a integridade física dos componentes.

2.1.1.2 Princípios de funcionamento:

Os princípios de funcionamento das máquinas elétricas (transformadores, motores e geradores) residem nas propriedades do campo magnético, para converter energia de uma forma para outra, nomeadamente em 4 princípios básicos [2], sendo eles:

- A corrente num condutor produz um campo magnético na área envolvente;
- Um campo magnético variável no tempo induz uma diferença de potencial numa espira de um condutor quando o atravessa (o que acontece nos transformadores);
- Um condutor carregado, na presença de um campo magnético, sofre a ação de uma força eletromotriz induzida nele mesmo por parte do campo magnético (o que se verifica nos motores);
- Um condutor que se move num campo magnético sofre uma diferença de potencial induzida pelo campo (observado nos geradores).

De seguida estão apresentados, de forma breve, os modos de funcionamento das máquinas.

Gerador Síncrono

Num gerador síncrono, uma corrente DC é aplicada ao enrolamento do rotor que, devido à disposição construtiva de dito circuito elétrico, produz um campo magnético. O veio do gerador é então movido por ação externa, fazendo rodar o campo magnético no interior da máquina. Este campo magnético rotativo induz uma diferença de potencial, nos enrolamentos do estator que se

encontram em seu redor (surtem tensões trifásicas devido à disposição geométrica dos enrolamentos do estator) [2].

O rotor de um gerador síncrono é, na sua essência, um grande eletroímã e, por se ter que alimentar o seu circuito elétrico, com uma corrente DC, enquanto este roda, é necessário recorrer a um arranjo especial para energizar o enrolamento. Para tal há duas abordagens comuns de serem utilizadas, cada uma com as suas vantagens e desvantagens, e utilizadas em aplicações com diferentes finalidades e/ou necessidades:

→ Fazendo uso de uma fonte DC externa, fechando o circuito através de anéis coletores e escovas, que estão em permanente contacto uns com os outros;

→ Através de uma fonte de alimentação especial, montada diretamente no veio do gerador.

A rotação do veio pode ser efetuada com recursos variados, por exemplo: um motor diesel, uma turbina a vapor, uma turbina hidráulica ou similar. A velocidade de rotação é específica (e praticamente constante) consoante as características mecânicas do gerador (o seu número de polos) de modo a possibilitar a produção de energia elétrica, já que, nestas máquinas, a frequência da energia elétrica gerada está sincronizada com a frequência de rotação.

Motor Síncrono

Nos motores síncronos, a corrente de excitação fornecida ao rotor cria um campo magnético estático. Enquanto tensões trifásicas são aplicadas aos enrolamentos do estator da máquina, conduzindo ao aparecimento de correntes elétricas que produzem um campo magnético girante e uniforme.

Deste modo, dois campos magnéticos distintos estão presentes no interior da máquina. O que se verifica é que o campo gerado pelo rotor tende a alinhar-se com o do estator, tal como dois ímãs se tendem a alinhar quando colocados nas proximidades um do outro. Mas como o campo magnético do estator é rotativo, mudando constantemente de direção, o campo do rotor (juntamente com o próprio rotor) vai tentar sempre acompanhar o do estator [2].

O princípio básico de funcionamento do motor síncrono é que o rotor “persegue”, circularmente, o campo magnético rotativo do estator, nunca o chegando a alcançar.

Motor de Indução (Assíncrono)

As máquinas assíncronas são frequentemente designadas por máquinas de indução, uma vez que a diferença de potencial presente no circuito elétrico do rotor (provocando a circulação de corrente, que por sua vez cria o campo magnético do rotor) é **induzida** eletromagneticamente, ao invés de haver ligação física através de condutores elétricos [2]. Não necessitando de uma fonte externa para funcionar, diferenciando-as assim das máquinas síncronas.

Tal como referido anteriormente, esta é a principal diferença entre as máquinas síncronas e as assíncronas, o facto das assíncronas não necessitarem de uma corrente DC para funcionar.

Apesar de ser possível utilizar uma máquina de indução tanto como motor como gerador (tal como as síncronas), a sua operação como gerador de energia elétrica acarreta numerosas desvantagens, relacionadas principalmente com a geração/compensação de potência reativa e, portanto,

é raramente utilizada como tal. Apenas em pequena escala e como fontes de energia alternativas, como por exemplo “Sistemas de Recuperação de Energia”, sendo também aplicadas nalguns geradores eólicos.

Por esta mesma razão é muito frequente referir as máquinas assíncronas simplesmente como motores de indução, já que é esta a função que desempenham na maioria das situações.

O motor de indução é o tipo mais popular de motores AC, devido à sua simplicidade e facilidade de operação. Não possui um circuito separado, responsável pela criação do campo magnético no rotor, em vez disso, depende das ações do campo magnético do estator para induzir diferenças de potencial e correntes no circuito do rotor, semelhante ao que acontece nos transformadores. Na verdade, um motor de indução é basicamente um transformador rotativo (tirando os efeitos das variações de velocidade).

Um motor de indução opera normalmente a uma velocidade próxima da de sincronismo mas nunca chega a atingir tal velocidade. Tem sempre de haver uma “movimentação relativa”, de modo a induzir a diferença de potencial necessária no circuito elétrico do rotor, responsável pela criação do campo magnético. Esta diferença de potencial, induzida pela diferença de orientação (posição/deslocamento) que existe entre os campos magnéticos do estator e do rotor, produz uma corrente no rotor. Corrente esta que interage com o campo magnético do estator, resultando na rotação do veio da máquina.

Um motor de indução tem, fisicamente, o mesmo estator que uma máquina síncrona mas difere na construção de rotor. Há dois tipos de rotor de motores de indução que podem ser colocados no interior do estator. A um dá-se o nome de rotor em gaiola de esquilo, enquanto que o outro tem o nome de rotor bobinado, ambos foram caracterizados com mais detalhe na secção 2.1.1.1.

2.1.2 Máquina DC - Corrente Contínua

O conhecimento dos princípios de funcionamento e constituintes das máquinas de corrente contínua (DC) não foi prevista na fase preparatória, dado que o foco de operação se pensava ser as máquinas AC.

Porém, deparou-se com a realidade que a empresa continua a prestar um volume considerável de assistência a este tipo de máquinas. Para além disso, o motivo que incentivou fortemente a pesquisa e o aprofundamento do conhecimento teórico nesta matéria foi o desejo de aproveitar parte de uma solução já existente no local, que tem um motor DC como principal constituinte.

Havendo necessidade de analisar e categorizar os elementos que fazem parte do laboratório já existente, assim como a busca pelo método ideal de os controlar, tirando o maior proveito do material já existente, optou-se por dedicar tempo a conhecer melhor este tipo de máquina. Não se tendo entrado em tanto detalhe como nas máquinas AC, a informação apresentada mostrou-se suficiente para o entendimento requerido na realização do trabalho.

As máquinas de corrente contínua tem várias semelhanças com as máquinas de corrente alternada, na medida de se apoiarem em fenómenos físicos semelhantes, relacionados com os campos elétricos e magnéticos e as interações entre eles.

De um modo que se assemelha ao das máquinas síncronas, as máquinas DC também necessitam de um circuito responsável por criar um campo magnético (situado no estator, também denominado por circuito indutor), e outro composto pelos enrolamentos (presentes no rotor, também denominado por armadura) que atravessam o campo magnético gerado e por onde circula a corrente que com este reage, dando origem aos movimentos das máquinas já estudados.

Nestas máquinas há necessidade de converter corrente alternada, que circula nas espiras do rotor, em corrente contínua que aparece aos seus terminais, e vice-versa. Ao componente responsável por este efeito dá-se o nome de comutador. É neste processo que reside a maior complexidade da construção das máquinas, assegurar uma conexão consistente e uma conversão satisfatória.

Ganharam muita popularidade, principalmente os motores, na primeira metade do século XX, por diversas razões, uma delas sendo a aplicação em situações onde havia necessidade de operar a máquina numa gama ampla de velocidades. Não tendo sido ainda desenvolvidas e adotadas soluções baseadas em eletrónica de potência para o controlo de motores AC, os motores DC eram essenciais em numerosas aplicações que exigiam o controlo de velocidade [2].

Existem 5 tipos principais de motores DC:

- **Motor DC de excitação independente**
- **Motor DC em derivação (*shunt* ou paralelo)**
- **Motor DC de ímanes permanentes**
- **Motor DC série**
- **Motor DC composto**

Estes diversos tipos de motores variam principalmente na maneira como estão ligados os seus circuitos principais. Diferenças que levam a que a maneira de controlar a velocidade também varie. De seguida estão resumidas: as características principais de cada tipo de motor; as diversas implicações à regulação de velocidade; assim como a aplicabilidade de cada uma delas.

Motor DC de excitação independente

Estes motores são construídos de forma a que os circuitos, de campo e da armadura, são alimentados por fontes externas e independentes uma da outra.

A separação dos circuitos, e subsequente controlo de forma autónoma, permite o comando mais minucioso das grandezas a aplicar ao motor.

Ter o controlo independente dos dois circuitos conduz a uma maior flexibilidade no ajuste das características de velocidade e binário da máquina.

Motor DC em derivação (*shunt* ou paralelo)

Para este tipo de construção de motores, o circuito do campo é alimentado através dos mesmo terminais que alimentam o induzido, estando os dois em paralelo.

Motor DC de ímanes permanentes

Nos motores de ímanes permanentes o circuito responsável pela criação do campo magnético é substituído por ímanes.

Tal leva a que o motor seja mais eficiente, dado que não existem as perdas Joule associadas ao circuito de campo. A sua construção torna-se também mais simples devido à sua ausência.

Este tipo de motores tem, porém, as suas desvantagens, sendo elas principalmente:

- O campo magnético criado pelos ímanes é, por norma, mais fraco quando comparado com aquele criado por circuitos indutores;
- Os limites de velocidade e binário tendem a ser inferiores às restantes máquinas, derivado dos materiais tipicamente utilizados na construção serem menos resistentes;
- Correm o risco de serem desmagnetizados, dado que:
 - A circulação de corrente no circuito do induzido cria por si só um campo magnético, o chamado “efeito de armadura”, caso este efeito seja muito intenso, devido à elevada circulação de corrente, e a força magnetomotriz gerada se torne de igual forma considerável, pode levar à desmagnetização dos polos;
 - O aquecimento excessivo do motor, fruto de períodos prolongados em sobrecarga ou derivados de um choque, como uma queda ou uma pancada, podem alterar as características físicas do metal que constitui os ímanes e levar à sua desmagnetização.

Motor DC série

Para estes motores, os circuitos de campo e do induzido estão ligados em série.

A construção dos motores utilizando este método faz com que as características terminais sejam muito diferentes das restantes. Sendo o fluxo do campo magnético criado diretamente proporcional à corrente que circula no induzido (até ser atingido o ponto de saturação magnética), significando assim que o aumento de carga faz aumentar o fluxo, diminuindo assim a velocidade.

O motor série possui assim uma característica de binário/velocidade muito acentuada, onde o binário varia com o quadrado da corrente. Tornando-o assim o tipo de motor DC que consegue fornecer mais “binário por ampere”, sendo favorável em aplicações que requerem muito binário.

Motor DC composto

Um motor composto tem o circuito de campo dividido em duas componentes, uma em paralelo com o circuito da armadura e outra em série.

Este tipo de construção combina as melhores características dos dois tipos de motores, nomeadamente um bom binário de arranque, tal como os série, e quando está sem carga a velocidade não dispara, semelhante aos derivação.

Existem 2 tipos de configurações dos motores compostos, designadas por “composto acumulativo” e “composto diferencial”, dependendo como são ligados os terminais das bobinas de campo. Usa-se sempre a configuração acumulativa, já que a diferencial traz muitos problemas a nível de estabilidade.

A configuração diferencial pode ocorrer acidentalmente se o fluxo de sentido de potência for invertido, deste modo, estes motores necessitam de ser equipados com dispositivos de proteção que os desligue da rede quando tal acontecer.

2.1.2.1 Controlo de velocidade

As máquinas DC tornaram-se populares, tal como referido previamente, devido à relativa facilidade em controlar a velocidade, principalmente sendo necessário o seu ajuste numa ampla gama de valores. Não existindo as soluções à base de eletrónica de potência, que foram desenvolvidas nos anos mais tarde, as máquinas de corrente contínua e os métodos mais rudimentares de controlo de velocidade representavam a melhor opção de implementação em muitas áreas da indústria [4].

O binário induzido no veio da máquina é função do fluxo do campo magnético e da corrente na armadura, pelo que qualquer alteração destas grandezas faz alterar a velocidade da máquina.

A cada tipo construtivo corresponde um método preferível para controlar a velocidade, alterando a forma como as forças magnéticas interagem entre si, tal é conseguido alterando: a intensidade do campo magnético; a corrente no induzido, que fará com que o campo magnético criado em seu redor também se altere; ambas em simultâneo. Estas grandezas podem ser alteradas recorrendo: ao ajuste da resistência dos circuitos do motor (indutor e/ou induzido); variando a tensão aplicada aos circuitos.

Seguidamente serão apresentadas as várias técnicas implementadas, realçando a forma como as diversas grandezas interagem entre si, onde:

$V_f \rightarrow$ Tensão de campo (*field*);

$I_A \rightarrow$ Corrente da armadura;

$R_f \rightarrow$ Resistência de campo;

$E_A \rightarrow$ Tensão interna do circuito da armadura;

$I_f \rightarrow$ Corrente de campo;

$\phi \rightarrow$ Fluxo do campo magnético;

$V_T \rightarrow$ Tensão aos terminais da máquina;

$V_A \rightarrow$ Tensão da armadura;

$\omega_m \rightarrow$ Velocidade angular mecânica;

$R_A \rightarrow$ Resistência da armadura;

$\tau \rightarrow$ Binário.

Alterar a resistência do circuito de campo

Aumentar a resistência do circuito responsável pela criação do campo magnético, não alterando a sua tensão de alimentação, faz diminuir a corrente que nele circula. A diminuição da corrente faz de igual modo diminuir o fluxo do campo gerado.

A diminuição do fluxo causa uma queda instantânea na tensão interna gerada, esta queda de tensão faz aumentar (consideravelmente) a corrente no circuito induzido.

Tal como referido anteriormente, o binário induzido no rotor depende do fluxo do campo e da corrente na armadura, porém neste caso, a corrente aumenta de forma mais acentuada do que a diminuição do fluxo, conduzindo ao aumento do binário, acelerando a máquina.

O aumento da velocidade cria porém uma reação na tensão gerada internamente, aumentando-a de igual forma. Este aumento de tensão interna faz diminuir a corrente no induzido que leva à diminuição do binário até que este iguale o binário imposto pela carga e a velocidade estabilize, com um valor superior ao anterior.

Em suma:

- Aumentar R_f faz diminuir I_f $\left(= \frac{V_T}{R_f}\right)$;
- Diminuir I_f faz diminuir ϕ ;
- Diminuir ϕ faz diminuir E_A $(= K \cdot \phi \cdot \omega_m)$;
- Diminuir E_A faz aumentar I_A $\left(= \frac{(V_T - E_A)}{R_A}\right)$;
- Aumentar I_A faz aumentar τ_{ind} $(= K \cdot \phi \cdot I_A)$;
- O aumento de I_A é dominante sobre a diminuição de ϕ ;
- Aumentar τ_{ind} faz com que $\tau_{ind} > \tau_{carga}$ que faz subir ω_m ;
- Aumentar ω_m faz aumentar E_A $(= K \cdot \phi \cdot \omega_m)$;
- Aumentar E_A faz diminuir I_A ;
- I_A diminui até $\tau_{ind} = \tau_{carga}$ e ω_m superior à inicial.

Quanto maior a resistência, menor é a corrente, maior é a velocidade. O contrário também se verifica, quanto menor a resistência, maior a corrente, menor a velocidade.

Uma vez que aumentar a corrente faz diminuir a velocidade, há um limite mínimo da velocidade que é possível atingir, que ocorre quando o limite máximo de corrente que circula no circuito do campo é atingido.

Deste modo, recorrendo apenas ao ajuste da resistência de campo, é somente possível alterar a velocidade para valores acima do nominal, já que diminuir a velocidade implicaria diminuir a resistência e tal não é exequível. Outra opção reside em aumentar a corrente neste circuito, mas tal poderia incorrer em danos nos enrolamentos.

O aumento da velocidade é causado por uma diminuição de fluxo, o binário induzido deve diminuir à medida que a velocidade aumenta, de modo a que a corrente na armadura (no circuito induzido) não ultrapasse os limites pré-estabelecidos. Como a potência é o produto do binário e da

velocidade, e sabendo que o binário máximo diminui com a velocidade, significa que a potência máxima do motor é constante, tendo ainda em atenção que o binário máximo no veio da máquina varia com o inverso da velocidade do motor.

Para velocidades muito baixas, o controlo recorrendo à alteração da resistência de campo pode não ser o mais desejável. Quando se verificar que o aumento da corrente da armadura (I_A) deixa de ser superior à diminuição do fluxo (ϕ), não obtendo o resultado pretendido. logo evita-se o seu uso para controlar motores que operam a velocidades de rotação baixas.

Este método altera também as curvas características da velocidade em função do binário induzido (ω_m/τ_{ind}), nomeadamente o declive e as ordenadas na origem.

Alterar a tensão da armadura

Aumentar a tensão no induzido (armadura) sem alterar a tensão no circuito de campo, faz aumentar a corrente na armadura. À medida que a corrente sobre, o binário induzido aumenta, fazendo com que a velocidade de rotação aumente.

O aumento de velocidade porém faz subir a tensão interna gerada, o que por si leva à diminuição da corrente no induzido. Tal diminuição de corrente faz reduzir o binário até ao ponto de equilíbrio com a carga, agora com uma velocidade superior à inicial.

Este método só é possível de ser implementado nos motores de excitação independente e em derivação, para que a tensão possa ser ajustada como pretendido.

Sintetizando:

- Aumentar V_A faz aumentar I_A ;
- Aumentar I_A faz aumentar τ_{ind} ;
- Aumentar τ_{ind} faz com que $\tau_{ind} > \tau_{carga}$ que faz subir ω_m ;
- Aumentar ω_m faz aumentar E_A ;
- Aumentar E_A faz diminuir I_A ;
- I_A diminui até $\tau_{ind} = \tau_{carga}$ e ω_m superior à inicial.

Quanto menor for a tensão do induzido, mais lentamente roda. O oposto também se verifica, quanto maior for a tensão aplicada, mais rápido gira.

Por este motivo, há um limite máximo de velocidade que é possível alcançar, para que não seja ultrapassado o limite imposto à tensão do circuito da armadura.

Assim sendo, apenas se consegue controlar o motor para velocidades inferiores à nominal, já que para se aumentar a velocidade teria-se que aumentar a tensão, o que poderia incorrer em danos no circuito.

O fluxo magnético no motor é constante, uma vez que não se alteram as características deste circuito, assim o binário máximo depende da corrente máxima na armadura e não da velocidade de rotação. Sendo a potência fornecida pelo circuito dada por $P = \tau_{ind} \cdot \omega_m$, a potência máxima é diretamente proporcional à velocidade.

Este método tem a mais valia de não alterar o declive das curvas características da velocidade em função do binário induzido (ω_m/τ_{ind}), altera porém as ordenadas na origem.

Combinação de alterar a resistência de campo e da tensão na armadura

Como averiguado acima, a alteração da resistência do campo magnético permite elevar a velocidade para valores acima do estipulado, enquanto que o ajuste na tensão da armadura proporciona operar o motor para valores de velocidade inferiores ao nominal. Concluindo assim que os dois métodos são complementares.

Ao combinar os dois métodos é possível obter gamas de operação muito alargadas, na ordem de 40 para 1 e os motores em derivação e os de excitação independente são os mais indicados nos casos que se pretende fazer o ajuste de velocidade.

Em ambos os casos, o aquecimento dos condutores, causado pela corrente que os atravessa, é o fator limitativo aos limites de binário e potência da máquina. Havendo uma diferença grande entre estes mesmos limites de binário e potência. O que leva a que, para operar os motores de forma segura, é necessário impor limitações de potência e binário.

Alterar a resistência da armadura

A adição de resistências em série com o circuito induzido é um método que, apesar de teoricamente ser possível de ser implementado para reduzir a velocidade do motor, raramente o é, devido à ineficiência energética, conduzindo a perdas significativas no regime de serviço permanente.

A sua implementação leva ao aumento drástico da inclinação da curva característica do binário em função da velocidade, resultando na redução acentuada de velocidade quando acoplado a uma carga. É por vezes utilizada no arranque de motores DC série.

Sistema Ward-Leonard

O sistema *Ward-Leonard* foi um sistema desenvolvido e apresentado por Henry Ward Leonard nos finais do séc XIX como um método de controlar a velocidade de um motor DC.

Consiste na utilização de um motor AC que fornece energia mecânica a um gerador DC, que por sua vez é utilizado para alimentar o motor DC, sendo um sistema muito versátil [2].

A tensão da armadura do motor pode ser controlada variando a corrente de campo do gerador. Esta tensão do circuito induzido permite que a velocidade do motor varie de forma suave numa gama alargada, desde valores muito baixos, até à velocidade nominal do motor. Para ajustes de velocidade acima da estipulada reduz-se a corrente do circuito de campo magnético do motor. Permitindo assim o controlo total da velocidade do motor, graças à flexibilidade da configuração.

Inverter o sentido de rotação do motor pode ser conseguido invertendo a polaridade da alimentação do circuito do campo magnético no gerador, o que fará com que a polaridade da alimentação da armadura do motor seja também invertida, trocando o sentido de rotação.

Outra vantagem do sistema Ward-Leonard são as suas propriedades de "regeneração de energia", a devolução de energia elétrica à rede nalgumas aplicações concretas, que podem reduzir os custos totais de operação.

As desvantagens deste sistema residem no facto de terem que ser usadas máquinas auxiliares, que para além de acarretarem custos significativos, torna o sistema como um todo menos eficiente. Devido a estes fatores, este sistema foi entretanto substituído por aplicações novas baseadas na eletrónica de potência que foram sendo desenvolvidas e aplicadas na indústria.

A relevância de um sistema praticamente obsoleto como este, na era tecnológica em que vivemos e no desenvolvimento deste trabalho de dissertação reside no facto de ser um dos sistemas que já se encontravam no local onde se pretendia desenvolver o trabalho, tendo sido necessário entender melhor o seu funcionamento e aplicações, assim como possível utilidade de reaproveitamento.

2.1.2.2 Aplicações e precauções

As máquinas DC tornaram-se populares, tal como referido previamente, devido à relativa facilidade em controlar a velocidade, principalmente sendo necessário o seu ajuste numa ampla gama de valores. Não existindo as soluções à base de eletrónica de potência, que foram desenvolvidas nos anos mais tarde, as máquinas de corrente contínua e os métodos mais rudimentares de controlo de velocidade representavam a melhor opção de implementação em muitas áreas da indústria.

Como qualquer equipamento, as máquinas DC requerem que sejam tomadas as devidas precauções durante a operação. Dadas as características físicas provenientes de alguns tipos de construção, são necessárias medidas adicionais para manter o bom funcionamento da máquina, impedindo que passe a operar em situações de perigo, onde a velocidade ultrapasse os limites construtivos.

Alguns dos equipamentos que são implantados juntamente dos motores DC são:

- Disjuntores ou fusíveis para proteger contra curto-circuitos;
- Relés térmicos de proteção contra sobrecargas de longa duração;
- Disjuntores ou relés contra correntes de arranque excessivas;
- Tacómetro para medir (e ser possível de controlar) a velocidade do motor;
- Qualquer outro dispositivo que se considere relevante dadas as condições de operação.

Fazendo ainda referência a alguns aspetos a ter em conta na proteção dos motores DC:

Os Relés de perda de campo são dispositivos responsáveis por proteger o motor no caso do corte da alimentação do circuito responsável pela criação do campo magnético. Já que em determinadas construções, a característica de binário é inversamente proporcional à intensidade do campo magnético. Significando assim que, na eventualidade do campo magnético sofrer uma diminuição brusca e deixar de estar presente, a velocidade sobe drasticamente, tendendo para infinito, e estas velocidades tem consequências destrutivas [5].

Também devido à sua construção, o motor DC série pode entrar numa situação catastrófica em que a velocidade de rotação atinge valores muito além do estipulado. Este motor não pode ser deixado a funcionar sem carga já que a velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada do binário, e assim a velocidade nessas condições tende para infinito.

2.2 Laboratório de medidas

O laboratório de medidas é o ponto central de toda a dissertação, é onde são feitas medições e o controlo dos parâmetros de operação das máquinas, detalhando as suas características elétricas.

Entenda-se por “operação” como sendo: o funcionamento em regimes especiais e controlados, de modo a avaliar desempenho e detetar anomalias resultantes durante o processo de fabrico, ou nas máquinas intervencionadas para manutenção. Estes procedimentos tem o nome de ensaios.

No atual caso de estudo, os ensaios são realizados a máquinas que podem estar num dos 3 estados apresentados de seguida:

→ Máquinas que se tem conhecimento à priori que não estão a funcionar conforme o solicitado, no seguimento da informação fornecida por parte do cliente;

→ Máquinas que já foram reparadas e se pretende verificar a eficácia da intervenção;

→ Máquinas que acabam de sair da linha de produção, de modo a avaliar o seu desempenho antes de entrarem no mercado. Uma vez que se tratam de máquinas normalizadas, necessitam de respeitar as especificações estabelecidas, e descritas nas normas internacionais.

A IEME possui já um protocolo de procedimentos de ensaio, servindo para definir quais os ensaios a efetuar nas máquinas elétricas intervencionadas pelos técnicos responsáveis.

Estes ensaios consistem em vários procedimentos e têm diversos objetivos, alguns deles, e sem nenhuma ordem específica, são: medição da resistência elétrica dos enrolamentos e do isolamento, ensaio em vazio e em curto-circuito, ensaio de onda de choque (*surge test* ou *impulse test*), análise de vibrações, ensaio de anel, ensaio de rigidez dielétrica (sobretensão (*Hi-Pot*)) e ensaio de campo girante.

Tais ensaios servem para diversos fins, sendo complementares entre si e de um modo geral permitem conhecer o estado dos componentes da máquina, analisando os resultados obtidos. Serão abordados no capítulo 3 adiante. Por enquanto, alguns exemplos de ensaios e sua contribuição analítica estão descritos de seguida:

Medição de resistências

→ **Enrolamentos:** Permite verificar ligações defeituosas e “maus-contactos”.

→ **Isolamentos:** Permite averiguar a existência de defeitos no isolamento de um modo geral, assim como o próprio degradamento do mesmo.

Ensaio em vazio + Ensaio em curto-circuito (rotor bloqueado)

→ Permite obter o “circuito equivalente” da máquina ensaiada.

Análise de vibrações

→ Permite determinar os valores da velocidade da vibração da máquina quando roda à velocidade nominal.

Ensaio de onda de choque (*surge test*) + Ensaio de rigidez dielétrica

→ Permitem testar mais aprofundadamente falhas no isolamento dos enrolamentos:

- Entre 2 fases diferentes,
- Entre 2 espiras do mesmo enrolamento (*turn-to-turn*),
- Entre 2 bobinas da mesma fase (*coil-to-coil*).

Ensaio de campo girante

→ Permite testar se a ligação das bobinas, após rebobinagem, foi efetuada corretamente.

Ensaio de anel

→ Permite verificar a existência de pontos quentes no circuito magnético.

Tal como referido anteriormente, o principal objetivo da realização deste trabalho é o estudo, a projeção e implementação deste espaço, devidamente equipado, que será utilizado para a realização dos ensaios aos motores elétricos, tendo em conta os aspetos normativos.

2.3 Aspetos normativos

2.3.1 Definição, Terminologia e Contexto

Definição

Uma norma (ou padrão) é, aproveitando a definição da *Electropedia* [1]: “um documento, estabelecido por consenso e aprovado por um órgão que disponibiliza, para uso repetitivo e comum, regras, diretrizes ou características para determinadas atividades ou os seus resultados, com o foco em atingir a máxima coerência para um dado contexto”. Os padrões nelas apresentados e descritos devem ser baseados em resultados consolidados de ciência, tecnologia e experiência, devem também promover o benefício das comunidades.

Organizações

Há várias entidades responsáveis pelas normas ou padronizações, duas delas de máxima relevância, devido à área de desenvolvimento em questão e reconhecimento mundial: a **Comissão Eletrotécnica Internacional** – *International Electrotechnical Commission (IEC)* e a - **Organização Internacional de Normalização** – *International Organization for Standardization (ISO)*.

Segundo a designação da IEC, as normas refletem também a consciência global e sabedoria de vários milhares de técnicos especialistas, e são baseadas no consenso dos profissionais da área. Estes especialistas dão instruções, ilustram as suas linhas de pensamento, disponibilizam regras ou definições que são então usadas para projetar, fabricar, instalar, testar e certificar, manter e reparar aparelhos e sistemas eletrotécnicos, mantendo consistente a sua qualidade e desempenho [6].

Algumas das normas publicadas por estas duas entidades são, por exemplo, a IEC 60034 – Máquinas Elétricas Rotativas e a ISO 9001 – Sistemas de Controlo de Qualidade.

NOTA: Estas organizações não são responsáveis pelo “atestado de conformidade”, os serviços de “aprovação de conformidade” com as normas são da responsabilidade de entidades de certificação independentes externas, assim como, por vezes, o acesso aos “selos de conformidade”.

Terminologia e Electropedia

Ao desenvolver normalizações é essencial ter uma taxonomia única, bem fundamentada e homogênea, que contenha informação relacionada com as terminologias e nomenclaturas, que possa ser utilizada e tomada como base a toda a comunidade eletrotécnica.

Para tal, a IEC, mais concretamente o *IEC Technical Committee 1*, lançou em 1938 a primeira versão do Vocabulário Eletrotécnico Internacional – *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), sobre a forma da norma IEC 60050, que contem o vocabulário técnico utilizado nas normas publicadas [7]. Tendo sido beneficiado com a adição de inúmeros termos ao longo dos anos.

O IEV tem como principal função disponibilizar definições corretas, curtas e precisas dos conceitos técnicos aceites internacionalmente na área da eletrotécnica. Contem, atualmente, os termos em diversos idiomas, incluindo o português, e respetivas definições em inglês e francês.

Com a necessidade do ajuste à era digital e para facilitar, a toda a comunidade, o acesso ao vocabulário técnico, o repositório tomou o formato *online* disponível em [1] a partir de abril de 2007, com o nome de *Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary*, continuando sobre a gestão e manutenção do mesmo comité. A *Electropedia* é considerada a base de dados com informação mais completa do mundo no que diz respeito à “*electrotechnology*”.

Foi bastante utilizada no decorrer de todo o processo de estudo já que se pretende cumprir com os padrões e normas internacionais tendo, por si só, linguagem técnica própria e normalizada.

Importância das normas para o trabalho a desenvolver

Os aspetos normativos são de extrema relevância, não só no contexto do projeto a desenvolver, como a nível global, tomando cada vez mais a atenção da comunidade científica e da indústria.

Ao ir de encontro com o que está descrito nas normas e padrões internacionais, a empresa consegue obter as certificações pretendidas e assim diferenciar-se dos restantes competidores. Simultaneamente, garante que os serviços prestados apresentam os níveis de qualidade estabelecidos pelos órgãos de padronização, que possuem prestígio e significância mundial na indústria e onde se baseia a comunidade científica de desenvolvimento e investigação.

Tais certificações proferem às empresas garantias que as metodologias implementadas, os processos de fabrico adotados e os materiais utilizados seguem padrões de qualidade reconhecidos internacionalmente, permitindo que os seus produtos sejam comercializados nos mercados onde se pretendem inserir (ou manter), sendo essencial àquelas que procuram destacar-se positivamente.

Os aspetos normativos têm já um impacto muito alargado, inclusive nos procedimentos da realização dos ensaios, na própria aparelhagem de medida utilizada e nos resultados obtidos. Podem, porventura, obrigar a que a aparelhagem utilizada para as medições dos parâmetros das máquinas ensaiadas tenha, entre outros: margens de erro reduzidas, esquemas de calibração específicos e periódicos e até restrições relativas aos métodos de obtenção de medições.

Para além das normas e padrões, coloca-se também a questão da legislação em vigor em Portugal (ou regulamentos) e sobre a qual a empresa tem obrigatoriedade de cumprir de modo a operar, comercializando os seus produtos e prestando serviços em território nacional.

Regulamentos são regras ou diretivas que são feitos e regulados por uma autoridade nacional (ou regional). É, no entanto, bastante comum os regulamentos técnicos se referirem a padrões e normas internacionais, ajudando a que a descrição da lei não fique demasiado extensa, detalhada ou descritiva, permitindo ainda que as leis permaneçam atualizadas e relevantes ao longo dos anos, uma vez que as normas são revistas e atualizadas com regularidade.

2.3.2 ISO 9001 - Sistemas de Gestão da Qualidade

Há 5 normas, publicadas pela Organização Internacional de Normalização (ISO), que, juntas, estabelecem um modelo de **gestão de qualidade** (*Quality Management Systems (QMS)*), formando a “família ISO 9000”. Servem de guia às empresas e organizações para que estas se assegurem que cumprem com as necessidades dos consumidores e outros parceiros interessados[8].

A ISO 9001 expõe os **requisitos** que as empresas e organizações devem cumprir para obterem certificação. É uma das ferramentas de gestão de qualidade mais utilizadas no mundo inteiro sendo assim de grande relevância para a IEME que inclusive detém a certificação.

As restantes 4 normas fazem referência aos fundamentos básicos da gestão de qualidade, servem de modelo à garantia de qualidade da produção e instalação, destacam a inspeção e os procedimentos de teste e estabelecem um guia em como atingir o sucesso de um ponto de vista organizacional sustentável.

Requisitos

A ISO 9001 define os critérios de um sistema de gestão de qualidade e é a única norma desta “família” pela qual se pode obter uma certificação, pode ser utilizada por qualquer organização, independentemente do seu tamanho e do ramo de atividade onde se inserem.

A norma baseia-se num conjunto de princípios de gestão de qualidade, que colocam o consumidor em grande plano, assim como as motivações e implicações de gestão de alto nível, as abordagens a todo o processo e a melhoria constante de pessoas e metodologias. Ao fazerem uso da ISO 9001, as empresas garantem a boa qualidade e consistência dos seus produtos e serviços, o que acarreta inúmeros benefícios[8]. A adoção de um sistema de gestão de qualidade é uma decisão estratégica para uma organização que pode levar a melhorias da sua performance global e disponibilizar uma base sólida para a criação de iniciativas de desenvolvimento sustentável.

Esta norma internacional define requisitos para um sistema de gestão de qualidade quando uma organização [8]:

→ Necessita de demonstrar a capacidade de fornecer produtos e prestar serviços de forma consistente, que vão de acordo com as expectativas do consumidor.

→ Procura enriquecer a satisfação do consumidor através da aplicação efetiva do sistema, incluindo processos que promovem a melhoria do próprio sistema e assegura a conformidade entre as expectativas do cliente, termos legais e o produto ou serviço prestado.

Todos os requisitos desta norma internacional são genéricos e são aptos de serem aplicados a qualquer organização.

Uma abordagem mais aprofundada poderá ser realizada no decorrer do trabalho de Dissertação, a fim de garantir a concordância com o que já foi implementado na empresa fruto desta mesma certificação. Neste momento os conhecimentos introdutórios adquiridos são satisfatórios.

2.3.3 IEC 60034 - Máquinas Elétricas Rotativas

A norma 60034 [9] é composta por diversas partes, cobrindo inúmeros aspectos relativos às máquinas elétricas rotativas, listadas no Anexo A.1 - **Partes constituintes da norma IEC 60034**.

Algumas dessas partes tem especial relevância no âmbito do trabalho a desenvolver ou são de maior importância para a empresa, estando ligadas às características dos produtos que comercializam e serviços que prestam. Como tal, encontram-se listadas de seguida, contendo o respetivo: Número *Título em inglês* → Breve descrição daquilo que retratam ⇒ **Principal motivo de serem relevantes**.

- Parte 1 *Rating and performance* → Diz respeito às características estipuladas das máquinas, aos valores de referência (ou nominais) e condições de funcionamento (ou operação) a que estão sujeitas ⇒ **É a parte introdutória da norma, é importante por conter informações sobre as grandezas físicas envolvidas, saber como diferenciar as máquinas, caracterizar as condições de funcionamento e respetivas gamas, contém valores de referência variados e os casos que são exceção à norma;**
- Parte 2 *Methods for determining losses and efficiency from tests* → Contém informações sobre os testes e metodologias que devem ser empregues para determinar perdas e a eficiência das máquinas ⇒ **Relembrando que o objetivo principal contempla a realização dos ensaios às máquinas, entre eles os exemplificados nesta parte da norma, relativos à averiguação das perdas;**
- Parte 5 *Degrees of protection provided by the integral design (IP Code)* → Estão referenciados os graus/índices de proteção (IP) das máquinas, estipulados pelo design construtivo da carcaça ⇒ **Um dos fatores diferenciadores da IEME face aos competidores é o projeto e fabrico de motores com características mecânicas e elétricas especiais, entre elas a possibilidade de operarem em ambientes ditos “perigosos” ou “explosivos”, demonstrando assim a importância do conhecimento desta parte da norma;**
- Parte 6 *Methods of cooling (IC Code)* → Codifica e dá a conhecer, exemplificando, os métodos de arrefecimento ⇒ **Mais uma vez, relevante para a construção das máquinas;**
- Parte 7 *Classification of types of construction, mounting arrangements and terminal box position (IM Code)* → Pormenoriza os tipos de construção e instalação das máquinas, atribuindo-lhes um código, fazendo ainda referência à posição da caixa terminais ⇒ **Idem;**

- Parte 8 ***Terminal markings and direction of rotation*** → Estipula a direção de rotação e denota a simbologia que representa os terminais dos enrolamentos elétricos ⇒ **Idem**;
- Parte 9 ***Noise limits*** → Retrata as noções relativas ao ruído que as máquinas emitem durante a sua operação, em diferentes estados ⇒ **Idem**;
- Parte 11 ***Thermal protection*** → Apresenta especificações relativas aos sistemas de proteção contra sobre-aquecimento dos enrolamentos ⇒ **Idem**;
- Parte 12 ***Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*** → Contempla o arranque de motores de indução com rotor em gaiola de esquilo ⇒ **Idem**;
- Parte 14 ***Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity*** → Faz referência à medição, avaliação e valores limite das vibrações mecânicas, em máquinas com altura de eixo superiores a 56 mm ⇒ **Idem**;
- Parte 23 ***Specification for the refurbishing of rotating electrical machines*** → Descreve as especificações a ter em conta aquando da reparação das máquinas ⇒ **A manutenção e reparação das máquinas representa atualmente uma cota parte bastante significativa dos serviços prestados, sendo assim essencial ter o conhecimento desta parte da norma**;
- Parte 24 ***Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents - Application guide*** → Alerta para a deteção e diagnóstico de falhas nas componentes ativas (o rompimento do isolamento dos enrolamentos, essencialmente) e correntes que percorram os rolamentos (levando a vibrações indesejadas e danos) ⇒ **Essencial ainda no âmbito do diagnóstico das máquinas**;
- Parte 25 ***AC electrical machines used in power drive systems*** → Foca nas especificações das máquinas elétricas AC que são usadas em sistemas de produção de energia (por exemplo em centrais hidroelétricas) ⇒ **Novamente, relevante para a produção de máquinas com esta aplicação ou até na manutenção e reparação de máquinas deste tipo**;
- Parte 26 ***Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors*** → Reflete os efeitos de tensões de alimentação trifásicas não equilibradas nos motores de indução com rotor em gaiola de esquilo ⇒ **Idem**;
- Parte 30 ***Efficiency classes of AC motors*** → Lista e codifica as classes de eficiência dos motores AC ⇒ **Mais uma vez, importante aquando do fabrico e categorização das máquinas**.

A primeira parte desta norma (*Rating and performance*) contém informações importantes relativas às condições de funcionamento das máquinas elétricas rotativas, assim como aos valores estipulados das grandezas envolvidas: potência, frequência, tensão, corrente, velocidade, tipo de ligação dos enrolamentos do estator, fator de potência, etc.

Uma versão resumida das noções retratadas na primeira parte da norma, realçando as de maior interesse, está apresentada de seguida, na secção 2.3.4. De qualquer das formas, é indispensável o acesso integral à norma, para fazer cumprir corretamente as especificações nela descritas [9].

2.3.4 IEC 60034 - Parte 1 - *Rating and Performance*

Capítulos 1 e 2 - Panorama geral e Referências

O primeiro capítulo desta parte da norma dá uma visão geral daquilo que irá ser tratado assim como algumas informações de exceções existentes. O segundo apresenta a lista das normas, ou partes desta mesma norma, que são referenciadas ao longo do documento.

Capítulo 3 - Termos e definições

O terceiro capítulo apresenta alguns termos e definições que são de maior relevância a esta norma. Tal como referido anteriormente (secção 2.3.1), estes termos e definições estão também presentes *online* na *Electropedia*.

Capítulo 4 - (Condições de) Serviço / Regimes de funcionamento (*Duty*)

O capítulo 4 é relativo às “condições de serviço” da máquina. Por definição, serviço é: o regime de carga a que a máquina está sujeita, incluindo os períodos de arranque, travagem, em vazio (sem carga) e em repouso, incluindo a duração e sequencia temporal.

Neste capítulo é referido como é da responsabilidade do fabricante declarar as condições de serviço a que a máquina está sujeita. Estão também apresentados, juntamente com respetivas representações gráficas, os tipos de serviço considerados, sendo eles:

⇒ **Tipo S1** ⇒ *Serviço contínuo* → Funcionamento com carga constante, durante tempo suficiente para permitir atingir o equilíbrio térmico;

⇒ **Tipo S2** ⇒ *Serviço temporário* → Funcionamento com carga constante, para um dado período de tempo, menor àquele necessário para se atingir o equilíbrio térmico, seguido por um período de repouso de duração suficiente para reestabelecer a temperatura da máquina numa gama de ± 2 K face à temperatura do fluido de arrefecimento/refrigeração;

⇒ **Tipo S3** ⇒ *Serviço intermitente periódico* → Sequência de ciclos de serviço idênticos, cada um incluindo um período de funcionamento com carga constante e um período de repouso; neste tipo de serviço, o ciclo é tal que a corrente de arranque não afeta significativamente a subida de temperatura;

⇒ **Tipo S4** ⇒ *Serviço intermitente periódico com arranques* → Sequência de ciclos de serviço idênticos, cada um incluindo um período significativo de arranque, um período de funcionamento com carga constante e um período de repouso;

⇒ **Tipo S5** ⇒ *Serviço intermitente periódico com travagens elétricas* → Sequência de ciclos de serviço idênticos, cada um consistindo num período de arranque, um período de funcionamento com carga constante, um período de travagem elétrica rápida e um período de repouso;

⇒ **Tipo S6** ⇒ *Serviço ininterrupto periódico com carga intermitente* → Sequência de ciclos de serviço idênticos, cada um consistindo num período de funcionamento com carga constante e um período de funcionamento em vazio, não havendo período de repouso;

⇒ **Tipo S7** ⇒ *Serviço ininterrupto periódico com travagens elétricas* → Sequência de ciclos de serviço idênticos, cada um consistindo num período de funcionamento com carga constante e um período de travagem elétrica, não havendo período de repouso;

⇒ **Tipo S8** ⇒ *Serviço ininterrupto periódico com variação conjugada de carga-velocidade* → Sequência de ciclos de serviço idênticos, cada um consistindo num período de funcionamento com carga constante correspondendo a uma velocidade de rotação predeterminada, seguido de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes às quais correspondem velocidades de rotação diferentes, não havendo período de repouso;

⇒ **Tipo S9** ⇒ *Serviço com variações não periódicas de carga e velocidade* → Um ciclo onde geralmente a carga e a velocidade variam de forma não periódica, dentro da gama de operação; este ciclo inclui a aplicação frequente de sobrecargas que podem exceder largamente a carga máxima estipulada.

Capítulo 5 - Características estipuladas

O capítulo quinto apresenta informações sobre as características, e grandezas, estipuladas das máquinas. Cobrindo, entre outras, a atribuição das características estipuladas, a definição de potência estipulada para os diferentes tipos de máquinas e a tensão estipulada.

Atribuição das características estipuladas

As características estipuladas devem ser determinadas pelo fabricante da máquina, durante este processo, o fabricante escolhe um determinado regime de funcionamento para o qual apresenta as grandezas estipuladas. Estes regimes de funcionamento têm por base os considerados no capítulo anterior e, no caso de omissão do regime de funcionamento, assume-se o regime de serviço contínuo - Tipo S1.

Quando componentes acessórios (como reatâncias, condensadores, etc.) são conectados pelo fabricante como partes constituintes da máquina, os valores estipulados devem-se referir aos terminais de alimentação de todo o conjunto.

Potência estipulada (“*Rated output*”)

A grandeza da potência estipulada varia consoante o tipo de máquina elétrica, nomeadamente:

→ Geradores DC

Nos geradores de corrente contínua, a potência estipulada é a potência aos terminais de saída da máquina e deve ser expressa em watt (W).

→ Geradores AC

Nos geradores AC, a potência estipulada é a potência aparente aos terminais de saída da máquina e deve ser expressa em volt-ampere (VA) juntamente com o fator de potência.

No caso dos geradores síncronos, o fator de potência deve ser igual a 0,8 (indutivo) (corrente atrasada em relação à tensão, núcleo sobre-excitado), salvo especificação contrária.

→ Motores

Nos motores, a potência estipulada é a potência mecânica disponível no veio e deve ser expressa em watt (W).

NOTA: É recorrente nalguns países a potência mecânica disponível ser expressa em *horse-power* (hp), “cavalo-vapor” (cv) em português. Onde $1 \text{ hp} \approx 745,7 \text{ W}$.

Tensão estipulada

São referidas as condições de operação em que devem ser verificada a tensão estipulada, consoante o tipo de máquina.

Combinações de tensões e potências

Não é prático construir máquinas de todas as potências estipuladas para todas as gamas de tensões estipuladas, para potências mais elevadas tende-se a preferir tensões também mais elevadas. Na tabela 2.1 estão representadas as tensões mais comuns de serem utilizadas (baseadas no design e em considerações de fabrico), em relação à potência nominal da máquina, para máquinas AC com tensões estipuladas superiores a 1 kV.

Tabela 2.1: Combinações preferíveis de tensões e potências [9].

Tensão nominal (U_N) kV	Potência nominal (mínima) kW (ou kVA)
$1,0 < U_N \leq 3,0$	100
$3,0 < U_N \leq 6,0$	150
$6,0 < U_N \leq 11,0$	800
$11,0 < U_N \leq 15,0$	2 500

Capítulo 6 - Características do ambiente de funcionamento

Este sexto capítulo descreve algumas condições de funcionamento das máquinas, nomeadamente, que quando se refere a “ambiente” considera-se, caso seja especificado o contrário, condições em que a máquina está: em funcionamento, imóvel, armazenada ou em transporte. E ainda que máquinas desenvolvidas para funcionarem fora do “padrão de condições de ambiente” devem ter considerações especiais.

São referidos alguns pormenores, nomeadamente que:

→ A altitude não deve exceder os 1 000 m; para altitudes superiores a esta, deve ser considerado, aquando do design da máquina, que a distância do arco elétrico diminui com a diminuição da pressão atmosférica;

→ A temperatura ambiente não deve exceder os 40 °C;

→ A temperatura ambiente não deve ser inferior a -15°C , a não ser quando concordado entre o fabricante e o cliente; algumas máquinas são exceção a esta regra, nomeadamente aquelas que têm métodos de arrefecimento a água, não podendo a temperatura ambiente ser inferior a 0°C ;

→ Podem ser necessárias medidas especiais antes de energizar a máquina após períodos prolongados de paragem, armazenamento ou transporte, o manual de instruções deve fazer referência a estas situações;

Capítulo 7 - Condições elétricas de funcionamento

O sétimo capítulo ilustra condições elétricas de funcionamento, alguns exemplos destas condições dizem respeito a: alimentação elétrica das máquinas (gamas de frequência e tensão), forma e simetria das tensões e correntes (incluindo influência de harmónicos), operação perante desequilíbrio do sistema (no caso das máquinas síncronas), tensões de arranque (motores AC), flutuação de tensão e frequência durante o funcionamento, e o funcionamento quando não conectadas ao condutor de proteção terra.

Arranque de motores AC

Um motor AC só arranca se o seu binário de arranque corresponder adequadamente ao binário resistente e à inércia da carga acoplada. Para motores AC com uma única velocidade, o motor deve ser capaz de arrancar com 90% da tensão estipulada e com um binário de carga proporcional ao quadrado da velocidade, até 70% do binário estipulado à velocidade nominal e uma inércia da carga até 50% da inércia do motor. A não ser que um valor diferente seja especificado de antemão.

Flutuação de tensão e frequência durante o funcionamento

Nas máquinas AC para funcionamento a partir de uma fonte de alimentação ou a uma frequência fixa fornecida através de um gerador AC (quer localmente quer através de uma rede de fornecimento), combinações de flutuações de tensão e variações de frequência são classificadas como estando na zona A ou na zona B, de acordo com a figura 2.2. Para máquinas DC, quando ligadas diretamente a um barramento DC constante, as zonas A e B apenas se aplicam às tensões.

Uma máquina deve ser capaz de desempenhar a sua função primária, especificada na tabela 2.2, continuamente dentro da zona A, mas não necessita de estar completamente de acordo com o seu desempenho (*performance*) à tensão e frequência estipulada (ponto nominal na figura 2.2), e pode exibir algumas variações. Os aumentos de temperatura podem ser mais elevados do que à tensão e frequência estipulada.

Tabela 2.2: Funções primárias das máquinas [9].

Item	Tipo de máquina	Função primária
1	Gerador AC, excluindo o item 5	Potência aparente nominal (kVA), ao fator de potência nominal, quando este é controlável separadamente
2	Motor AC, excluindo o item 3	Binário nominal (Nm)
3	Motor síncrono	Binário nominal (Nm), com a excitação a manter a corrente de campo estipulada ou o fator de potência nominal, quando controláveis separadamente
4	Compensador síncrono, excluindo o item 5	Potência aparente nominal (kVA) dentro da zona aplicável aos geradores (figura 2.2), a não ser que dito o contrário
5	Geradores síncronos movidos a turbinas a vapor ou turbinas de combustão de gás e compensadores síncronos com potência nominal ≥ 10 MVA	Consultar a IEC 60034-3
6	Gerador DC	Potência nominal (kW)
7	Motor DC	Binário nominal (Nm), a excitação de um motor tipo shunt mantendo a velocidade estipulada, quando controlável separadamente

Uma máquina deve ser capaz de desempenhar a sua função primária dentro da zona B, mas pode demonstrar maiores desvios de desempenho ao verificado à situação nominal (tensão e frequência estipulada) em comparação com o funcionamento na zona A. O aumento de temperatura pode ser mais elevado do que no funcionamento nominal mas quase certamente será mais acentuado do que ao verificado na zona A. Não é recomendado o funcionamento prolongado no perímetro da zona B.

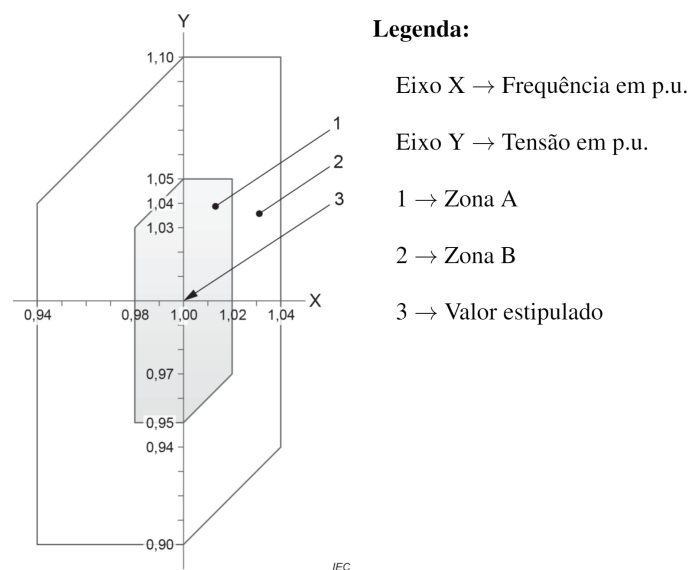


Figura 2.2: Zonas limites de tensão e frequência para motores e geradores, excluindo geradores ou compensadores síncronos contemplados na IEC 60034-3 e geradores hídricos contemplados na IEC 60034-33 [9].

Em condições de funcionamento e aplicações práticas, a máquina pode, por vezes, ter que funcionar fora do perímetro da zona A. Porém, tais situações devem ocorrer poucas vezes, de forma pouco frequentemente e com uma duração limitada. Medidas corretivas devem ser tomadas, quando possível, dentro de um tempo razoável, por exemplo a diminuição da potência, já que tais ações podem prevenir a redução do ciclo de vida da máquina causada pelos efeitos da temperatura.

O funcionamento fora da zona A pode ter efeitos significativos no ruído acústico, na vibração e na “força portante magnética”.

Funcionamento de máquinas trifásicas AC não ligadas à terra

As máquinas trifásicas AC devem ser capazes de funcionar em serviço contínuo (Tipo S1) com o ponto neutro ao mesmo, ou muito próximo do, potencial da terra. Devem também ser capazes de funcionar com uma das fases ao mesmo potencial que a terra durante curtos períodos de tempo, e de forma não frequente, como é o exemplo do tempo necessário para eliminar um defeito. Caso haja intenção da máquina funcionar continuamente, ou durante longos períodos, nesta condição, é necessário que a máquina possua níveis de isolamento adequados a esta mesma condição.

Se o enrolamento não tiver o mesmo isolamento nos terminais de fase e de neutro, tal deve ser especificado pelo fabricante.

A ligação à terra ou interconexão dos pontos neutros da máquina não deve ser efetuada sem antes consultar o fabricante, devido aos perigos associados à componente homopolar da corrente que pode ocorrer e circular durante alguns regimes de funcionamento, causando danos nos enrolamentos em condições de defeito fase-neutro.

Níveis de tensão - Gamas de operação e Valores de pico

Para as máquinas AC, o fabricante deve declarar um valor limite para a tensão de pico, assim como indicar a gama de operação no regime contínuo, caso seja solicitado pelo cliente.

Algumas exceções à norma ou que requerem informação adicional são as seguintes: máquinas usadas em *Power Drive Systems* (PDS) consultar a IEC TS 60034-25; máquinas com *Impulse Voltage Insulation Class* (IVIC) específicos, consultar a IEC 60034-18-41 no caso de máquinas construídas para operar sem descargas parciais; máquinas com tensão nominal $U_N > 1$ kV consultar IEC 60034-15.

Para informações sobre linhas de fuga e distâncias de folga a materiais condutores nus, como o cobre ou o alumínio, por exemplo na caixa de terminais, consultar a IEC 60664-1. Condutores esmaltados não são considerados materiais condutores nus.

Capítulo 8 - Desempenho (performance) térmica e ensaios de temperatura

Neste oitavo capítulo estão contidas notas importantes relativas à temperatura das máquinas, nomeadamente: os diferentes métodos de obter a temperatura dos diversos componentes, a duração dos ensaios, os limites térmicos e aquecimento ($\Delta\theta$) máximos de funcionamento.

Classe e Fluido de refrigeração de referência

Deve ser associado uma classe térmica de acordo com a IEC 60085. O fabricante é responsável por interpretar os resultados obtidos pelos ensaios térmicos, de acordo com a IEC 60034-18.

Nota: A classe térmica de um sistema de isolamento novo não está diretamente relacionado com as capacidades térmicas individuais dos materiais que o constituem.

Na norma está apresentada uma tabela que agrupa os diferentes tipos de arrefecimento (primários e secundários), assim como a técnica utilizada para a refrigeração e ainda o fluido de refrigeração de referência (e a sua temperatura) para cada método.

Condições para os ensaios térmicos

São mencionados vários requisitos aquando da realização dos ensaios térmicos, entre eles: a alimentação da máquina; a temperatura da máquina antes de ser iniciado o ensaio e a medição da temperatura dos fluidos de refrigeração em diferentes tipos de máquinas.

→ Temperatura da máquina

→ Para obter a temperatura do condutor através do aumento da resistência, a temperatura inicial do condutor não deve diferir da do fluido de refrigeração em mais de 2 K;

→ Aquando do ensaio no regime de funcionamento temporário (Tipo S2), a temperatura inicial da máquina deve ser de ± 5 K a temperatura do fluido de refrigeração.

→ Medição da temperatura do fluido de refrigeração durante os ensaios

→ **Modo geral** → O valor adotado para a temperatura do fluido de refrigeração durante o ensaio deve ser a média das leituras, obtidas em intervalos de tempo igualmente espaçados, durante o último quarto do período de duração do ensaio.

→ **Máquinas fechadas, sem comutador de calor (arrefecidas pelo ar ou gás circundante)** → A temperatura do ar ou gás circundante deve ser medido com recurso a vários detetores térmicos posicionados em diferentes pontos à volta e a média altura da máquina, entre 1 m e 2 m de distância da mesma.

→ **Máquinas fechadas com comutadores de calor internos ou montados diretamente na máquina** → A temperatura do fluido de refrigeração primário deve ser medido quando entra na máquina, a temperatura do secundário deve ser medida quando entra no comutador de calor.

Aquecimento de partes da máquina

O aquecimento, $\Delta\theta$, de uma parte da máquina é a diferença entre a temperatura medida através do método apropriado (descrito na secção seguinte sobre *métodos de medição de temperatura*) e a temperatura do fluido de refrigeração medida de acordo com o método apropriado, consoante o tipo de máquina, referido anteriormente na secção sobre *medição da temperatura do fluido de refrigeração durante os ensaios*;

Sempre que possível, a temperatura deve ser medida imediatamente antes da máquina ser desligada, no fim do ensaio térmico. No caso de não ser possível deve-se ter em atenção a correção do tempo de paragem.

Métodos de medição da temperatura

→ Modo geral

Os três métodos reconhecidos para a medição da temperatura dos condutores estão apresentados de seguida: **método da resistência**, o **método do “sensor de temperatura embebido” – *embedded temperature detector* (ETD)** e o **método do termómetro**. Métodos diferentes não devem ser usados para verificar os restantes, para “ensaios indiretos” consultar a IEC 60034-29.

→ Método da resistência

A temperatura dos condutores é determinada pelo aumento da sua resistência elétrica.

→ Método do “sensor de temperatura embebido” (ETD)

A temperatura é determinada através de detetores de temperatura (podem ser de vários tipos) implementados no interior da máquina durante a sua construção, em pontos que não são acessíveis quando a máquina está completamente montada.

→ Método do termómetro

A temperatura é determinada por termómetros ligados às superfícies acessíveis da máquina (montada). Diferentes tipos de termómetros podem ser usados, tendo em atenção as interferências magnéticas dos materiais constituintes.

Determinação da temperatura dos condutores

Este segmento da norma esclarece algumas informações ligadas com determinação da temperatura dos condutores, após uma breve introdução sobre a escolha do método adequado, entra em mais pormenor em cada um dos métodos, estando abaixo ilustradas as informações mais relevantes ou os aspetos em concreto que focam em cada método.

→ Determinação pelo método da resistência

São referidas e descritas quatro versões do método que podem ser usadas; é demonstrada a equação de cálculo da temperatura; são detalhados aspetos sobre a correção de tempo de paragem.

→ Determinação pelo método ETD

São dados a conhecer aspetos gerais deste método, nomeadamente que:

→ A localização preferível dos detetores aquando da construção da máquina, tendo em conta a disposição e número de enrolamentos;

→ Durante o ensaio, é considerado o valor mais elevado registado pelos detetores.

Duração dos ensaios térmicos

Aqui é dado a conhecer que a duração dos ensaios térmicos depende do regime de funcionamento: podendo ter uma duração variável, como é o caso do regime de funcionamento contínuo (Tipo S1), onde decorre até ter sido atingido o equilíbrio térmico; ter uma duração estipulada, como é no caso do regime temporário (Tipo S2); podendo ainda ser um processo de determinação mais complexo, como é o caso para regimes periódicos e não periódicos com carga constante.

Limites de temperatura e Aquecimento

Nesta cláusula da norma são apresentadas descrições, acompanhadas de várias tabelas, que contém informação acerca da temperatura máxima dos enrolamentos, tendo em conta os seguintes fatores: a **classe do térmica** da máquina, o **método de medição de temperatura** utilizado e a **parte da máquina** que está a ser alvo de ensaios. Está também subdividido tendo em conta as **características da máquina**, tipicamente: o método de arrefecimento dos condutores, as grandezas estipuladas (potência e tensão) e ainda regimes de funcionamento.

Para além dos enrolamentos são também feitas referências a outros constituintes das máquinas, nomeadamente: núcleos magnéticos, componentes estruturais (a carcaça), comutadores, anéis coletores e escovas, rolamentos (ou chumaceiras).

São ainda referidos fatores de correção ligados à altitude do local e ao aquecimento ($\Delta\theta$).

O método de arrefecimento utilizando hidrogénio é também tido em conta no decorrer deste ponto, contendo inclusive informação sobre gamas de pureza aceitáveis.

Capítulo 9 - Outros ensaios e desempenho

Este nono capítulo tem especial importância no âmbito do trabalho, focado no laboratório onde se irão realizar ensaios a máquinas elétricas. Documenta várias considerações a serem tomadas em conta no que toca a ensaios e medição de desempenho.

Ensaio de série individual (*Routine test*)

Os ensaios de série individual são um conjunto de ensaios que são sempre “ensaios de fábrica” e que devem ser realizados a todas as máquinas que são construídas pelo fabricante. Podendo no entanto não estar completamente montadas aquando da realização dos ensaios, caso os componentes em falta não sejam significantes ao ensaio a realizar. Para estes ensaios as máquinas não necessitam de estar acopladas, com exceção das máquinas síncronas no ensaio em circuito aberto.

Os ensaios que fazem parte dos ensaios de série individual variam consoante o tipo de máquina, na norma encontra-se uma tabela que indica quais os ensaios mínimos obrigatórios a serem realizados em cada tipo.

Ensaio dielétrico (*voltage withstand test*)

O ensaio consiste em aplicar uma tensão de teste entre o enrolamento a ser ensaiado e a carcaça da máquina, com o núcleo e os enrolamentos que não estão a ser ensaiados ligados à carcaça. Deve apenas ser realizado em máquinas novas e cuja construção esteja finalizada, com todos os elementos em condições equivalentes às condições normais de funcionamento. Este ensaio deve ser efetuado na fábrica ou após a instalação da máquina na localização final.

Mais algumas especificidades e exceções são tidas em conta e listadas, acompanhadas por tabelas que exemplificam as partes das máquinas e os níveis de tensão a aplicar em cada caso.

Intensidades de corrente excessivas ocasionais

A capacidade de aguentar sobreintensidades de corrente tem o propósito de garantir o funcionamento das máquinas com dispositivos de controlo e de proteção. Uma intensidade de corrente

excessiva provoca um aumento de temperatura, podendo-se assumir que a máquina não estará a funcionar com correntes acima do especificado para além de breves momentos durante toda a vida útil da máquina.

No caso dos **geradores** cuja potência nominal não ultrapasse os 1 200 MVA, devem ser capazes de suportar uma sobreintensidade de corrente igual a 1,5 vezes a corrente estipulada por um período de pelo menos 30 s. Em geradores mais potentes, este período deve ser definido entre ambas as partes, mas nunca deverá ser inferior a 15 s.

Para os **motores** (com exceção dos motores de comutadores e motores de ímanes permanentes) com mais de uma fase, cuja potência não exceda os 315 kW e tensão estipulada até 1 kV, devem suportar uma sobreintensidade de corrente igual a 1,5 vezes a corrente estipulada por um período de pelo menos 2 min. Nada é referido sobre os motores monofásicos e sobre aqueles com potências superiores a 315 kW.

Excesso de binário momentâneo nos motores

→ Motores de indução com mais que uma fase e motores DC

Independentemente da sua condição de serviço (ou função) e construção, estes motores devem ser capazes de suportar um binário 60% superior ao nominal (pelo menos) durante 15 s, sem parar (*stalling*) ou exibir mudanças de velocidade abruptas, desde que o binário seja aumentado de forma gradual. A tensão e frequência deve ser mantidas nos valores nominais.

Nalguns casos especiais de motores de indução, com características de arranque especiais, este valor de binário excessivo pode ser alvo de acordo entre cliente e fabricante.

Nos motores DC, o binário excessivo deve ser expresso em sobreintensidade de corrente.

→ Motores síncronos polifásicos

Salvo quando acordado de outro modo, um motor síncrono com mais do que uma fase, independentemente da condição de serviço, deve ser capaz de aguentar binário excessivo, nas quantidades expressas abaixo, durante pelo menos 15 s, sem perder o sincronismo e a corrente de excitação mantida aos valores estipulados à plena carga:

- Motores de indução síncronos (rotor bobinado): 35% binário excessivo;
- Motores síncronos (rotor cilíndrico): 35% binário excessivo;
- Motores síncronos (polos salientes): 50% binário excessivo;

Velocidades seguras de funcionamento de motores de indução de gaiola de esquilo

Nesta secção é apresentada uma tabela representativa das velocidades seguras (máximas) de funcionamento contínuo, expressas em rotações por minuto (rpm), de motores de indução trifásicos de gaiola de esquilo de velocidade única, com tensões estipuladas até 1 000 V. Apenas estão representados os motores com 2, 4 ou 6 polos e cujo *frame number* é igual ou inferior a 315.

Para velocidades superiores à nominal, por exemplo quando utilizados controlos de regulação de velocidade, os níveis de ruído e vibração aumentam. A vida dos rolamentos (chumaceiras) é afetada durante o funcionamento a velocidades superiores à estipulada e como tal devem ser

tomadas precauções quanto aos intervalos de manutenção (nomeadamente para relubrificar os rolamentos).

Velocidades excessivas (sobrevelocidades)

As máquinas devem ser desenhadas para suportar as velocidades expressas na tabela presente nesta cláusula da norma, que relaciona o tipo de máquina com a quantidade de sobrevelocidade que deve ser suportada.

O ensaio de sobrevelocidade não é normalmente considerado necessário, podendo ser executado caso especificado e concordado. (Geradores de turbina AC estão contemplados na IEC 60034-3). Um ensaio de sobrevelocidade é considerado satisfatório se nenhuma deformação anormal e permanente apareça ou nenhuma outra fraqueza que ponha em causa o funcionamento normal da máquina seja detetada e ainda que os resultados do ensaio dielétrico posterior realizado aos enrolamentos sejam satisfatórios. A duração do ensaio de sobrevelocidade deve ser de 2 min.

Algumas alterações temporárias no diâmetro de alguns componentes (nomeadamente constituintes do rotor) não devem ser considerados como “deformações anormais” que indicariam que a máquina não estaria apta para operar.

Distorção harmónica total (THD) em máquinas síncronas

Os requisitos desta sub-cláusula são apenas aplicáveis a máquinas síncronas com potências estipuladas iguais ou superiores a 300 kW (ou kVA) projetadas para ser conectadas à rede elétrica a operar a uma frequência nominal compreendida entre $[16^{\frac{2}{3}}; 100]$ Hz, com o objetivo de minimizar as interferências causadas por estas máquinas.

Quando ensaiadas em circuito aberto e à velocidade nominal, a distorção harmónica total (THD) da tensão fase-fase não deve exceder 5%. Aos motores síncronos não se aplica este limite.

A THD pode ser medida diretamente através de equipamento especializado para tal, ou em alternativa cada harmónico deve ser medido e a THD pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^k u_n^2} \quad (2.1)$$

→ u_n é a relação entre a tensão composta U_n do harmónico n e a tensão fundamental U_1 ;

→ n é a ordem do harmónico;

→ $k = 100$.

Ensaio de tensão no veio

A tensão no veio deve ser medida diretamente entre as extremidades do veio, enquanto a máquina funciona à tensão e frequência estipuladas, em vazio e de preferência desacoplada. Não é permitido determinar a tensão no veio medindo a tensão entre a carcaça e a terra, entre os dois rolamentos (chumasseiras) e subtraindo os valores, uma vez que pode conduzir a falsos resultados.

Tem ser avaliada no seu valor eficaz (RMS) e, salvo quando concordado entre cliente e fabricante, não deve exceder os 350 mV no caso de rolamentos de esferas ou de rolos (ou similares).

Capítulo 10 - Requisitos de informação

Cada máquina elétrica deve ser acompanhada com a documentação apropriada, que contempla obrigatoriamente um conjunto mínimo de informações, assim como a (ou várias) chapa de características. Este décimo capítulo da norma faz referência às informações que tem que ser disponibilizadas pelos fabricantes de máquinas elétricas.

Documentação do produto

A documentação do produto deve ser fornecida pelo fabricante e incluir *data sheets* e/ou manuais de utilização. Esta documentação pode ser entregue fisicamente com a máquina ou então ser disponibilizada de forma digital.

Chapa de características

As chapas devem ser feitas de um material resistente e duradouro e estar firmemente presas à máquina, a escrita deve ser feita de forma igualmente duradoura, recorrendo à impressão ou à gravação.

A chapa deve ser preferencialmente montada na carcaça da máquina e estar localizada numa posição que seja de fácil leitura. Caso a máquina seja uma peça constituinte de um outro equipamento e a chapa de características da máquina não seja legível, deve ser disponibilizada, a pedido, uma segunda chapa de características montada no equipamento.

Em alternativa, a chapa de características ou outra parte da máquina (por ex. dentro da caixa de terminais) pode conter um “símbolo eletrónico de identificação”, como um código QR, incluindo um *link* que direcione para a documentação na página de *Internet* do fabricante.

Com exceção de manutenção normal (lubrificação, limpeza, substituição de rolamentos), quando uma máquina é reparada ou recondicionada, uma chapa adicional deve ser fornecida a indicar o nome da empresa responsável pelo trabalho e o ano da intervenção. Em caso de modificação, as mudanças que afetem as características originais da máquina devem ser descritas numa chapa original.

Conteúdo da informação disponibilizada

Os seguintes itens devem ser disponibilizados, quando aplicáveis, na documentação do produto e na chapa de características.

→ Todas as máquinas

- O nome ou o logótipo do fabricante;
- Número de série ou marca de identificação e código da máquina do fabricante;
- Informação relativa ao ano de fabrico.
- Tensão(ões) ou gama de tensões estipulada(s) (valores nominais diferentes devem ser expressos reparados por “/”, por ex. 400 V / 230 V ; gamas de valores devem ser apresentadas com “–”, por ex. 380V – 440 V);

- Corrente(s) ou gama de correntes estipulada(s);
- Potência(s) ou gama de potências estipulada(s), acompanhada pela classe no caso de ser projetada para funcionar para além do regime contínuo (Tipo S1);
- Velocidade(s) ou gama de velocidades estipulada(s);
- Instruções de ligação, em diagrama ou texto localizado junto da caixa de terminais;
- A classe de eficiência energética (IE code) e eficiência em regime nominal;
- O peso total da máquina, quando excede os 30 kg;
- O índice de proteção (IP);
- A classe térmica, acompanhado da letra “P” ou “S” caso seja arrefecida a água;
- A direção de rotação, nas máquinas projetadas para funcionar apenas numa direção, indicada pelas siglas “cw” (*clockwise* - sentido dos ponteiros do relógio) ou “ccw” (*counter clockwise* - sentido oposto dos ponteiros do relógio) ou por uma seta (a seta não necessita de estar na chapa de características mas deve ser bem visível);
- A altitude para a qual a máquina foi projetada para funcionar, quando superior a 1 000 m.

→ **Máquinas AC**

- Número de fases e frequência estipulada.
- **Máquinas síncronas** → A tensão em circuito aberto à velocidade nominal, no caso de máquinas excitadas por ímanes permanentes; No caso das máquinas excitadas eletricamente: a tensão e corrente de campo estipuladas.
- **Máquinas de indução de rotor bobinado** → A tensão em circuito aberto estipulada entre os anéis coletores e a Corrente estipulada dos anéis coletores.

→ **Máquinas DC**

- A tensão e corrente de campo estipuladas, para as correntes com excitação separada ou com excitação em derivação.

→ **Máquinas com potência estipulada superior a 5 kW (ou 5 kVA)**

- Os números das normas que são aplicáveis; A temperatura máxima do meio ambiente, quando diferente de 40 °C ; A temperatura mínima do meio ambiente, quando diferente da normalizada; A temperatura máxima do fluido de refrigeração, quando diferente de 25 °C, para máquinas refrigeradas a água; Para as máquinas arrefecidas a hidrogénio, indicar a pressão do hidrogénio à potência nominal.

→ **Exemplos de informação opcional**

- O fator de potência estipulado, nas máquinas AC;
- O método de refrigeração;
- A potência aparente do rotor bloqueado, nas máquinas de indução.

Capítulo 11 - Proteção / ligação à terra

Este capítulo número 11 apresenta requisitos diversos das máquinas elétricas rotativas, sendo o mais relevante deles todos a **proteção / ligação à terra**.

As máquinas devem possuir terminais de ligação à terra ou outro dispositivo que permita a conexão a um condutor de proteção ou condutor terra. Contudo, algumas máquinas não devem ser aterradas nem possuir terminais de ligação à terra, sendo:

- Aquelas que estão equipadas com isolamento suplementar (classe II);
- As que são projetadas para serem montadas em aparelhos que contêm isolamento suplementar (classe II);
- Aquelas cuja tensão nominal é inferior a 50 V AC ou 120 V DC e sejam projetadas para o uso em circuitos de “muito baixa tensão de segurança” (MBTS) (*safety extra-low voltage (SELV)*).

No caso das máquinas com tensões estipuladas superiores a a 50 V AC ou 120 V DC mas que não excedam 1 000 V AC ou 1 500 V DC, o terminal do condutor terra deve estar situado nas proximidades (ou no interior quando disponível) da caixa de terminais para os condutores de fase.

Máquinas com tensões estipuladas superiores a 1 000 V AC ou 1 500 V DC ou aquelas cuja potência nominal é superior 100 kW (ou 100 kVA) devem ter um terminal de condutor terra adicional ligado à carcaça da máquina, por exemplo uma cinta de ferro e, adicionalmente, uma maneira de conectar uma bainha de um cabo condutor dentro da caixa de terminais.

A norma lista ainda as secções mínimas a utilizar para os condutores de proteção, tendo em conta as secções dos condutores de fase, assim como algumas recomendações para casos mais específicos.

Capítulo 12 - Tolerâncias

O décimo segundo capítulo está destinado a tolerâncias. A **tolerância** é o desvio máximo aceitável, de uma dada quantidade, listada na tabela presentes nesta cláusula da norma, entre os resultados dos ensaios e o valor declarado pelo fabricante na chapa de características ou manual

Capítulo 13 - Compatibilidade eletromagnética (CEM)

Este capítulo 13 é relativo à interferência eletromagnética das máquinas elétricas, demonstrando os requisitos de compatibilidade eletromagnética (ou *Electromagnetic compatibility (EMC)*).

Nesta cláusula estão especificados os requisitos necessários às máquinas com tensões estipuladas inferiores a 1 000 V AC ou 1 500 V DC projetadas para uso em ambiente residencial, comercial ou industrial, que sejam destinadas a serem fornecidas diretamente ao consumidor final.

Componentes eletrónicos montados no interior de máquinas elétricas rotativas e que são essenciais ao seu funcionamento (como é o caso de dispositivos de excitação) são consideradas “partes da máquina”.

Este documento não contempla o “sistema final de transmissão” e os seus componentes, quer estejam montados no interior ou exterior da máquina, como é o exemplo de: equipamento eletrónico de controlo e potência, máquinas acopladas, dispositivos de monitorização, etc.

Regimes transitórios (como é o caso do arranque) não são contemplados nesta cláusula.

Capítulo 14 - Requisitos de aplicação

O décimo quarto e último capítulo desta primeira parte da norma IEC 60034 refere que: as máquinas rotativas que estão de acordo com este documento devem também estar de acordo com outras normas (nomeadamente a IEC 60204-1 ou IEC 60204-11, ou a IEC 60335-1 no que toca às máquinas elétricas rotativas incorporadas em eletrodomésticos) o quanto possível, a não ser que de outra forma seja especificado neste documento, e serem projetadas e construídas estando o mais de acordo possível com as melhores práticas de design, apropriadas à sua aplicação, aceites internacionalmente.

NOTA: É da responsabilidade do fabricante (ou do construtor/instalador) de equipamentos compostos por máquinas elétricas, assegurar que o equipamento como um todo é seguro.

É ainda referido que adicionalmente pode ser necessário limitar algumas características, descritas noutras normas publicadas, como é o exemplo da temperatura da superfície da máquina.

Capítulo 3

Ensaaios a máquinas elétricas

Os ensaios às máquinas elétricas são imprescindíveis na atividade da empresa para a qual se está a desenvolver o projeto de dissertação. São a maneira de obter informações sobre as máquinas com que lidam diariamente e os seus resultados servem de base para o trabalho que desenvolvem.

Este capítulo relata estes mesmos ensaios, juntamente com descrições mais aprofundadas.

Durante o período de permanência na empresa surgiu a oportunidade de acompanhar de perto a realização de múltiplos ensaios a diversas máquinas, assim como assistir a variados procedimentos de reparação e manutenção. Tendo sido feito o registo fotográfico de algumas destas instâncias.

Tal recolha de informação, aliada à colocação de inúmeras questões aos responsáveis pelos ensaios enquanto estes decorriam, e fora deles, sobre todos os domínios em causa: desde as particularidades das máquinas a serem ensaiadas, aos próprios procedimentos de cada ensaio efetuado, às especificidades dos equipamentos do laboratório ou aparelhos “externos” utilizados na realização de certos ensaios ou como complemento à aquisição de informação, às técnicas empregues aquando das intervenções; reforçadas por comentários relevantes oriundas dos intervenientes permitiu um enriquecimento valiosíssimo sobre as matérias abordadas.

Foi tirado o máximo proveito do facto do trabalho de dissertação ter sido realizado em ambiente empresarial, num local com acesso a uma oficina, onde se põe em prática realidades dadas a conhecer, até então, de um ponto de vista puramente teórico, durante os anos de estudo, e que ganharam outro significado e perceção quando analisadas de perto e diante aplicações reais.

Apesar de não ser propriamente palpável, o conhecimento adquirido, neste processo, sobre máquinas elétricas, tanto de um modo geral como sobre pormenores específicos, contribuiu muito significativamente para a formação académica e, acima de tudo, de um ponto de vista profissional, adquirindo-se competências relativas aos procedimentos da indústria, em especial do setor da manutenção e reparação de máquinas elétricas.

Há um conjunto de ensaios a serem realizados aquando da receção da máquina e após dado por terminado o processo de manutenção ou reparação, existem ainda outros que podem ser efetuados perante a suspeita de alguma anomalia específica ou a pedido do cliente.

Todos os ensaios são realizados de acordo com normas internacionais, como a IEC 60034 (partes: 15, 23, 27, 32; relacionadas com: *impulse voltage withstand; repair, overhaul and reclamation; measurements on the winding insulation; measurement of stator end-winding vibration*) e a ISO 9001. São também referenciados documentos publicados por outras entidades, como o IEEE e a EASA.

Durante a maior parte dos ensaios são recolhidos os valores da temperatura ambiente e do índice de humidade do ar, uma vez que os parâmetros físicos dos materiais variam com as condições do meio envolvente e é necessário conhecê-los para se poder fazer a comparação de resultados.

Existe já um “guia de procedimentos de ensaios”, elaborado pela IEME, respeitando as normas e padrões previamente referidos, e pelo qual os profissionais se regem para a realização dos ensaios. No decorrer desta secção estão descritos, de um modo ainda mais aprofundado ao encontrado no descrito “guia”, os ensaios que são realizados na empresa, acompanhados pelos procedimentos a seguir. Simultaneamente encontram-se pontualmente detalhadas as razões ou fundamentos teóricos que apoiam a realização dos ensaios e ainda certas imagens ilustrativas.

3.1 Ensaaios de receção

O conjunto de ensaios que são efetuados aquando da receção das máquinas é composto por: medição da resistência óhmica dos condutores, medição da resistência de isolamento, ensaio em vazio, análise de vibrações, tensão rotórica, medição dos circuitos auxiliares.

3.1.1 Medição da resistência óhmica dos condutores

O objetivo deste ensaio é a determinação do valor da resistência óhmica do condutor dos enrolamentos. No caso das máquinas trifásicas permite diagnosticar a existência de desequilíbrios por comparação dos valores medidos para as 3 fases.

A medição pode ser efetuada com recurso a um microohmímetro.

Este é um dos ensaios onde é registada a temperatura ambiente, tal como referido anteriormente, uma vez que a resistência dos materiais condutores varia com a temperatura (o aumento de temperatura faz aumentar a resistência).

Não existindo um valor pré-estabelecido de referência para esta grandeza (o que pode acontecer nalguns casos pontuais), esta medição é realizada com um aspeto orientativo.

Salvaguardando, novamente, o caso das máquinas trifásicas, onde a comparação dos valores obtidos para as diferentes fases indica o estado de simetria dos enrolamentos das fases. Tipicamente procura-se que os desvios sejam inferiores a 2 % do valor médio registado. [10]

3.1.2 Medição da resistência óhmica do isolamento

O objetivo deste ensaio consiste em determinar o estado do isolamento da máquina. Este pode ser afetado devido ao envelhecimento dos materiais isolantes pelo qual é constituído ou eventuais

danos que possam ter resultado da utilização da máquina, ou então, mais vulgarmente, devido a níveis elevados de humidade e à existência de sujidade na superfície dos materiais isolantes.

A medição é efetuada recorrendo a um megaohmímetro (figura 3.1), que afere a resistência entre as fases da bobinagem (uma ou mais) e a massa da máquina, elementos estes que estão separados pelos materiais isolantes que se pretendem averiguar.



Figura 3.1: Megaohmímetro.

Recomenda-se o teste de cada fase em separado, o que permite comparar o resultado entre as fases. Ao testar cada uma das fases, as restantes devem ser ligadas à terra. Deste modo é avaliada a resistência do isolamento entre as fases e não apenas o isolamento em relação à terra, o que aconteceria se não fosse usado este procedimento.

A leitura da medição da resistência deve ser registada após ter sido aplicada tensão durante o período de 1 minuto e a tensão a aplicar varia consoante a tensão de funcionamento da máquina e estão tabelados nas normas internacionais, nomeadamente na IEC 60034 parte 27 [9] e na IEEE Std 43-2000 [11], apresentados na tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1: Tensão a aplicar para medição da resistência de isolamento.

Tensão estipulada da máquina (AC) V	Tensão a aplicar no teste de isolamento (DC) V
Até 1 000	500
1 000 a 2 500	500 a 1 000
2 501 a 5 000	1 000 a 2 500
5 001 a 12 000	2 500 a 5 000
Superior a 12 000	5 000 a 10 000

Para este ensaio há valores mínimos parametrizados para a resistência do isolamento, nunca inferior a 5 MΩ [11].

No decorrer deste ensaio é registada a humidade do ar, novamente como referido anteriormente, já que a resistência dos materiais isolantes e especialmente do próprio ar varia com a humidade nele presente. A maior concentração de partículas de água faz aumentar a condutividade do ar, diminuindo a resistência do isolamento.

3.1.3 Índice de polarização (IP)

O índice de polarização é determinado a fim de avaliar o estado de secagem e/ou limpeza de todo o sistema de isolamento da máquina.

É a relação entre os valores registados da resistência do isolamento, antes vista, após 1 minuto e ao fim de 10 minutos sob tensão. Foi projetado na tentativa de diminuir o efeito da temperatura nos resultados medidos.

$$IP = \frac{R_1}{R_{10}} \quad (3.1)$$

Uma vez que o enrolamento não sofre variações notáveis de temperatura durante os 10 minutos em que é ensaiado, pode-se assumir que os valores obtidos para as resistências R_1 e R_{10} , respetivamente ao fim de 1 minuto e 10 minutos, são registados à mesma temperatura. Cancelando assim o fator de correção de temperatura.

Mais uma vez os valores obtidos para este ensaio estão presentes nas normas internacionais, como por exemplo na IEEE Std 43-2000 [11], de onde se retira a recomendação de que o $IP \geq 2$. Considera-se porém desprezado o resultado do IP no caso do valor de R_1 ser superior a 5 MΩ, por se tratar de um valor satisfatório.

3.1.3.1 Índice de absorção (IA) e Índice de envelhecimento (IE)

O índice de absorção é semelhante ao de polarização, sendo a relação entre a resistência medida após 30 segundos e 1 minuto sob tensão. Revela-se um indicador útil se o IP tiver um valor próximo de 1, significando que as correntes de fugas estabilizam num período inferior a 1 minuto.

Outro indicador do estado do sistema de isolamento das máquinas é o índice de envelhecimento, também relacionado com a resistência dos isolamentos, é a razão entre a resistência medida ao fim de 10 minutos ao aplicar uma tensão de 500 V e de 2 500 V (ou outra combinação de tensões, superiores às descritas e desde que a maior seja igual a 5 vezes a inferior).

$$IE = \frac{R_{500}}{R_{2500}} \quad (3.2)$$

O IE é um indicador recente, pelo que não consta, ainda, das normas internacionais, porém tem vindo a ser considerada a avaliação que está presente na tabela 3.2 que se pode encontrar por diversas literaturas.

Tabela 3.2: Avaliação do Índice de Envelhecimento.

IE Calculado	Avaliação
$IE \leq 0,85$	Bom
$0,85 \leq IE \leq 1,10$	Aceitável
$1,10 \leq IE \leq 1,25$	Mau
$1,25 \leq IE$	Perigoso

3.1.4 Ensaio em vazio

O objetivo deste ensaio é registrar os valores das correntes nas fases de um motor enquanto funciona em vazio, isto é, sem nenhuma carga acoplada, à tensão nominal.

Para tal é necessário ter acesso a dispositivos capazes de medir as tensões e as correntes de alimentação da máquina, tipicamente incorporados na banca de ensaios.

Este ensaio pode ser utilizado academicamente, juntamente com o ensaio em curto-circuito, para esboçar o circuito equivalente do motor e assim estimar o seu funcionamento, aqui porém o registo é feito com a finalidade de poder ser comparado o funcionamento da máquina antes e depois da intervenção.

3.1.5 Ensaio de vibrações

O ensaio de vibrações é realizado a fim de determinar os valores da velocidade de vibração da máquina, enquanto esta roda à sua velocidade estipulada de funcionamento.

São efetuadas diversas medições, em diferentes pontos e direções pré-definidos. Com recurso a um medidor de vibrações.

Para a realização deste ensaio deve-se, sempre que possível, assentar o motor sobre calços de borracha. Calços esses cujas propriedades devem respeitar o que está descrito na figura 3.2, retirada da parte 26 da norma IEC 60034 [9].

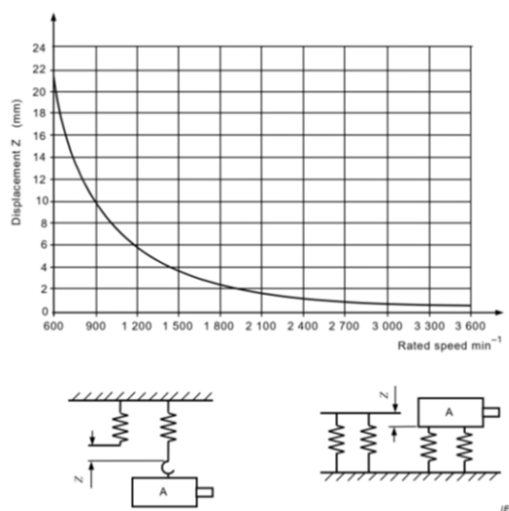


Figura 3.2: Deformação dos calços de borracha em função da velocidade de rotação [9].

As medições devem ser efetuadas consoante as posições descritas na figura 3.3 abaixo. Onde o lado do ataque (**LA**) representa o lado da máquina onde tipicamente o veio está exposto e onde se efetuam as transferências de energia mecânica, já o lado oposto ao lado do ataque (**LOA**) representa, precisamente, o lado oposto. Os termos na literatura inglesa são, respetivamente, *Drive End* (DE) e *Non-Drive End* (NDE ou apenas NE).

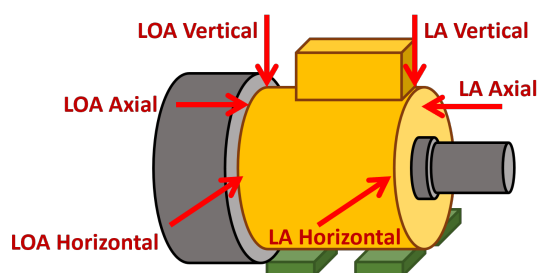


Figura 3.3: Orientação das medições de vibração.

Mais uma vez, existem valores padronizados para a quantidade de vibração aceitável nas máquinas, consoante a altura de eixo e o tipo de montagem. Tais limites de vibração estão descritos na norma IEC 60034 parte 14 (que foca em detalhe o tema das vibrações) e apresentado na tabela 3.3. Existem diferentes graus de vibrações, consoante requisitos especiais, estando somente apresentado abaixo o mais rigoroso, o grau B.

Tabela 3.3: Limite de velocidade de vibração (mm/s) [9].

Montagem	Altura de eixo (mm)	
	$56 \leq H \leq 132$	$132 < H$
Suspensão livre	1,1	1,8
Fixação rígida	-	1,5

3.1.6 Ensaio dos circuitos auxiliares

O ensaio dos circuitos auxiliares é realizado, nas máquinas que os possuem, a fim de averiguar o estado de funcionamento dos dispositivos de proteção e funções auxiliares presentes na máquina.

Para cada tipo de dispositivo de proteção a avaliar são tomados procedimentos diferentes, os mais frequentes estão listados de seguida. Seguidos dos restantes circuitos auxiliares.

Termostatos(ipsotérmicos)

Para estes termostatos faz-se a verificação da continuidade do seu circuito. É também medido e registado o valor da resistência do seu isolamento.

Termistores (PTC)

Na presença de termistores procede-se a medir e registar o valor da sua resistência óhmica, assim como a resistência do isolamento.

Resistências termométricas (Pt100)

O procedimento de ensaio destas resistências é semelhante ao aplicado aos termistores, porém diante as Pt100 é necessário comparar os valores obtidos com os das respectivas tabelas ou formulas, tabelas e formulas essas disponibilizadas pelo fabricante das resistências termométricas.

Termopares

O estado dos termopares é verificado medindo e registrando a tensão por eles gerada, assim como a medição da resistência de isolamento.

Resistências anti-condensação

As resistências anti-condensação são elementos que impedem que a humidade no interior da máquina atinja valores demasiado elevados durante os períodos em que esta não se encontra em funcionamento.

A humidade degrada o sistema de isolamento da máquina e diminui a sua eficácia, assim sendo, são instaladas resistências, tipicamente junto das testas das bobinas, que entram em funcionamento quando se prevê que a máquina esteja fora de serviço por longos períodos de tempo, mitigando assim o efeito indesejado da humidade no interior da máquina.

Estas resistências podem ser construídas de materiais flexíveis, vulgarmente aplicadas a máquinas de baixa tensão; ou serem rígidas, podendo ser encontradas em máquinas das várias gamas de tensões.

Neste caso, é medido e registado os valores da resistência óhmica, assim como medir a resistência do isolamento (a 500 V).

Outros dispositivos

Na eventualidade da máquina a ensaiar possuir dispositivos variados de outra natureza, deve-se adotar procedimentos que vão de acordo com as suas especificidades e, por ventura, quaisquer indicações disponibilizadas pelo cliente.

Respeitando sempre que possível valores de referência especificados em normas internacionais ou documentos da especialidade técnica.

3.1.7 Ensaio de tensão rotórica - motores de rotor bobinado

Este ensaio é apenas efetuado aos motores cujo circuito do rotor seja do tipo bobinado e tem como objetivo averiguar se o valor da tensão no rotor é correspondente ao estipulado.

O ensaio decorre com a máquina parada, com as fases do circuito do rotor desligadas entre si. Aplica-se a tensão nominal aos terminais do estator e regista-se, recorrendo a um voltímetro, a tensão gerada no circuito do rotor.

Os valores da tensão no circuito do rotor são estabelecidos pelo fabricante da máquina, pelo que desvios acentuados entre o valor medido no ensaio e o estipulado podem demonstrar anomalias num, ou ambos, dos circuitos.

3.1.8 Ensaio em curto-circuito e de oscilação de corrente - motores de rotor em curto-circuito

Estes procedimentos só são realizados em motores cujo rotor é em gaiola de esquilo e quando há suspeitas de mau estado da gaiola rotórica.

O ensaio em curto-circuito realiza-se com o rotor bloqueado e pretende-se averiguar o valor da tensão de curto-circuito, seja: a tensão necessária a aplicar aos terminais da máquina para que, com o rotor bloqueado, surjam valores de correntes semelhantes às estipuladas no seu funcionamento em regime normal. Para tal são utilizados os equipamentos de medida presentes na bancada. O ensaio deve ser repetido para diferentes posições do rotor.

Os resultados obtidos a partir deste ensaio permitem avaliar o estado de saúde da gaiola de esquilo que constitui o rotor, observando se são verificadas flutuações nos valores das correntes recolhidas para diferentes posições do rotor. Seguindo a expressão:

$$\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} \quad (3.3)$$

onde I_{max} representa a corrente máxima registada para qualquer posição do rotor e I_{min} o valor mínimo da corrente para outra qualquer posição.

No caso da gaiola rotórica se encontrar em bom estado, as gamas de correntes registadas para as diversas posições devem ser semelhantes, relação anterior inferior a 10 %, caso contrário é um indício de alguma anomalia no circuito elétrico do rotor.

3.2 Ensaaios Complementares

Há ainda mais ensaios que podem ser conduzidos nas máquinas elétricas de modo a avaliar o seu funcionamento, averiguar o estado dos seus constituintes e verificar parâmetros de operação. Estes ensaios descritos de seguida tendem a ser realizados quando: se pretende despistar alguma suspeita de mau funcionamento; para certificar se a máquina está em conformidade com normas estipuladas; ou, simplesmente, a pedido especial do cliente ou quando assim for relevante.

3.2.1 Ensaio de onda de choque (*Surge Test*)

A existência de curto-circuitos entre espiras, devida principalmente à degradação do material isolante, pode ser detetado com o ensaio de onda de choque.

O ensaio é realizado com a máquina desmontada, sem o rotor, de modo a evitar certas interferências que poderiam ser causadas por este e conduzir a conclusões erradas.

O teste consiste em aplicar uma tensão bastante elevada, em comparação com a estipulada, durante um espaço muito curto de tempo (um impulso), entre uma das fases e a massa da máquina e observar a forma de onda que é formada. Tal é feito com recurso a um dispositivo próprio, denominado por aparelho de onda de choque, cujo ecrã está representado na figura 3.4.

A tensão a aplicar varia de máquina para máquina, e do estado de uso dos enrolamentos, uma vez que para enrolamentos de uma máquina que não seja “nova” o valor a aplicar é inferior ao dos enrolamentos novos, cerca de 65 % a 75 %. Os valores aconselhados a serem aplicados no teste variam consoante a norma que for consultada, a expressão 3.4 apresenta o que consta na parte 15 da IEC 60034, que descreve em pormenor os níveis de impulsos de tensão que as máquinas rotativas (novas) de corrente alternada devem suportar.

$$V_{Surge} = 4 \times U_N + 5\,000 \text{ [V]} \quad (3.4)$$

O processo é repetido para as restantes fases e é feita a comparação, por sobreposição, das formas de onda obtidas.

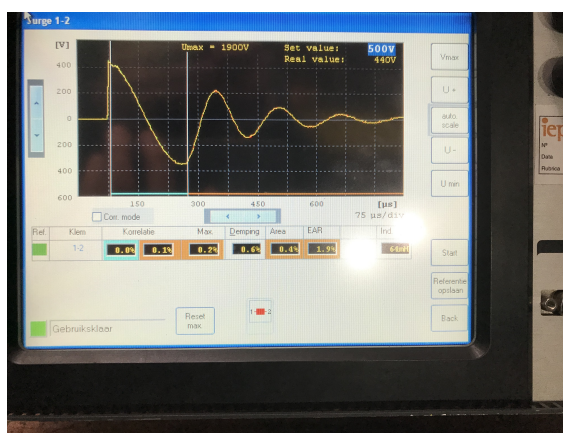


Figura 3.4: Forma de onda do ensaio de onda de choque (*Surge Test*).

O critério de aceitação é relativamente simples, todas as formas de onda obtidas, semelhantes à da figura 3.4 tem que ser idênticas, as curvas devem-se sobrepor, comprovando assim a uniformidade dos enrolamentos. Qualquer disformidade entre as formas de onda indica a existência de anomalias num ou mais enrolamentos.

3.2.2 Ensaio de anel

O ensaio de anel realiza-se nas máquinas a rebobinar, é efetuado após serem desbobinadas, apesar de, quando possível, se realizar também antes de serem desbobinadas. Estando perante motores com danos no circuito magnético e onde parte das lâminas que constituem o estator sejam separadas das restantes, deve-se realizar o ensaio antes e depois a reparação dos danos.

O principal objetivo é averiguar a existência de “pontos quentes” no circuito magnético.

Os “pontos quentes” são causados por anomalias no núcleo magnético e devem-se tipicamente à rotura do material isolante colocado entre as chapas magnéticas que o constituem. O contacto direto entre chapas permite a formação de correntes de *Foucault* mais intensas, provocando: o aquecimento do material, a diminuição do rendimento, a danificação dos enrolamentos que estão diretamente em contacto com esse ponto do circuito magnético [2].

As correntes de *Foucault*, também denominadas por correntes parasitas, são correntes que se formam no interior do núcleo ferromagnético, induzidas pelo fluxo magnético que varia no tempo (lei de *Foucault*). Circulando num material resistivo, estas correntes dissipam energia na forma de calor.

Tipicamente formam caminhos circulares, assemelhando-se a vórtices ou remoinhos, que deram origem ao nome na literatura inglesa de *eddy currents*.

A quantidade de energia dissipada depende do tamanho dos vórtices formados e da resistividade do material. Onde vórtices maiores dão origem a correntes mais intensas, resultando no aumento das perdas; e onde materiais com maior resistividade fazem diminuir o fluxo de corrente, reduzindo assim as perdas.

Os procedimentos a seguir para este ensaio resumem-se à colocação de espiras à volta do núcleo magnético às quais se aplica uma tensão. Tensão esta que faz gerar um campo magnético que irá originar as correntes de *Foucault* referidas anteriormente nas chapas magnéticas do núcleo, dando origem a um aumento anormal de temperatura mais significativo em certos pontos onde houver curto-circuitos entre as chapas.

A análise da temperatura do núcleo é efetuada utilizando uma câmara termográfica, que capta imagens semelhantes às da figura 3.5.



Figura 3.5: Imagem da câmara termográfica.

O número de espiras (voltas de fio) que envolve a armadura do núcleo magnético (e a carcaça da máquina, no caso de não ser extraído) é calculado em função das suas dimensões. Já a tensão a aplicar varia com a quantidade de espiras, uma vez que se costuma considerar a densidade do fluxo magnético induzido para a realização deste teste seja de 1 Tesla [12].

Deve ser registada a análise termográfica do núcleo do estator antes de ser submetido ao fluxo originário pelo ensaio. Uma vez aplicada tensão, deve-se repetir a análise termográfica em intervalos de tempo pré-estabelecidos (e.g. 5 minutos) a fim de detetar os pontos quentes que surjam assim como avaliação a evolução da temperatura nesses mesmos pontos.

O estator da máquina a ensaiar deve estar sujeito a este teste pelo menos durante 15 minutos, podendo a duração total variar consoante a evolução dos valores da temperatura registada.

Considera-se uma situação de anomalia quando a temperatura dos pontos quentes registados é superior a 10°C face à temperatura do resto do núcleo magnético.

3.2.3 Controlo do enchavetamento

O controlo do enchavetamento consiste em verificar a firmeza do enchavetamento dos enrolamentos das máquinas cuja construção consiste em bobinas pré-formadas.

Para tal procede-se à inspeção, a olho, das chapas e/ou chavetas, à procura de sinais de deterioração ou danos. Assim como se a distribuição das chavetas é feita corretamente ao longo de todo o comprimento do ferro.

3.2.4 Ensaio de rigidez dielétrica (Sobretensão)

O objetivo deste ensaio é verificar a capacidade do sistema de isolamento da máquina em suportar, sem disrupção elétrica, uma tensão superior à nominal de operação da máquina. Para o efeito é utilizado um equipamento designado por aparelho de rigidez, incorporado no laboratório de ensaios. A máquina obtém avaliação positiva quando não se verifica a disrupção dielétrica.

A disrupção dielétrica é o fenómeno que ocorre quando um meio isolante se torna condutor, resultando numa descarga elétrica. Os átomos do material dielétrico são ionizados e este deixa de funcionar como um isolante. Tal pode ser derivado de vários fatores, como a temperatura, o período de tempo em que é aplicada a tensão e até mesmo a taxa de crescimento da tensão.

O ensaio só pode decorrer após ter sido obtida a validação dos ensaios de medição de resistência do isolamento, cujos resultados garantem as condições para se realizar o ensaio de rigidez. Devendo ser tomados todos os procedimentos normais de segurança, como garantir que o aparelho se encontra desligado aquando da ligação dos cabos e ter sido feita uma descarga dos mesmos à terra.

Relativamente às ligações, os terminais dos enrolamentos que se pretendem testar devem ser ligados entre si e conectados à saída de alta tensão do aparelho de rigidez. A carcaça da máquina deve ser ligada ao terminal de massa do aparelho de rigidez. Todos os restantes elementos (auxiliares) metálicos da máquina, não sujeitos ao ensaio devem ser ligados à terra, juntamente com a própria carcaça.

Nas máquinas cuja tensão nominal é superior a 1 kV e com os terminais de fase separados e acessíveis de forma individual, o ensaio realiza-se com a aplicação da tensão entre cada fase e a carcaça. O núcleo e a restante fase, assim como os restantes elementos que não constituem o ensaio, são conectados à carcaça da máquina.

A tensão a aplicar deve ser de $[2 \times U_N] + 1000 \text{ V } (f_N)$, tal como prevista na primeira parte da norma IEC 60034, secção 9.2 [9].

Para os casos em que a máquina a ensaiar for sujeita a reenchavetamento, seja ele total ou parcial, os valores de tensão do ensaio devem ser acordados com o cliente, podendo variar tipicamente entre $[1, 1 ; 1, 3] \times U_N$.

O procedimento de ensaio consiste na elevação da tensão, de forma controlada e gradual, até ao valor especificado ou acordado anteriormente; manter a tensão do ensaio durante 1 minuto e no fim deste período baixar o mais brevemente possível a tensão de alimentação.

Uma vez desligado o equipamento de rigidez, o elemento da máquina que foi sujeito à tensão do ensaio deve ser ligado à terra, enquanto que o terminal de massa deve permanecer também ligado à terra até ser desconectada a saída de alta tensão do aparelho, permitindo assim a descarga de eventuais tensões residuais e promovendo a segurança dos intervenientes.

Observação: Perante máquinas com tensão nominal superior a 6 kV e não tendo ao dispor um equipamento de rigidez capaz de disponibilizar a frequência pretendida, pode ser realizado o ensaio com tensão contínua, de valor 1,7 vezes superior ao valor eficaz apresentado anteriormente, sempre sujeito à aprovação por parte do cliente.

3.2.5 Ensaio de campo girante

Este ensaio é apenas conduzido em máquinas cujo estator foi rebobinado e a sua função é averiguar se as ligações dos enrolamentos que constituem as bobinas das fases estão corretamente efetuadas, produzindo um campo magnético girante.

O ensaio é efetuado na máquina sem o rotor no seu interior.

Para este efeito recorre-se a um aparelho próprio, um dispositivo de verificação de campo girante e o procedimento consiste na alimentação do estator a uma tensão reduzida e em percorrer o seu perímetro interior com o dispositivo de verificação.

Caso as ligações estejam bem efetuadas e o campo magnético produzido esteja de acordo com o pretendido, o dispositivo roda sempre no mesmo sentido, percorrendo todo o perímetro interior do estator da máquina.

3.3 Ensaaios finais

Há mais um conjunto de ensaios que devem ser realizados aquando do final da intervenção, de modo a comprovar a qualidade do trabalho efetuado.

A maior parte destes ensaios constam também na lista dos efetuados na receção das máquinas, tendo sido detalhados previamente, sendo eles:

- Medição da resistência óhmica;
- Medição da resistência óhmica do isolamento (entre fase e massa e entre fases);
- Determinação dos índices de polarização e de absorção;
- Ensaio em vazio;
- Análise de vibrações;
- Ensaio dos circuitos auxiliares;
- Ensaio de tensão rotórica - aos motores de rotor bobinado.

3.3.1 Outros ensaios

Pontualmente podem ser realizados ensaios específicos para além dos exemplificados, de forma a averiguar as condições da máquina e dos seus constituintes.

Estes ensaios devem promover as regras típicas de segurança, assim como serem tomadas as devidas precauções prévias à sua realização. Devem também, sempre que possível, basear-se em técnicas descritas e valores referidos nas normas e padrões internacionais, a fim de irem de encontro às expectativas dos padrões de qualidade.

3.3.2 Registo dos resultados

O registo dos resultados é efetuado fazendo sempre referência à máquina que está a ser sujeita às intervenções, assim como as condições em que são feitos os ensaios (e.g. temperatura, humidade, ligação, ...), os parâmetros com que são feitos os ensaios e os equipamentos utilizados (e.g. valores das grandezas aplicadas, aparelhos, ...), imagens anexas, quaisquer informações adicionais que se sejam relevantes e permitam o melhor entendimento dos resultados obtidos.

Na atualidade o registo é feito predominantemente em formato de papel, porém há já a introdução de alguma informação de forma digital e prevê-se que no futuro os dados sejam, na maioria, recolhidos de forma autónoma, facilitando a geração de relatórios finais.

3.3.3 Condições de segurança e Local de ensaios

No decorrer exemplar dos ensaios às máquinas elétricas devem ser seguidos protocolos de segurança, que permitem manter a integridade física das pessoas e bens intervenientes.

Assim como os ensaios devem tomar lugar num local apropriado para o efeito, uma vez que contribui para a segurança das pessoas, assim como para a qualidade e dos resultados obtidos.

Este local deve reunir condições que o tornem propício a tal, havendo diversos fatores que o tornam adequado para a sua utilização.

Por ser um dos principais focos do trabalho desta dissertação, a secção 4.3.4 relata em mais pormenor os tópicos relacionados com o local dos ensaios e consideração de segurança.

Capítulo 4

Laboratório de máquinas elétricas

O laboratório de máquinas é o grande foco do trabalho desenvolvido sendo este o espaço que se pretende que seja estudado e projetado.

Há diversas tarefas a completar relativas a este tópico, tal como descrito no capítulo 1:

→ Começando pelo levantamento da situação atual e aparelhagem existente;

→ Seguido pela recolha dos requisitos operacionais da nova configuração;

→ Abordando o planeamento do laboratório no que diz respeito à escolha dos diversos equipamentos, sejam os que fornecem alimentação às máquinas a ensaiar, aqueles responsáveis por fazer o comando dos circuitos perante os diferentes modos de operação, os que tem o dever de medir as grandezas físicas em causa e o dispositivo que está encarregue por recolher e apresentar a informação dessas grandezas fornecidas pelos sensores e derivados, tomando atenção aos encargos pela segurança dos intervenientes, quer das pessoas quer de todo o material;

→ Cobrindo os esquemas de ligação dos diversos elementos, acompanhados de tabelas de correspondência do seu papel no sistema em que estão inseridos assim como o desenho de fluxogramas de funcionamento de todo o laboratório.

→ E ainda considerações acerca do espaço em si, a nível de funcionalidade e segurança.

As secções deste capítulo retratam em pormenor cada uma destas tarefas associadas ao estudo e desenvolvimento do laboratório de máquinas a projetar.

Ter um espaço dedicado à realização de testes e ensaios, dando a possibilidade de controlar cuidadosamente a alimentação da máquina, fazer o registo das diversas grandezas envolvidas e observar o seu comportamento durante a operação, é primordial a qualquer entidade que queira desenvolver atividade na área das máquinas elétricas.

Sendo a IEME uma empresa fortemente inserida neste mercado, possui, desde a sua fundação, um local e diversas ferramentas que possibilitam a realização dos ensaios. Espaço este que, assim como os equipamentos nele contidos, contaram com diversas adições, modificações e melhorias ao longo dos anos. O presente trabalho tem como objetivo propor uma reformulação deste espaço, bem como os seus elementos.

4.1 Situação atual e aparelhagem existente

O estado e disposição atual do laboratório distancia-se de uma implementação ideal. Sendo composto atualmente pelo aglomerado de equipamentos variados e diversas bancadas de ensaios, que foram aproveitadas de outras instalações e adaptadas para melhor satisfazer as necessidades da IEME. Apesar de ser possível efetuar os ensaios necessários à atividade de reparação de máquinas elétricas, descritos anteriormente no capítulo 3, tal só é alcançado recorrendo a vários equipamentos diferentes, consoante as especificações da máquina. Estando sempre presentes limitações intrínsecas aos diversos equipamentos.

No decorrer deste trabalho de dissertação propunha-se elaborar uma solução ideal, centralizando a manipulação dos parâmetros de alimentação e leitura dos resultados numa só interface de comando para a realização dos ensaios.

A seguir está feito o registo da situação atual do laboratório, acompanhado por descrições aprofundadas, podendo-se dividir em 4 grupos: alimentação, medição das grandezas, esquemas de ligação e funcionamento, características do local. É ainda referida a aparelhagem adicional utilizada nalguns ensaios específicos.

4.1.1 Alimentação

A alimentação das máquinas a ensaiar pode ser realizada recorrendo a várias configurações, passando por diversos aparelhos, do mesmo modo, a energia elétrica responsável por alimentar o laboratório em si pode ser oriunda de várias fontes. Assim, de modo a diferenciar conceitos, optou-se por designar a ligação às máquinas a ensaiar como **saída do laboratório** e a ligação que chega ao local como **entrada do laboratório**.

Dos principais equipamentos utilizados consistem 2 duas bancadas de ensaios:

→ Uma destinada a máquinas de baixa tensão, até 750 V, potência até 54 kVA e frequência variável. Designou-se a esta bancada por **máquinas pequenas**;

→ Outra focada nas máquinas mais potentes, até cerca de 1 MVA, suportando tensões até aos 1 500 V. A esta denominou-se **máquinas grandes**.

A alimentação das bancadas pode ser feita através de 2 ligações:

→ Pela rede elétrica, fornecendo energia a uma tensão “fixa” de 400 V e potência até aos 41,4 kVA. Chamou-se a fonte de **rede**;

→ Recorrendo a um gerador trifásico acoplado a um motor a diesel. Este conjunto é capaz de disponibilizar energia elétrica a uma tensão de 400 V, com potência superior a 1 MVA. Optou-se por nomear esta fonte por **grupo diesel**.

O local dispõe ainda de um conjunto de díodos retificadores, capazes de fornecer corrente contínua à saída do laboratório. Designada por **saída DC**.

Com base nesta informação inicial, esboçou-se um primeiro esquema de funcionalidade do laboratório, apresenta na figura 4.1. No decorrer do trabalho esboçaram-se um alargado número de esquemas e diagramas variados, a fim de tentar compreender o funcionamento do laboratório já existente e apresentar hipóteses da nova operação.

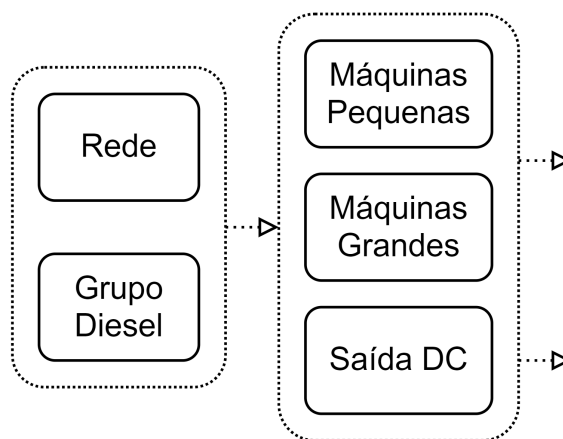


Figura 4.1: Primeiro esquema de funcionamento do laboratório atual.

4.1.1.1 Máquinas pequenas (BMP)

A bancada que se designou por **máquinas pequenas** coloca à disposição, na saída do laboratório, 2 opções:

→ Ligação oriunda diretamente da rede elétrica, passando por um autotransformador motorizado, que permite regular a tensão entre [0 ; 400] V a 50 Hz.

→ Um sistema do tipo *Ward-Leonard*, composto por 6 máquinas rotativas, capaz de fornecer tensões até 750 V e de frequência variável até aos 100 Hz.

A ligação direta da rede, passando pelo autotransformador, é a maneira mais simples de alimentar as máquinas a serem ensaiadas.

A variação da tensão reside na atuação de um pequeno motor trifásico, que faz movimentar as escovas do autotransformador. A inversão de 2 dos terminais de alimentação deste motor faz trocar o seu sentido de rotação, permitindo-o ser acionado para fazer subir e descer a tensão, conforme o pretendido.

A ligação proveniente da rede elétrica faz com que a frequência esteja praticamente fixa nos 50 Hz, sofrendo apenas as pequenas flutuações a que todo o sistema está sujeito. A tensão porém, apesar de ter, teoricamente, o valor fixo de 400 V entre fases (e 230 V de tensão simples), está sujeita às variações imprevisíveis das cargas penduradas a este nó da rede. Tal fenómeno é constatado mais adiante na subsecção 4.1.1.5.

O sistema semelhante a um *Ward-Leonard* apresenta uma alternativa à alimentação oriunda da rede elétrica e consiste num conjunto de 6 máquinas elétricas rotativas:

- 1 Gerador síncrono trifásico
- 1 Motor DC
- 1 Motor AC de indução, trifásico
- 3 Geradores DC

A operação deste sistema pode ser resumido da forma descrita de seguida, acompanhado pelo esquema da figura 4.2.

O motor de indução AC é alimentado pela rede, o seu veio está acoplado aos 3 geradores DC, fornecendo-lhes energia mecânica.

O primeiro gerador DC é utilizado para alimentar o circuito de armadura do motor DC.

O segundo gerador DC alimenta o circuito de campo do motor DC.

O motor DC, acoplado ao gerador AC, fornece-lhe energia mecânica.

O terceiro gerador DC é responsável pela excitação do gerador síncrono trifásico.

O gerado AC fornece energia elétrica trifásica à saída do laboratório.

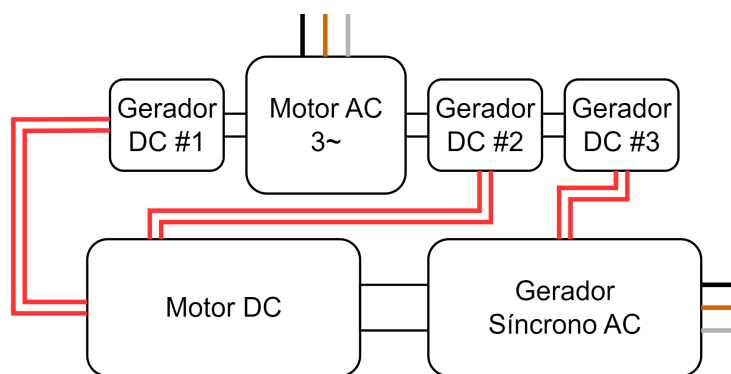


Figura 4.2: Sistema Ward-Leonard da bancada de máquinas pequenas.

As chapas de características do motor DC e do gerador AC estão apresentadas abaixo (figuras 4.3 e 4.4), contemplando as suas principais grandezas, de realçar os valores da tensão e da velocidade de rotação.

SIEMENS-SCHÜCKERT-WERKE AG					
Type G 1592-4		B3		F22	
g Mot. N.º N 608750		VDE 0530			
Isol.-Kl.: Hauptpol E, Wendepol B, Anker B					
V	A	U/min	kW		
440	96...73	1500...3000	38...28		
440	2...6	1500...3000	0		
		3300	max.		
Fremd-Erregung 170...51 V 40...12 A					

Figura 4.3: Características do Motor DC.

SIEMENS-SCHÜCKERT-WERKE AG					
Type F 1592-4		B3		F22	
g Gen. N.º N 756655		VDE 0530		1962	
Isol.-Kl. E					
50/60/100 Hz					
V	A	kVA	cos φ	U/min	
440	Y 42	32	0,3	1500	
650	Y 34	38	0,1	1800	
750	Y 42	54	0,1	3000	
N.º 145/165/135 V3/4/3/9/3/2A Gew. ≈ 0,375t					

Figura 4.4: Características do Gerador AC.

Das características intrínsecas das máquinas observa-se que a velocidade de rotação de ambas alcança as 3000 rpm (rotações por minuto). Verifica-se também que estão indicados valores de

referência da tensão e frequência a que é gerada energia elétrica, para velocidades de rotação e condições de excitação diferentes.

O alternador é capaz de gerar energia elétrica a 50 Hz quando roda a 1 500 rpm; a 60 Hz girando a 1 800 rpm e 100 Hz quando acionado a 3 000 rpm, assim como a todas as frequências intermédias para as respetivas velocidades de rotação. Significando que é a máquina DC impor a frequência a que é gerada energia elétrica utilizada para alimentar as máquinas a ensaiar.

O valor da tensão de saída do alternador pode ser regulado através do seu circuito de excitação (alimentado pelo terceiro gerador DC), que quando percorrido por correntes mais elevadas origina tensões mais elevadas aos terminais de saída do alternador. Essas tensões podem ir até aos 750 V tal como assinalado na figura 4.4.

A velocidade do motor DC é regulada pela tensão de alimentação da armadura, fornecida pelo segundo gerador DC. O aumento de tensão da armadura provoca o aumento da velocidade do motor, assim como a redução da tensão da armadura provoca a redução dessa velocidade.

A tensão de saída dos geradores DC pode ser regulada ajustando as resistências dos circuitos de campo, recorrendo a reóstatos incorporados na bancada. Os circuitos de campo destes 3 geradores DC são alimentados pela rede elétrica.

Em suma, a bancada de máquinas pequenas é capaz de fornecer energia elétrica diretamente da rede, a 50 Hz na gama [0 ; 400] V (potencialmente “desequilibrados”) ou com o sistema *Ward-Leonard* nas gamas [0 ; 750] V e [0 ; 100] Hz.

A compreensão deste sistema requisita conhecimentos relativos a máquinas de corrente contínua, conhecimentos esses que não eram ainda adquiridos. Deste modo, e dadas as circunstâncias do trabalho de dissertação, decidiu-se nesta fase dedicar tempo ao estudo destas máquinas, do qual resultou, entre outras competências, o entendimento deste sistema. Estando assim justificada a referência a estas máquinas e em especial este método de controlo de velocidade na secção 2.1.2.

4.1.1.2 Máquinas grandes (BMG)

A bancada nomeada **máquinas grandes** disponibiliza à saída do laboratório energia elétrica proveniente de um sistema composto por 2 máquinas acopladas:

→ 1 Motor trifásico

→ 1 Gerador síncrono trifásico

As duas máquinas tem potências semelhantes, na ordem de 1 MVA, o motor é alimentado a 400 V.

O motor possui um sistema de regulação de velocidade, que lhe permite rodar a velocidade constante, compensando quando necessário perante variações de carga. Tal permite que o gerador síncrono acoplado produza energia elétrica a uma frequência estável, de 50 Hz.

A tensão à saída do gerador é regulada através da variação da tensão na excitatriz, que é ajustada recorrendo a um reóstato incorporado na bancada (método semelhante aplicado aos geradores

DC vistos anteriormente). No seu limite máximo, o gerador é capaz de fornecer 1 500 V aos seus terminais.

Sintetizando, a bancada de máquinas grandes disponibiliza energia elétrica através de um sistema de motor + gerador, na gama de tensões [0 ; 1 500] V e com frequência constante de 50 Hz.

4.1.1.3 Grupo diesel

A fonte de energia que se denominou por **grupo diesel** é uma alternativa ao uso da rede elétrica e é constituída por:

→ 1 Motor diesel

→ 1 Gerador síncrono trifásico

O veio do gerador está acoplado mecanicamente ao veio do motor.

O motor diesel dispõe de um regulador, manual, de velocidade, ajustado de modo a permitir ao gerador produzir energia elétrica a uma frequência de 50 Hz. Apesar deste sistema não ser automático, devido à elevada potência e robustez do motor, não houve até ao momento situações onde a uma carga por este grupo alimentada causasse variações perceptíveis de frequência.

O gerador síncrono possui um sistema de AVR - *Automatic Voltage Regulator*, não necessitando assim de nenhuma fonte externa para o circuito de excitação. Tal sistema foi desenvolvido e implementado de modo a que a tensão de saída seja constante, de 400 V.

Da maneira como está implementado, o grupo diesel consegue substituir por completo a ligação do laboratório ao resto da instalação elétrica do edifício, ficando a funcionar “em ilha”. É também consideravelmente mais potente que a ligação da rede, dando a possibilidade de ensaiar máquinas de maior porte, o que não seria possível de outra forma.

Uma vez que a empresa não dispõe de um posto de transformação próprio, sendo cliente de energia em baixa tensão, o grupo diesel, aliado à bancada das máquinas grandes, é a solução a que se recorre quando há necessidade de ensaiar máquinas de média tensão mais potentes.

Devido à disposição da instalação elétrica atual, não é possível utilizar a energia disponibilizada pelo grupo diesel, para alimentar diretamente as máquinas a ensaiar, sendo esta energia usada para alimentar o conjunto da bancada de máquinas grandes que, por sua vez, alimenta as máquinas a ensaiar. É devido a esta particularidade que, apesar de se desconhecerem as características do alternador, se conclui que a potência tem de ser superior a 1 MVA (potência da bancada de máquinas grandes) já que não houve qualquer máquina ensaiada desta forma que tenha causado um decréscimo na velocidade do motor diesel.

4.1.1.4 Saída DC

A **saída DC** do laboratório consiste numa ponte retificadora com 6 díodos capazes de fazer a retificação de corrente trifásica para corrente contínua.

A regulação da tensão de saída obtém-se manipulando a tensão de entrada dos díodos, recorrendo ao mesmo autotransformador da banca das máquinas pequenas.

4.1.1.5 Desequilíbrio da alimentação da rede

As flutuações de carga causam perturbações à alimentação proveniente da rede elétrica. As variações motivam desequilíbrios de tensão consideráveis entre fases, especialmente quando, estão a ser alimentadas cargas monofásicas (essencialmente resistivas), na própria instalação elétrica da empresa, que sobrecarregam as fases da rede de forma não homogênea.

Foi possível constatar este efeito no decorrer um dos ensaios que tinha como objetivo a demonstração do laboratório, durante os primeiros dias do desenvolvimento do trabalho:

Estava a ser ensaiado um motor trifásico de 750 W, 400 V (Y) alimentado diretamente pela rede, passando pelo autotransformador, como descrito anteriormente. Sabia-se à priori que o motor era equilibrado e não sofria de nenhuma anomalia à sua construção ou operação, tal como o autotransformador.

Durante o ensaio em vazio, as correntes registadas em cada uma das fases, medidas recorrendo a uma pinça amperimétrica, apresentaram desvios: em duas das fases circulavam correntes que rondavam os 0,50 A e na outra de 0,60 A, apesar de se tratarem de valores de pequena magnitude, representam um desvio na ordem dos 20 %.

Podendo estar perante um defeito construtivo do motor, algo pouco provável devido a se tratar de uma máquina nova, que inclusive fora previamente testada e comprovada a sua conformidade, decidiu-se trocar a ordem das fases que a alimentavam a fim de despistar de onde era proveniente a anomalia. Verificou-se que o desequilíbrio manteve-se, no mesmo condutor de alimentação da rede e numa diferente fase do motor, comprovando assim que se tratava de um fator não relacionado com o motor a ser ensaiado.

O laboratório, quando é alimentado pela rede como nesta configuração, recebe energia a partir do mesmo “ponto” de onde está ligado o resto do edifício, nomeadamente os escritórios, armazém e, ainda mais relevante para análise em questão, a oficina onde se realiza todo o trabalho. Na oficina há uma vasta utilização de cargas monofásicas, como por exemplo: berbequins, parafusadoras, rebarbadoras, pistolas de ar quente, entre outras, que não estão devidamente repartidas pelas 3 fases, fruto dos circuitos de tomadas a que estão ligadas e à imprevisibilidade da utilização. Criando deste modo situações em que as 3 fases a alimentar os motores a ensaiar não estejam equilibradas.

Esta hipótese é fundamentada por uma situação caricata: o ensaio estendeu-se durante a “pausa” do pessoal que estava a trabalhar na oficina, que deixaram de utilizar as referidas ferramentas, e os desequilíbrios registados previamente diminuíram consideravelmente, para valores inferiores a 10 %. Comprovando assim a principal causa do desequilíbrio da alimentação e demonstrando a volatilidade que este método de alimentação das máquinas tem em distorcer os resultados.

O autotransformador, sendo um elemento intermédio entre a rede e a máquina, pode ser também uma das causas da falta de coerência entre as tensões, derivado de um possível desalinhamento dos contactos das escovas nas 3 fases.

4.1.1.6 Uso de geradores

Na subsecção anterior foi dada a conhecer um dos problemas da utilização da energia elétrica proveniente diretamente da rede e justificada o porquê de evitar ser utilizada.

Assim, uma solução que mitiga consideravelmente estas situações de desequilíbrio é a utilização de geradores para a produção da energia elétrica que alimenta as máquinas durante os ensaios. Os geradores síncronos trifásicos conseguem fornecer uma onda com maior qualidade e consistência, estando as 3 fases em equilíbrio.

A configuração mais comum para este tipo de aplicações é ter um motor com o veio acoplado ao veio de um gerador. O motor é alimentado por uma fonte externa (pela rede ou por outra em causa) e fornece energia mecânica ao gerador. Já o gerador recebe a energia mecânica do motor e transforma-a em energia elétrica aos seus terminais.

Assim sendo, o limite de potência elétrica aos terminais de saída do gerador, é imposto pela potência mecânica que o motor consegue por à disposição no seu veio. Habitualmente é possível ajustar a tensão de saída do gerador.

As máquinas mais utilizadas como geradores são as máquinas síncronas trifásicas: a frequência a que geram energia elétrica depende apenas da sua velocidade de rotação e a tensão de saída é variável consoante a corrente DC que circula na excitatriz. O circuito da excitatriz é, sempre que possível, alimentado pela mesma fonte que fornece energia elétrica ao motor.

As máquinas utilizadas como motor costumam ser dos 2 tipos, síncronas ou assíncronas (de indução), cada uma com configurações operacionais diferentes.

No caso das máquinas síncronas é utilizada uma máquina com a mesma velocidade nominal que o gerador, sendo comum escolherem-se máquinas com grandezas estipuladas que garantam a máxima compatibilidade. Os terminais do estator do motor são alimentados pela fonte escolhida, assim como o circuito da excitatriz, com o respetivo retificador.

Caso seja escolhido um motor de indução, opta-se por um com o mesmo número de polos (a mesma velocidade síncrona) do gerador. A alimentação desta máquina deve ser efetuada a partir de um variador de frequência, para um valor de frequência ligeiramente acima da nominal, de modo a que rode à mesma velocidade de sincronismo do gerador a que está acoplado.

O uso de sistemas deste género, compostos por um motor e um gerador, são muito frequentemente adotados pela indústria quando há necessidade de obter energia elétrica com uma qualidade de onda superior à disponibilizada pela rede. Como é o caso dos ensaios de motores elétricos, onde pequenos desvios nas grandezas medidas podem indicar anomalias nas máquinas a serem testadas, deste modo, é imperativo ter uma alimentação fiável e com padrões de comportamento conhecidos e equilibrados para que não sejam introduzidos erros nos resultados e tiradas conclusões erradas.

4.1.2 Medição das grandezas

É essencial conseguir medir adequadamente e com precisão as grandezas elétricas durante os ensaios, para isso é necessário aparelhagem própria, de preferência incorporada no próprio laboratório, nomeadamente: voltímetros, amperímetros, wattímetros, frequencímetro, ...

Há ainda aparelhagem de medida complementar mas igualmente essencial, como é o caso dos multímetros portáteis, em particular com a função de medir a resistência ôhmica, e das pinças amperimétricas, apelidados por “aparelhos de mão”.

Ambas as bancas de ensaios possuem aparelhos de medida, porém estes não se encontravam num exemplar estado de funcionamento.

Os aparelhos de medida da bancada das **máquinas pequenas** estavam num estado já deteriorado, alguns apresentavam erros de medida substanciais, outros não estando mesmo operacionais. Já não podendo ser utilizados de forma fidedigna para o registo dos parâmetros dos ensaios, são atualmente usados como “indicação próxima”, nomeadamente da tensão a aplicar. Posteriormente é ajustada a alimentação e feitas as medições das grandezas com os “aparelhos de mão” (multímetros e pinças amperimétricas).

As figuras 4.5 a 4.8 mostram os mostradores de alguns dos aparelhos de medida da banca das máquinas pequenas (BMP).



Figura 4.5: Voltímetro da BMP.



Figura 4.6: Frequencímetro da BMP.

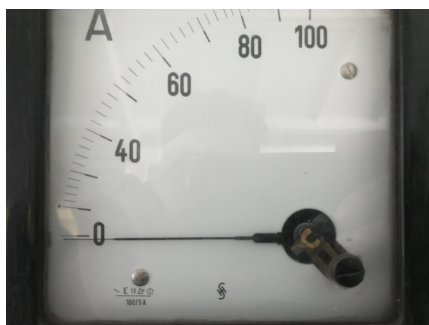


Figura 4.7: Amperímetro da BMP.



Figura 4.8: Wattímetro da BMP.

Como se pode observar, todos os mostradores são analógicos, o que dificulta a medição exata das grandezas, mesmo quando eram novos e estavam a funcionar corretamente.

A bancada das **máquinas grandes** foi uma aquisição mais recente e com características mais modernas, nomeadamente ecrãs digitais onde aparecem as grandezas medidas. Possui 3 ecrã onde são apresentadas: as tensões (entre as fases), a corrente (por fase) e a frequência, alternadamente, com a comutação feita nos botões da bancada.

Ao contrário do verificado na banca das máquinas pequenas, os aparelhos de medida da bancada das máquinas grandes apresentam informações exatas relativas às tensões, correntes e frequência. O problema reside no facto de apenas alguns destes equipamentos estarem operacionais, nomeadamente só ser possível observar a tensão entre 2 dos 3 pares de fases de alimentação da máquina e a medição da corrente só ser executada numa das fases.

Considerando um sistema equilibrado, estariam ao dispor as informações necessárias para fazer uma avaliação das grandezas envolvidas, porém, dado se tratar de um ambiente onde é imperativo avaliar a coerência entre os enrolamentos de fase das máquinas é essencial obter as medições para as 3 fases.

Assim sendo, mas uma vez os valores disponibilizados pelos aparelhos da bancada são encarados como indicativos, sendo a medição exata efetuada com os “aparelhos de mão”.

4.1.3 Esquemas de ligação e funcionamento

Qualquer instalação elétrica que é projetada deve ser acompanhada de esquemas da sua configuração. A finalidade destes esquemas é possibilitar a avaliação da segurança e eficácia, permitir a montagem e correta manutenção da mesma, tornando possível a alteração de partes da instalação ao longo dos anos (alterações essas que devem também ser esquematizadas e documentadas e anexadas junto dos iniciais).

Tal como referido anteriormente, ambas as bancadas foram aproveitadas de outras instalações, de onde mais tarde foram desmontadas, transportadas até à IEME, montadas de acordo com as limitações de espaço e de modo a corresponder às necessidades da empresa, sofrendo inclusive algumas alterações com o passar dos anos.

Há alguns registos dos esquemas de ligação e guias de funcionamento de ambas as bancadas quando foram projetadas, porém, muita informação está em falta e aquela a que há acesso não é completamente fidedigna, por várias razões, algumas das quais expostas de seguida:

→ O facto da informação estar incompleta, faltando descrições das máquinas ou da aparelhagem usada e até segmentos completos da instalação.

→ Os esquemas terem sido desenhados como “projeto” antes da primeira instalação, caso tenha havido modificações aquando da implementação, não foram documentadas ou não há acesso.

→ As máquinas e a aparelhagem estiveram em funcionamento durante vários anos nos seus local de origem, onde provavelmente sofreram intervenções de que não há registo.

→ Não há garantias de que a desmontagem das bancadas do seu local de origem foi feita de maneira rigorosa ou muito menos cuidada, ainda para mais dada a complexidade da instalação.

→ Há porém certezas de que a instalação destas bancadas atualmente implementada na IEME não está de acordo com os esquemas a que há acesso, uma vez que foi possível contactar com o responsável pela instalação, que se recorda vivamente que “procurou seguir o mais possível as indicações que ainda restavam, mas a falta de alguns componentes e diversos elementos não o permitiu” e ainda que “desde que está na empresa, sofreu alterações a fim de melhor servir as necessidades atuais e devido a avarias que foram entretanto surgindo” das quais não foi feito o registo.

Mesmo assim, abaixo estão apresentados alguns exemplos dos esquemas que foram analisados, com o objetivo de tentar entender melhor os aparelhos que poderiam estar implementados. Já que mesmo no seu estado incompleto e potencialmente incorreto poderiam fornecer informações relevantes acerca das instalações.

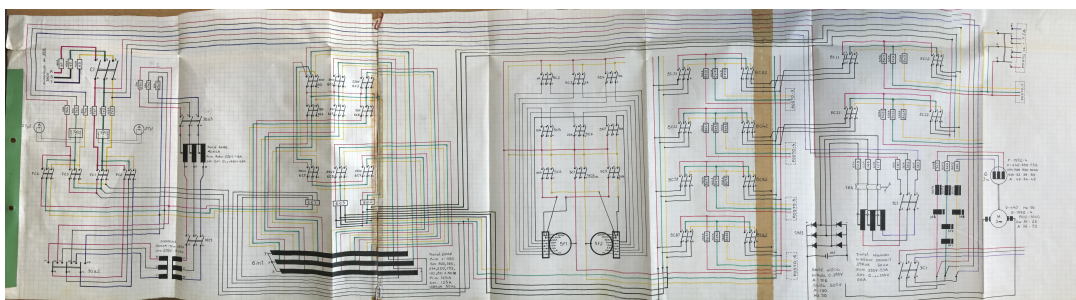


Figura 4.9: Antigo esquema de ligação de parte da BMP - Exemplo 1.

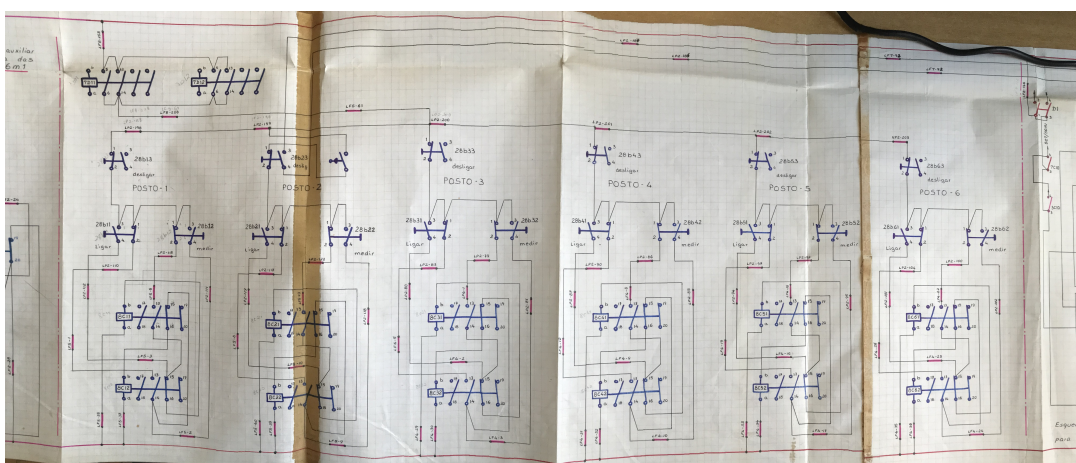


Figura 4.10: Antigo esquema de ligação de parte da BMP - Exemplo 2

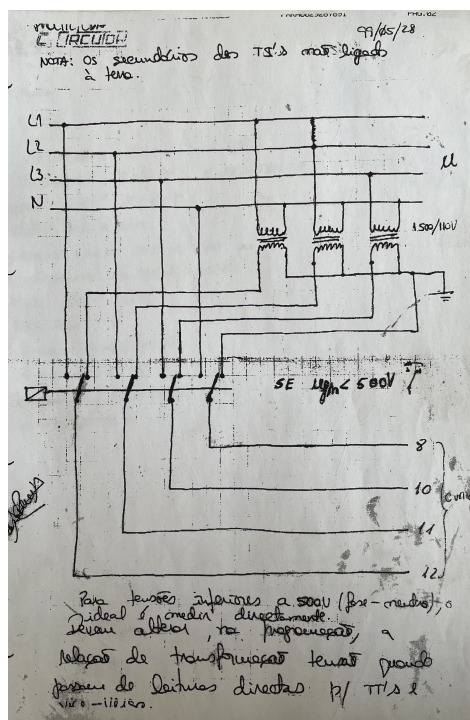


Figura 4.11: Antigo esquema dos TT's.

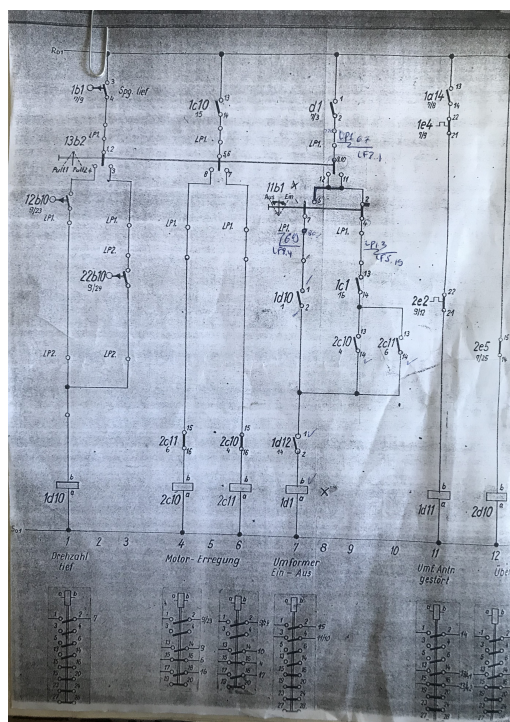


Figura 4.12: Antigo esquema de ligação de parte da BMP - Exemplo 3

Os esquemas encontrados e analisados correspondiam a diversas partes constituintes das bancadas, sendo “complementares” entre si. Uns apresentavam esquemas elétricos da instalação, outros eram mais descritivos e referenciavam as máquinas que tinham sido escolhidas e utilizadas.

Apesar da sua utilidade ser reduzida perante a situação e questão, foi graças aos documentos analisados que se comprovou algumas ideias relativas ao funcionamento das bancadas. Um exemplo desta utilidade surgiu no tema do sistema *Wald-Leonard* da BMP, tendo dado a indicação que as máquinas auxiliares se tratavam de 3 geradores DC (para além do motor AC).

4.1.4 Layout

O “laboratório de ensaios” é composto por 2 secções separadas:

→ Perímetro delimitado por grades, onde são colocadas as máquinas a ensaiar, estando à disposição os cabos de ligação das saídas do laboratório.

→ Local fechado, onde estão as bancas de ensaio e onde se fazem as comutações para as configurações de ligação desejáveis, tendo uma janela que permite a visualização das máquinas durante o ensaio.

Um esquema grosseiro da disposição do espaço está representado na figura 4.13, onde a **verde** está representada a bancada das máquinas pequenas, a bancada de máquinas grandes está simbolizada a **roxo** e o retângulo **azul escuro** mostra uns armários elétricos; o tracejado **azul claro** dá a indicação da janela e as linhas paralelas **laranja** pretendem simbolizar o portão e porta de correr

para a entrada de pessoas e das máquinas; o círculo com cruz **vermelha** representa a sinalização visual (e sonora) existente do local.

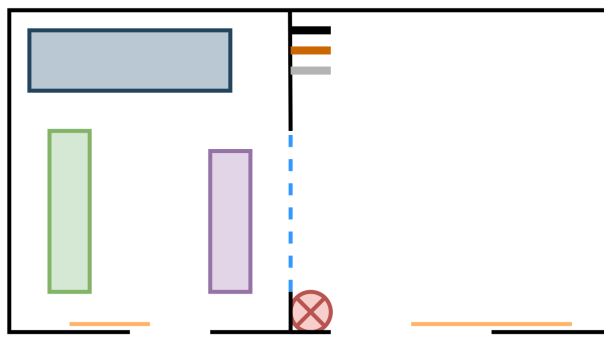


Figura 4.13: Disposição atual do laboratório.

O laboratório foi concebido para que fossem usados apenas os aparelhos de medida das bancas, pelo que o operador se mantinha no seu posto de controlo, no interior da secção esquerda, enquanto a máquina a ensaiar encontrava-se no espaço da direita, com o portão fechado.

Atualmente, não só devido ao estado da aparelhagem de medida incorporada nas bancadas relatada na secção 4.1.2, mas também à necessidade de efetuar medições na própria máquina (exemplo: vibrações, velocidade, temperatura, etc.) o técnico responsável tem necessidade de, durante o decorrer de um ensaio, se deslocar várias vezes entre o posto de comando e a máquina.

Tal situação levanta preocupações relativas à segurança das pessoas, uma vez que, apesar de existir sinalização sonora e visual de alerta enquanto estão a decorrer os ensaios, não existe uma barreira física entre pessoas que possam estar a passar pela zona de ensaios e a máquina e respetiva alimentação. Para além disso, não é aconselhável a zona de controlo ser deixada não supervisionada, especialmente porque na eventualidade de ser detetada uma anomalia enquanto o técnico realiza as medições, tem uma grande distância a percorrer até que seja acionado um botão de paragem de emergência.

4.1.5 Aparelhagem extra

A realização de certos ensaios descritos no capítulo 2 necessitam de aparelhos especiais que não constam da bancada do laboratório, sendo “portáteis” e utilizados quando necessário. A IEME possui os equipamentos que necessita e estes encontram-se em boas condições de funcionamento:

Os equipamentos disponibilizados e utilizados são:

Ohmímetros: Os ohmímetros são dispositivos que permitem medir resistências, e podem ser especializados em gamas de medida específicas. Para averiguar o valor de resistências pequenas, utiliza-se um microhmímetro, permitindo obter precisão para além dos 0,001 Ω , útil na medição dos circuitos auxiliares e das sondas de temperatura. No caso das elevadas resistências, como

as dos sistemas de isolamento, faz-se uso de um megahomímetro, que permite medir resistências até aos milhares de Ω . Para as situações mais corriqueiras utiliza-se a função de ohmímetro dos multímetros, que permitem obter um valor satisfatório para a maioria das aplicações na gama $[0,01 ; 10\,000] \Omega$.

O princípio de funcionamento destes aparelhos é semelhante: a aplicação de uma tensão fixa aos terminais do material a medir, registar a intensidade de corrente que circula, calcular a resistência através da Lei de Ohm.

Termohigrómetro: Um termohigrómetro é um dispositivo que permite medir a temperatura e humidade do ar. É utilizado na maioria dos ensaios para anotar condições do meio ambiente, uma vez que certas grandezas físicas variam com estas condições, sendo importante o seu registo.

Conta-rotações (ou Tacómetro ou Taquímetro): Os conta-rotações, também designados por tacómetros ou taquímetros, são aparelhos que medem a velocidade de rotação das máquinas. Importantes para averiguar se a velocidade de rotação vai de encontro ao esperado.

Habitualmente recorrem a um feixe laser apontado a um secção refletora e apresentam um resultado em rotações por minuto (rpm).

Pinça amperimétrica: As pinças amperimétricas são recorrentemente utilizadas na medição da intensidade de corrente nos cabos de alimentação das máquinas, representando, conforme a ligação dos enrolamentos da máquina, a intensidade de corrente que circula. Recorrem à “ação de transformação” para medir a corrente que circula no cabo que é abraçado pela pinça.

Tipicamente possuem ligações por terminais que permitem medir a tensão e assim calcular o valor da potência.

Multímetros: Os multímetros são aparelhos bastante versáteis, proporcionando a medição de várias grandezas com uma precisão a maior parte das vezes satisfatória. Incorporam vulgarmente a função de: voltímetro, ohmímetro, amperímetro e frequencímetro, podendo ser complementados com ainda mais funcionalidades.

Os voltímetros incorporados nos multímetros são também utilizados com bastante frequência para a medição da tensão de alimentação das máquinas face as condições atuais.

Aparelho de medição de vibrações: O sensor (acelerómetro) deste dispositivo é colocado sobre a superfície da máquina e dá uma leitura da velocidade das vibrações sentidas, em mm/s . É utilizado no ensaio de medição de vibrações.

Aparelho de onda de choque: O aparelho de onda de choque é utilizado no ensaio com o mesmo nome e tem o papel de aplicar a tensão e apresentar os resultados.

O dispositivo consegue: criar e aplicar a onda de tensão, consoante o valor pretendido, aos terminais da máquina; e posteriormente apresentar a forma da onda registada e compará-la com as restantes fases da máquina, às quais é aplicada a mesma onda.

Câmara termográfica: Esta câmara permite observar a temperatura dos materiais, através da medição dos raios infravermelhos por eles libertados. É utilizado maioritariamente durante o ensaio de anel para a verificação de pontos quentes no núcleo ferromagnético.

Aparelho de rigidez: Este dispositivo é o responsável pela aplicação da alta tensão para o ensaio de rigidez dielétrica (sobretensão).

Dispositivo de verificação de campo girante: É o aparelho com capacidades para averiguar a o campo magnético girante que surge nas máquinas elétricas rotativas. Este aparelho revela a sua utilidade no decorrer do ensaio de campo girante.

4.2 Requisitos operacionais

A segunda principal tarefa foi averiguar quais as capacidades desejáveis do novo laboratório, tanto a nível que proporcionar alimentação às máquinas, como no que diz respeito às medições das grandezas envolvidas.

4.2.1 Alimentação

No que toca a alimentação do laboratório e das máquinas a ensaiar pretende-se que estejam ao dispor praticamente as mesmas soluções atuais, mas integradas numa só bancada de comando de operações.

Assim sendo, pretende-se manter as duas fontes de alimentação, a rede elétrica e o grupo diesel. Sendo favorável ter a possibilidade de colocar o laboratório a funcionar em “ilha” e uma vez que constitui a única opção para se ensaiar as máquinas mais potentes.

Foi estudada a opção de implementação de um posto de transformação próprio na instalação, trocando o fornecimento de energia para média tensão. Porém, tal requer: um investimento na aquisição do aparelho, e na alocação de um sítio para o colocar, com as devidas medidas de segurança; alterar um porção significativa da instalação do edifício; uma mudança na faturação da comercialização de energia, apesar do preço da energia em si ser mais barata, as taxas e tarifas adicionais associadas poderiam não compensar; fortalecimento do ramal de alimentação ao edifício.

Aliado ao facto do volume de ensaios que requerem o acionamento do gerador a diesel ser reduzido, compensando assim os gastos com o combustível e o investimento que teria de ser feito a alterar a instalação

No que toca às máquinas auxiliares, também se espera que se mantenham, uma vez que, tal como explicado na secção 4.1.1.6, permitem que os ensaios sejam efetuados de forma mais controlada e precisa.

Apesar das máquinas já terem uma idade considerável, são máquinas robustas, de boa qualidade e que atualmente satisfazem as necessidades operacionais da IEME. Sendo mantidas as manutenções periódicas e pontuais reparações, estas máquinas tem a capacidade de continuar a operar durante vários anos. O que se espera que seja algo facilmente exequível uma vez que se trata do dia a dia das atividades da empresa.

Prevê-se porém algumas mudanças, nomeadamente no que toca à alteração do sistema estilo *Wald-Leonard* por uma solução de controlo mais moderno, à base de eletrónica de potência. Mantendo as duas máquinas principais deste conjunto, o motor DC e o gerador AC, explorado mais a diante.

Para além dos geradores, que permitem um controlo preciso da tensão de alimentação até aos 1 500 V e uma potência elevada, no caso da BMG; e a variação da frequência até aos 100 Hz e da tensão até aos 750 V, com menos potência, no caso da BMP, pretende-se também que seja mantida a ligação direta da rede, passando pelo autotransformador.

Apesar das vantagens dos geradores auxiliares na qualidade da alimentação, há situações em que apenas se pretende averiguar fatores menos rigorosos ou testar um equipamento não relacionado, com tensão regulável. Estas situações, e outras da mesma natureza, não justificam o arranque das máquinas rotativas e como tal deseja-se manter a alternativa do autotransformador.

Há também o desejo de manter ao dispor a saída em corrente contínua do laboratório, a fim de ensaiar pontualmente máquinas deste tipo ou simplesmente como fonte DC para alguma aplicação que seja necessária.

4.2.2 Medição das grandezas

Tal como descrito, é essencial o sistema ter aptidão para medir adequadamente e com precisão as grandezas elétricas no decorrer dos ensaios. Pretende-se também que os aparelhos estejam incorporados na própria bancada, evitando a necessidade de recorrer aos “aparelhos de mão” para fazer as medições recorrentes, ficando estes reservados para o despiste de alguma situação pontual ou avaliar outros parâmetro não considerado.

As grandezas a medir são: tensão, frequência, corrente, potência e fator de potência.

Para além das máquinas a ensaiar, é também solicitado que se possa observar as grandezas das máquinas auxiliares quando estão a ser utilizadas, nomeadamente as tensões e correntes, de forma a detetar alguma anomalia que possa surgir com estes equipamentos. Estas medições não tem um carácter tão rigoroso como as a ensaiar.

4.2.3 Layout

No que toca aos requisitos do local destinado ao laboratório pretende-se que seja composto por duas zonas: uma fechada, onde está a banca de comandos e onde o técnico responsável vigia o decorrer do ensaios; e outra, “aberta” mas delimitada e cercada, onde estarão as máquinas a serem ensaiadas.

Deve permitir a fácil movimentação das máquinas, com auxílio das pontes rolantes já existentes na oficina ou através de bancadas de trabalho com rodas.

O local implementado deve permitir a realização dos ensaios promovendo boas práticas de segurança das pessoas e bens, assim como ser equipado com sinalização, luminosa e sonora, de alerta durante a realização dos ensaios.

4.3 Projeto do novo laboratório

O projeto do novo laboratório tem como objetivo propor uma solução que satisfaça todas as necessidades da empresa na realização das suas atividades. Aproveitando quando possível as melhores capacidades dos equipamentos já existentes, fazendo modificações e melhorias ao seu funcionamento; colmatando as falhas dos aparelhos que foram perdendo a utilidade, através da substituição por aparelhagem nova e mais capaz; impulsionando um ritmo de trabalho fluído e respeitando as normas de segurança.

Ao longo desta secção serão apresentados oportunamente esquemas de ligação dos diversos elementos.

4.3.1 Alimentação

Atendendo ao averiguado durante a recolha dos requisitos operacionais e documentado na subsecção 4.2.1, optou-se por manter acessível as fontes já existentes, sem a remoção ou adição de nenhuma delas, sofrendo porém alguns ajustes documentados de seguida.

4.3.1.1 Alimentação ao laboratório

Decidiu-se manter a ligação à entrada do laboratório pelas duas fontes existentes: a rede elétrica e o grupo diesel. Ficando a rede a funcionar como fonte principal e o grupo diesel como a alternativa mais potente e que permite o funcionamento de modo isolado do resto da instalação.

Uma particularidade do grupo diesel, derivado da sua elevada potência, é não poder ser utilizado “diretamente” a energia elétrica por ele produzida, tendo que passar obrigatoriamente pelo conjunto de máquinas da BMG até à saída do laboratório. Principalmente devido aos equipamentos de proteção e calibre da aparelhagem utilizada no resto da instalação, que necessitariam de ser reformulados e cujo custo de aumento de calibre não compensaria o ganho de utilização.

Reforçando esta decisão vem o facto das máquinas mais potentes terem tensões nominais mais elevadas, levando ao uso destas máquinas de qualquer forma, não limitando os procedimentos que já seriam previstos nestas situações.

Umas das medidas de segurança relativa a este segmento da instalação é o facto de (continuar a) ser implementado encravamento mecânico entre as duas ligações, não sendo fisicamente possível alimentar o laboratório pelas duas fontes ao mesmo tempo. Tal seria, para além de desnecessário e redundante, destrutivo.

4.3.1.2 Autotransformador e Saída DC

Manteve-se a ligação “direta” à rede, passando pelo autotransformador motorizado, como forma simples de disponibilizar à saída do laboratório tensão regulável, até 400 V. Para casos mais corriqueiros ou que requerem pouco rigor e não se justifique o acionamento das máquinas auxiliares.

As escovas que regulam a tensão de saída do autotransformador serão acionadas por pequeno motor AC, alimentado pela rede. O aumento da tensão é efetuado ao fechar a ligação dos contactos do motor de forma a que ele gire do sentido que faz aumentar o numero de espiras do autotransformador. O abaixamento da tensão de saída reside no fecho da ligação dos contactos do motor, trocando 2 das fases em relação à situação anterior, fazendo com que este rode no sentido oposto, diminuindo o numero de espiras.

O autotransformador continua responsável pelo ajuste da tensão de entrada dos díodos de retificação para a saída DC do laboratório.

Ganhou porém uma nova função, uma vez que se pretende conduzir a saída DC dos retificadores para alimentar as excitatrizes dos geradores síncronos das combinações de máquinas previamente utilizadas nas bancadas de máquinas pequenas e máquinas grandes.

4.3.1.3 Máquinas pequenas (BMP)

Optou-se por continuar a utilizar o gerador síncrono trifásico da BMP, assim como o motor DC que o aciona.

Esta configuração permite ensaiar máquinas até aos 54 kVA, alimentando-as com uma onda de qualidade superior à disponibilizada pela rede, até aos 750 V. Aliado a possibilitar o ajuste de frequência até aos 100 Hz.

A maior alteração a este conjunto deve-se ao desmantelamento do sistema ao estilo *Wald-Leonard*, substituindo as 4 máquinas auxiliares, os 3 geradores DC e o motor AC, por um equipamento chamado *DC Drive*. Este aparelho é capaz de controlar o motor DC, fornecendo energia aos circuitos de campo e armadura de forma independente, permitindo ao operador regular a velocidade para qualquer valor pretendido, limitado pelas propriedades construtivas da máquina.

Um exemplo de *DC Drive* que pode ser utilizado é o modelo DCS550-S01-0135-05 da ABB apresentado na figura 4.14 abaixo: suporta até 135 A no circuito da armadura, correntes de campo compreendidas entre [1 ; 18] A, e é apto para máquinas até aos 63 kW [13], sendo assim o modelo que melhor se adequa ao motor DC em causa, cuja chapa de características consta na figura 4.3.



Figura 4.14: *DC Drive* - DCS550 da ABB

Quanto ao gerador síncrono trifásico, a excitatriz será alimentada pelos díodos retificadores, cuja tensão DC de saída é regulada pelo autotransformador à “entrada”.

4.3.1.4 Máquinas grandes (BMG)

O planeado é que este conjunto de máquinas permaneça praticamente inalterado, a única diferença sendo a substituição do controlo de tensão da excitatriz do gerador, previamente efetuado recorrendo a reóstatos incorporados na bancada de ensaios, passando a ser controlado pelo autotransformador e pelos díodos retificadores.

A conjugação atual destas máquinas permite, como já referido, fornecer tensões de alimentação até aos 1 500 V e suporta intensidades de corrente até 400 A, dando a oportunidade de ensaiar máquinas até 1 MVA, sendo alimentadas com uma qualidade de onda superior à encontrada na rede elétrica.

Faz também parte da configuração que permite a utilização do grupo diesel, tal como mencionado anteriormente, sendo assim essencial à instalação do laboratório.

NOTA: Dado que na IEME existe um arrancador suave (*Softstarter*) poder-se-á pensar futuramente na instalação deste equipamento como alternativa de arranque dos motores.

4.3.1.5 Esquema de alimentação

Reunidas as opções de alimentação, na figura 4.15 abaixo está apresentado a proposta de esquema de ligação para os elementos de alimentação do laboratório e das máquinas a ensaiar, já com os respetivos dispositivos de comando e proteção, que serão abordados com mais detalhe noutra secção.

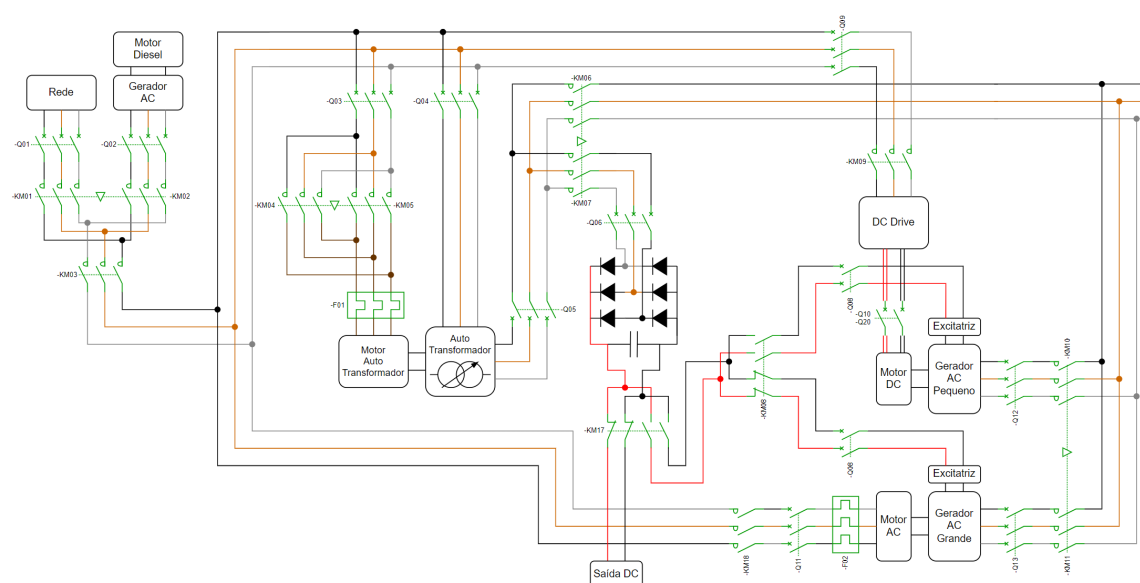


Figura 4.15: Esquema de alimentação do laboratório.

4.3.2 Medição das grandezas

A habilidade de aferir as grandezas elétricas, de forma consistente, precisa e segura, no decorrer dos ensaios, é imprescindível para avaliar o funcionamento das máquinas elétricas.

Indo de encontro a esta necessidade, considerou-se imprescindível incorporar aparelhos de medida das grandezas elétricas, nomeadamente transformadores de tensão e transformadores de intensidade, os frequentemente apelidados de TT's e TI's, respetivamente. Estes dispositivos, instalados junto dos cabos de alimentação das máquinas, permitem, quando associados a outros aparelhos próprios, apresentar informações sobre diferenças de potencial e intensidades de corrente.

Propõe-se a ligação dos transformadores de medida a um analisador de potência, que recebe as leituras pelas suas entradas de tensão e corrente e as apresenta numericamente. Estes aparelhos são inclusivamente capazes de calcular: frequência, ângulo de fase, potência ativa e reativa, fator de potência, harmónicos, entre outros.

A junção dos TT's, TI's e do analisador de potencia será capaz de fornecer toda a informação necessária acerca dos parâmetros da máquina a ser ensaiada.

A escolha da aparelhagem a incorporar deve ir de acordo com os requisitos estipulados para o sistema e ser garantida a interligação de todos os componentes, certificando que estão aptos para funcionarem entre si e que são respeitados os calibres dos equipamentos.

Durante esta secção estão apresentadas sugestões dos equipamentos a utilizar, assim como a fundamentação de terem sido escolhidos tais aparelhos ou com características e propriedades equiparáveis.

4.3.2.1 Analisador de potência

O analisador de potência foi o primeiro aparelho escolhido, optando-se pelo modelo WT333E da Yokogawa (figura 4.16), sendo uma marca de renome internacional na área de aparelhos de medida. Este modelo satisfaz todas as necessidades operacionais, e possui entradas diretas de tensão e corrente às quais podem ser ligados os transformadores de medida. Uma versão muito simplificada e resumida das principais características do WT333E está apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características do analisador de potência WT333E [14].

Grandeza ou Parâmetro	Gama de operação ou Valor
Tensão de entrada	0 - 600 V
Corrente de entrada	0 - 20 A
Precisão à frequência entre $45 \text{ Hz} \leq f \leq 66 \text{ Hz}$	$\pm (0,1 \% \text{ da medida} + 0,05 \% \text{ da gama})$



Figura 4.16: Analisador de potência - Yokogawa WT333E.

Este aparelho possui 3 canais de entrada de tensão e 3 de corrente, sendo recomendado para análise de circuitos trifásicos como é o caso do laboratório. De notar também as opções de conectividade que oferece, desde a aquisição de dados pelo protocolo Modbus/TCP, às interfaces USB, GP-IB e Ethernet, podendo se desejado ser conectado a um PLC (Programmable Logic Controller) [14]. A importância desta particularidade será desenvolvida noutra secção.

Fará parte da bancada de ensaios, juntamente com os aparelhos de comutação das diferentes configurações de alimentação.

4.3.2.2 Transformadores de tensão - TT's

Os transformadores de tensão devem ser de calibre suficiente para aguentar as tensões disponibilizadas pelas fontes de alimentação à disposição do laboratório, onde, com a configuração projetada, a tensão de saída mais elevada poderá chegar aos 1 500 V.

Observando as características de entrada do analisador de potência verifica-se que suporta tensões até 600 V, assim sendo pode-se adotar a configuração de: fazer a leitura direta da tensão para valores inferiores a 600 V, e utilizar TT's para fazer as leituras de tensões acima dos 600 V.

Fez-se um estudo de forma a analisar a diferença na incerteza das medições, comparando o uso de 1 ou 2 transformadores de medida de tensão por fase, para a medição dos valores acima dos 600 V. Apresentando a incerteza associada a diversos valores crescentes de tensão.

No primeiro caso considerou-se a utilização de apenas 1 TT por fase, com tensão nominal e razão de transformação 1 500 : 500 V (3:1). No segundo caso assumiu-se o uso de 2 TT's por fase, o mesmo utilizado no caso 1 e ainda um outro de razão 900 : 600 V (3:2). Adotaram-se as informações acerca da precisão do analisador de potência da tabela 4.1 e o valor de 0,5 % para a incerteza de transformação (Inc.Trf.) dos transformadores, sendo um valor típico deste tipo de equipamentos. Os resultados estão contemplados nas tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2: Caso de estudo 1 - 1 TT por fase.

Tensão (V)	50	200	590	610	750	890	910	1200	1500
Raz. Trf.	1	1	1	3	3	3	3	3	3
Inc. Trf.	0%	0%	0%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔV	0,35	0,50	0,89	4,56	5,40	6,24	6,36	8,10	9,90
%	0,70%	0,25%	0,15%	0,75%	0,72%	0,70%	0,70%	0,68%	0,66%

Tabela 4.3: Caso de estudo 2 - 2 TT's por fase.

Tensão (V)	50	200	590	610	750	890	910	1200	1500
Raz. Trf.	1	1	1	1,5	1,5	1,5	3	3	3
Inc. Trf.	0%	0%	0%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔV	0,35	0,50	0,89	4,11	4,95	5,79	6,36	8,10	9,90
%	0,70%	0,25%	0,15%	0,67%	0,66%	0,65%	0,70%	0,68%	0,66%

Verificou-se que, apesar do uso de 2 TT's ter conduzido, como seria de esperar, a resultados mais precisos, o défice de precisão com a utilização de apenas 1 TT na gama [600 ; 900] V é inferior a 0,08 %. Optando-se assim por implementar apenas 1 TT por fase, com tensões estipuladas de 1 500 : 500 V.

Os transformadores de tensão serão instalados entre cada fase da alimentação e o condutor neutro, para que haja uma melhor comparação entre fases, e também dado o facto de ser deste modo que estão instalados os TT's presentes no laboratório atual e como costumam ser configurados em instalações deste tipo. De qualquer forma, o analisador de potência tem a capacidade de cálculo das tensões compostas.

Uma vez que apenas serão usados para medir tensões simples, e não compostas, não haveria necessidade de terem tensões nominais de 1 500 V, já que $1\,500/\sqrt{3} = 866$ V seria o suficiente, porém, na eventualidade de se desejar trocar a configuração dos TT's para que passem a medir tensões entre fases não há necessidade de trocar os equipamentos.

De modo a otimizar a precisão das medidas e as capacidades do aparelho analisador de potência, serão criados circuitos paralelos: uns com os TT's e outros com ligações diretas, que serão comutados consoante o valor de tensão a medir.

Um esboço da ligação está apresentada na figura 4.17 abaixo.

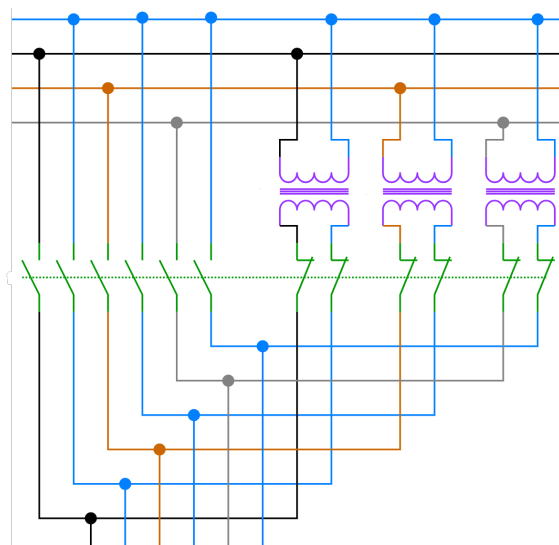


Figura 4.17: Esquema de ligação dos circuitos dos TT's.

4.3.2.3 Transformadores de intensidade - TI's

Os transformadores de intensidade devem também ser de calibre adequado para aguentar as intensidades de corrente que circulam nos cabos de alimentação disponibilizados pelo laboratório, onde, com a configuração projetada, a corrente mais elevada poderá chegar aos 400 A.

Este é porém um valor de intensidade de corrente bastante elevado, pelo que será um fenómeno relativamente raro realizar testes com estas intensidades, de qualquer forma, desenhou-se o sistema para ser capaz de aguentar as capacidades máximas das máquinas envolvidas.

O funcionamento dos TI's utilizados para a medição das correntes, tem por base o mesmo princípio de transformação, tirando proveito do aspeto construtivo do aparelho. O “primário” do transformador é na verdade o próprio condutor onde se pretende medir a intensidade de corrente; já o “secundário” é composto por um número variável de espiras, consoante a razão de transformação pretendida, e rodeia o condutor. Na figura 4.18 pode-se observar um dos TI's escolhidos para a aplicação, os restantes do mercado são de construção semelhante.



Figura 4.18: TI - Elmark MES-86/60 400/5 0.5 [15].

Os terminais secundários dos TI's tem valores estipulados, sendo, no mercado europeu de 5 A e, no mercado norte americano de 1 A. No que diz respeito à classe de precisão, segundo as normas internacionais, os transformadores de intensidade usados para a “medição e contagem” devem ser classe 0,5 (ou inferior) o que significa que o erro da medida é inferior a $\pm 0,5\%$ [16]. Assim sendo, os TI's escolhidos devem obedecer a este requisito.

Os terminais dos TI's são ligados ao analisador de potência que, observando novamente a tabela 4.1, suporta correntes de entrada até 20 A, sendo compatível com os 5 A dos TI's.

Mais uma vez fez-se um estudo a fim de avaliar quais os calibres dos transformadores de intensidade e escolher para a aplicação no laboratório, cujas conclusões estão apresentadas de seguida.

Primeiramente fez-se um estudo de mercado e verificou-se que estão disponíveis os seguintes calibres (correntes de entrada) de TI's: 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, todos com correntes de saída até 5 A, tal como referido anteriormente. (Há TI's com calibres superiores a 400 A, mas a sua consideração não é relevante para esta aplicação).

Compararam-se diversas configurações com diferentes números de TI's e diferentes calibres, apresentados de seguida, assumindo a incerteza do transformador igual a 0,5 % tal como indica a norma. O caso 0 (tabela 4.4) contempla uma situação hipotética representando o melhor cenário, onde seriam usados todos os calibres.

O caso 1 (tabela 4.5) representa a simulação de ter apenas 2 TI's por fase, representando os 2 extremos da gama de valores, um de 25 A e outro de 400 A.

O caso 2 (tabela 4.6) simboliza o uso de 3 TI's por fase, os extremos e um com um valor abaixo do valor intermédio, neste caso de 75 A.

O caso 3 (tabela 4.7) é semelhante ao caso 2, sendo o TI intermédio para este caso de 100 A.

O caso 4 (tabela 4.8) é semelhante aos casos anteriores, sendo o TI intermédio de 150 A.

Tabela 4.4: Caso de estudo 0 - Todos os TI's por fase.

Medida (A)	0,5	3	10	24	26	45	70	95	105	140	220	300	400
Raz. Trf.	5	5	5	5	8	10	15	20	30	30	50	60	80
Inc. Trf.	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔA	0,05	0,07	0,11	0,19	0,24	0,37	0,57	0,77	0,93	1,14	1,82	2,40	3,20
%	10,60%	2,27%	1,10%	0,81%	0,91%	0,82%	0,81%	0,81%	0,89%	0,81%	0,83%	0,80%	0,80%

Tabela 4.5: Caso de estudo 1 - 2 TI's por fase (25 e 400 A).

Medida (A)	0,5	3	10	24	26	45	70	95	105	140	220	300	400
Raz. Trf.	5	5	5	5	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Inc. Trf.	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔA	0,05	0,07	0,11	0,19	0,96	1,07	1,22	1,37	1,43	1,64	2,12	2,60	3,20
%	10,60%	2,27%	1,10%	0,81%	3,68%	2,38%	1,74%	1,44%	1,36%	1,17%	0,96%	0,87%	0,80%

Tabela 4.6: Caso de estudo 2 - 3 TI's por fase (25, 75 e 400 A).

Medida (A)	0,5	3	10	24	26	45	70	95	105	140	220	300	400
Raz. Trf.	5	5	5	5	15	15	15	80	80	80	80	80	80
Inc. Trf.	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔA	0,05	0,07	0,11	0,19	0,31	0,42	0,57	1,37	1,43	1,64	2,12	2,60	3,20
%	10,60%	2,27%	1,10%	0,81%	1,18%	0,93%	0,81%	1,44%	1,36%	1,17%	0,96%	0,87%	0,80%

Tabela 4.7: Caso de estudo 3 - 3 TI's por fase (25, 100 e 400 A).

Medida (A)	0,5	3	10	24	26	45	70	95	105	140	220	300	400
Raz. Trf.	5	5	5	5	20	20	20	20	80	80	80	80	80
Inc. Trf.	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔA	0,05	0,07	0,11	0,19	0,36	0,47	0,62	0,77	1,43	1,64	2,12	2,60	3,20
%	10,60%	2,27%	1,10%	0,81%	1,37%	1,04%	0,89%	0,81%	1,36%	1,17%	0,96%	0,87%	0,80%

Tabela 4.8: Caso de estudo 4 - 3 TI's por fase (25, 150 e 400 A).

Medida (A)	0,5	3	10	24	26	45	70	95	105	140	220	300	400
Raz. Trf.	5	5	5	5	30	30	30	30	30	30	80	80	80
Inc. Trf.	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
ΔA	0,05	0,07	0,11	0,19	0,46	0,57	0,72	0,87	0,93	1,14	2,12	2,60	3,20
%	10,60%	2,27%	1,10%	0,81%	1,75%	1,27%	1,03%	0,92%	0,89%	0,81%	0,96%	0,87%	0,80%

A partir do caso 0, observa-se que, para intensidades de corrente pequenas, inferiores a 1 A, o valor percentual da incerteza da medida ronda os 10 %, o que é elevado. Porém, não é costume ensaiar máquinas com correntes tão pequenas e, quando for o caso, pode-se recorrer a pinças amperimétricas, o procedimento atual de medição, já que, para estas escalas, apresentam valores satisfatórios. De realçar que mesmo com esta configuração desfavorável, o valor da incerteza de medida das correntes é inferior à diferença entre as fases registada durante o ensaio pela rede elétrica relatado previamente (de 20 %), onde se observou que o desequilíbrio de fases da rede.

Considera-se essencial a existência do transformador de intensidade de menor calibre, o de 25 A, tratando-se já de uma corrente considerável para grande parte dos motores pequenos. Deste modo, para a comparação dos casos estudados, apenas se terão em conta os valores de medidas acima dos 25 A.

O uso de apenas 2 TI's, como demonstra o caso 1, incute incertezas de medida superiores a 2 %, um valor que se arbitrou como sendo satisfatório para as medições que se pretende efetuar, e então excluída esta hipótese.

Recorrendo a 3 TI's já se obtém incertezas de medida inferiores aos 2 % desejados. Aquele que apresenta o menor valor, de maior incerteza medida, é o de 100 A, com 1,37 % para medições próximas dos 25 A. Tendo sido o escolhido para contemplar o grupo de transformadores de intensidade e implementar no laboratório.

Em suma, cada fase de saída do laboratório terá 3 TI's, um de calibre 25 A, outro de 100 A e ainda um de 400 A.

Com uma filosofia semelhante à adotada para os TT's, haverá circuitos distintos de ligação ao analisador de potência, originários dos diferentes TI's, tal como representado na figura 4.19 abaixo. A comutação de qual o calibre de TI a utilizar fará com que a leitura seja o mais precisa possível para as diferentes gamas de operação.

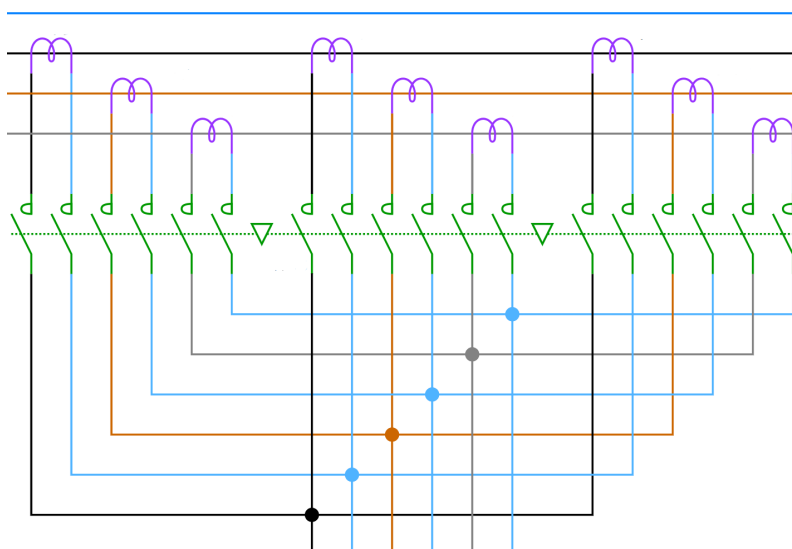


Figura 4.19: Esquema de ligação dos circuitos dos TI's.

4.3.2.4 Esquema de ligação dos transformadores de medida ao analisador de potência

A figura 4.20 representa o esquema de ligação dos transformadores de medida às entradas do analisador de potência, juntamente com os respectivos aparelhos de proteção e comutação.

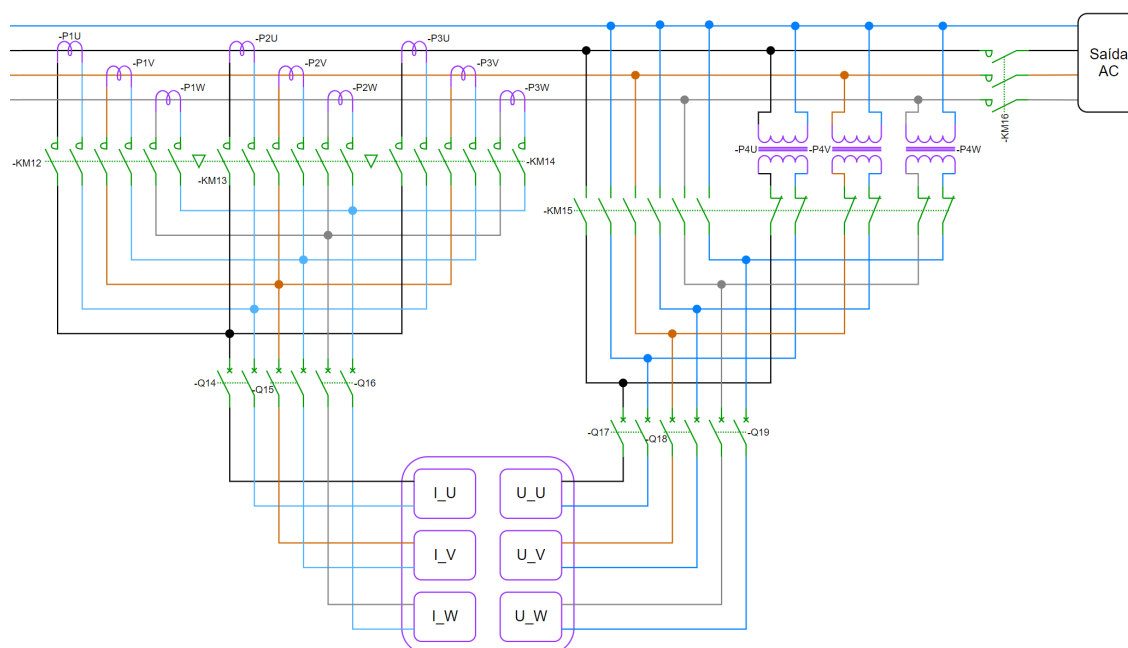


Figura 4.20: Esquema de ligação dos circuitos dos TT's e TI's.

4.3.2.5 Parâmetros das máquinas auxiliares

Considerou-se importante ter informação acerca dos parâmetros de operação das máquinas auxiliares utilizadas no laboratório, a fim de detetar possíveis anomalias e certificar que são mantidos os limites de segurança.

A instrumentação a utilizar não necessita de ser tão precisa, sofisticada ou abundante como a analisada anteriormente, sendo apenas relevante saber valores de tensão e corrente, dependendo do aparelho que se pretende monitorizar.

Autotransformador

Para o autotransformador, considera-se oportuno saber a medição da tensão aos terminais de saída. Como tal sugere-se incorporar um sensor de tensão e um mostrador, para dar indicação da tensão composta entre 2 das fases.

Prevê-se que esta medição seja suficiente, essencialmente para dar indicação se o equipamento está em tensão e, se sim, da ordem de grandeza com que se está a trabalhar. Sendo sempre possível obter uma leitura mais precisa da alimentação da máquina a ensaiar pelos dados do analisador de potência.

Excitatrizes dos geradores

É também importante saber os parâmetros de alimentação dos circuitos de excitação dos geradores dos dois conjuntos de máquinas, do BMP e BMG.

Neste caso, o valor da tensão e corrente DC, medido recorrendo também a sensores de tensão e corrente, instalados imediatamente antes do contactor de escolha da excitatriz, com os respetivos mostradores na bancada de comando do laboratório.

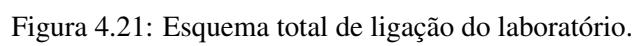
Espera-se também ter acessível a *DC Drive* e como tal ter à disposição aos parâmetros do motor DC por ele controlado.

4.3.3 Esquema final e Controlo do laboratório

Nesta secção será apresentado o esquema de ligação dos componentes do laboratório, assim como abordada a proposta de controlo de todas as máquinas e aparelhagem de comando a utilizar, de modo a que o laboratório funcione como desejável, satisfazendo as necessidades previamente vistas, implementado e interligando as soluções propostas na secção anterior. Serão também discutidos os dispositivos de segurança a incorporar.

4.3.3.1 Esquema final e seus componentes

O esquema de ligação de todo o laboratório encontra-se na figura 4.21 sendo a junção dos desenhos esquemáticos das figuras 4.15 e 4.20. A simbologia utilizada foi escolhida tendo por base a norma IEC 60617, que retrata os símbolos gráficos dos diagramas elétricos [17].



Fazendo a legenda dos esquemas que foram sendo apresentados:

→ Cada condutor destinado à circulação de corrente alternada aparece com uma cor distinta: **U - L1 - preto**, **V - L2 - laranja** e **W - L3 - cinzento**, os condutores a **castanho** alteram a fase consoante a configuração;

→ Os condutores DC aparecem com as cores **vermelho (positivo)** e **preto (negativo)**;

→ A **verde** estão representados os aparelhos de proteção (disjuntores e relés térmicos) e a aparelhagem de comutação (contactores e relés);

→ O condutor de neutro está representado com a cor **azul**, assim como um dos terminais de saída dos TT's;

→ A **roxo** estão ilustrados os transformadores de medida.

A simbologia utilizada encontra-se em anexo (Anexo B):

De acordo com a norma a IEC 60034-8, a nomenclatura utilizada para referenciar as fases do enrolamento primário das máquinas é U-V-W [9]. Já a 60073 indica que a nomenclatura para referenciar os cabos de alimentação é L1-L2-L3. Neste projeto, uma vez que se trata de um laboratório e os cabos de alimentação estarão ligados aos enrolamentos das máquinas, optou-se por referenciar os cabos de alimentação por U-V-W para facilitar a compreensão dos utilizadores, correspondendo: U-L1 , V-L2 , W-L3.

A ponte retificadora de corrente alternada para corrente contínua é composta por 6 díodos e 1 condensador, a função do condensador é filtrar a tensão de saída, diminuindo o *ripple* da corrente e fazendo com que a onda de saída tenha maior qualidade.

4.3.3.2 Aparelhos de proteção e comando

Há diversos aparelhos de proteção e comando incluídos nos esquemas. Esta aparelhagem tem a função de proteger a restante instalação de defeitos que possam ocorrer, principalmente contra sobreintensidades de corrente, mas também curto-circuitos e sobreaquecimento.

Disjuntores

Os disjuntores, com o símbolo correspondente da figura B.1, serão instalados para proteger os contactores, os circuitos das máquinas e o analisador de potência.

A proteção dos contactores é especialmente importante sendo estes os dispositivos principais responsáveis pela configuração dos diferentes modos de operação do laboratório.

Os circuitos das máquinas estão também protegidos por disjuntores, garantindo que não são ultrapassados os parâmetros estipulados de funcionamento das máquinas, podendo danificar os enrolamentos. A escolha destes aparelhos deve ser feita para um valor ligeiramente acima do estipulado, a fim de compensar situações normais que possam ocorrer onde a máquina opera a um valor superior ao nominal, durante breves períodos.

São protegidos os enrolamentos do estator dos motores AC, as excitatrizes dos geradores AC, os enrolamentos do primário do autotransformador e ainda a entrada da ponte retificadora. O *DC Drive* possui estas proteções, não sendo necessária nenhuma adicional ao motor DC.

As entradas do analisador são também protegidas por disjuntores.

Relés Térmicos

Os relés térmicos (figura B.3) servirão para proteger os dois motores AC contra sobreaquecimento ou sobrecargas. Tipicamente são constituídos por uma chapa bimetálica, sensível ao aquecimento causado pela passagem de corrente. São assim capazes de cortar a energia elétrica que alimenta o motor, de forma a evitar situações problemáticas graves ou danos, prolongando a vida útil da máquina.

Contactores e Contactos Normalmente Abertos e Fechados

Os contactores (figura B.2) são aparelhos que, ao comando de um sinal, fazem abrir ou fechar contactos, permitindo a configuração de diferentes modos de operação dos sistemas elétricos onde estão inseridos, permitindo ainda alguma automação.

Os contactos normalmente abertos (NA), figura B.4, e os contactos normalmente fechados (NF), figura B.5, são contactos (interruptores) que trocam o seu estado quando recebem um sinal, pertencendo por norma ao grupo de contactos auxiliares dos contactores acima referidos. Tal como o nome indica, tem um estado de repouso, onde normalmente residem quando não são ativados, transitando para o estado oposto quando são energizados.

Transformadores de medida

Os transformadores de tensão e de intensidade, retratados respetivamente nas secções 4.3.2.2 e 4.3.2.3, estão representados pelos símbolos das figuras B.6 e B.7.

4.3.3.3 Listagem dos equipamentos

Nas tabelas seguintes (4.9 a 4.15) encontram-se listados os equipamentos que farão parte do laboratório e da bancada de comando, juntamente com descrições de funcionalidade.

Tabela 4.9: Comutadores rotativos.

Sigla	Designação	Descrição
CR_ENT	Comutador Rotativo de Entrada	Escolha da entrada do laboratório, entre desligado, ligação pela rede ou pelo grupo diesel
CR_DPG	Comutador Rotativo de Direto, Pequenas ou Grandes	Escolha entre a ligação direta, através do alternador da BMP ou pelo gerador da BMG
CR_DCO	Comutador Rotativo da Saída DC (<i>Output</i>)	Liga e desliga a saída DC do laboratório - através da ponte retificadora
CR_LDS	Comutador Rotativo Liga e Desliga a Saída	Liga e desliga a saída AC do laboratório - Permitindo ajustar a tensão das máquinas auxiliares antes de ligar à que está a ser ensaiada

Os comutadores rotativos são dispositivos que permitem combinar várias opções de ligação num único aparelho, ideal para os dois primeiros casos apresentados acima onde se pretende poder escolher entre 3 estados. Optou-se por manter o uso de comutadores para o controlo das saídas, a fim de manter a uniformidade entre os aparelhos que controlam os mesmos aspetos da instalação.

Tabela 4.10: Botões de pressão.

Sigla	Designação	Descrição
S_VUP	Botão Subir a Tensão	Botão de pressão que dá o comando para subir a tensão
S_VDN	Botão Descer a Tensão	Botão de pressão para descer a tensão
S_SP#	Botão STOP n°#	Botão de paragem

Prevê-se a instalação de vários botões de paragem de emergência, **STOP**, no laboratório. Deve constar pelo menos 1 na bancada de comandos, na zona de ensaios também deve haver um botão deste estilo facilmente acessível. Os botões de paragem de emergência devem ser do tipo de botão que requer duas ações diferentes, uma para acionar e outra diferente para desencravar. Tipicamente estes botões são “de pressão” para acionar, e o desencravamento é feito com “rotação”, permitindo assim que a sua utilização não levante dúvidas acerca do estado.

Tabela 4.11: Sensores.

Sigla	Designação	Descrição
SE_PEM	Sensor do Portão da Entrada das Máquinas	Verifica se o portão por onde entram as máquinas se encontra fechado
SE_VLO	Sensor Tensão no Mínimo (V_{Low}) - autotransformador	Verifica se o autotransformador se encontra na posição que corresponde à tensão de saída mais baixa
SE_MAT	Sensor Máximo Autotransformador	Verifica se o autotransformador se encontra na posição máxima
SE_GDI	Sensor Grupo Diesel	Verifica que o grupo diesel arrancou como era suposto e está a funcionar corretamente
SE_MEP	Sensor Máximo da Excitatriz da BMP	Verifica se foi atingido o máximo de alguma grandezas da excitatriz do gerador da BMP
SE_MEG	Sensor Máximo da Excitatriz da BMG	Verifica se foi atingido o máximo da excitatriz do gerador da BMG

Os sensores utilizados fornecer informações acerca do estado do sistema, permitindo tomar as ações necessárias para o controlo eficaz do laboratório. Estes sensores estarão ligados a um PLC, retratado na secção 4.3.3.5, que está responsável por comandar a aparelhagem do laboratório.

Tabela 4.12: Contactores.

Sigla	Designação	Descrição
KM01	Contactador Rede	Abre e fecha a ligação de entrada pela rede no laboratório
KM02	Contactador Diesel	Abre e fecha a ligação de entrada pelo grupo diesel no laboratório
KM03	Contacto Entrada	Abre e fecha a ligação de entrada no laboratório, quer pela rede como pelo diesel
KM04	Contactador Motor Autotransformador Direção #1	Faz o motor do autotransformador rodar no sentido #1
KM05	Contactador Motor Autotransformador Direção #2	Faz o motor do autotransformador rodar no sentido #2, oposto ao #1
KM06	Contactador Direto Rede	Saída direta da rede, passando pelo autotransformador, sem recurso a mais nenhuma máquina auxiliar
KM07	Contactador Retificador	A saída do autotransformador vai para o retificador
KM08	Contactador Escolha Excitatrizes	Contactador com 2 contactos NF e 2 NA, que determinam qual das excitatrizes a ser utilizada
KM09	Contactador <i>DC Drive</i>	Contactador que fecha a ligação trifásica ao <i>DC Drive</i> que controla o motor DC
KM10	Contactador Máquinas Pequenas	Abre e fecha a ligação à saída do gerador AC da BMP
KM11	Contactador Máquinas Grandes	Abre e fecha a ligação à saída do gerador AC da BMG
KM12	Contactador TI's nº1	Abre e fecha a ligação à saída dos TI's de maior calibre
KM13	Contactador TI's nº2	Abre e fecha a ligação à saída dos TI's de calibre intermédio
KM14	Contactador TI's nº3	Abre e fecha a ligação à saída dos TI's de menor calibre
KM15	Contactador TT's	Contactador com 6 contactos NF e 6 NA, que determinam se a leitura de tensão para o analisador de potência é direta ou pelos TT's
KM16	Contactador de Saída do Laboratório	Ultimo dispositivo que abre e fecha a ligação para a zona de ensaios
KM17	Contactador Escolha Excitatrizes ou Saída DC	Contactador com 2 contactos NF e 2 NA, que determinam se a saída da ponte retificadora segue para a saída DC ou para as excitatrizes
KM18	Contactador Motor AC BMG	Contactador que fecha a ligação trifásica ao motor AC da BMG

Tal como referido anteriormente, os contactores serão os maiores responsáveis por configurar o laboratório com as entradas e saídas pretendidas, comutando as interligações entre os demais aparelhos e dispositivos de forma a que o sistema funcione de forma coerente e segura. As suas funções, descritas na tabela 4.12, passam por: abrir e fechar (efetivamente ligando e desligando) conexões, e escolher entre opções alternativas de utilização das máquinas auxiliares e aparelhagem de medida.

Tabela 4.13: Transformadores de medida - TI's e TT's.

Sigla	Designação	Descrição
P1U	Transformador de Intensidade #1, fase U	TI #1, de maior calibre (400 A), que está inserido na fase U
P1V	TI #1, V	TI #1, 400 A, fase V
P1W	TI #1, W	TI #1, 400 A, fase W
P2U	Transformador de Intensidade #2, fase U	TI #2, de calibre intermédio (100 A), que está inserido na fase U
P2V	TI #2, V	TI #2, 100 A, fase V
P2W	TI #2, W	TI #2, 100 A, fase W
P3U	Transformador de Intensidade #3, fase U	TI #3, de menor calibre (25 A), que está inserido na fase U
P3V	TI #3, V	TI #3, 25 A, fase V
P3W	TI #3, W	TI #3, 25 A, fase W
P4U	Transformador de Tensão da fase U	TT (1500:500 V), ligado na fase U
P4V	TT, V	TT (1500:500 V), fase V
P4W	TT, w	TT (1500:500 V), fase W

Os transformadores de medida da tabela 4.13 são os que já foram retratados em pormenor nas secções 4.3.2.2 e 4.3.2.3, e implementados nas 3 fases da alimentação de saída do laboratório.

Tabela 4.14: Relés Térmicos.

Sigla	Designação	Descrição
F01	Relé Térmico (3~) do Motor do Autotransformador	Protege o motor do autotransformador contra o sobrecargas e sobreintensidades
F02	Relé Térmico (3~) do Motor AC	Protege o motor AC acoplado ao Gerador AC Grandes

Os relés térmicos da tabela 4.14 vão assegurar que os motores não sejam danificados por sobrecargas ou sobreintensidades, derivadas de correntes de alimentação elevadas por longos períodos de tempo.

Tabela 4.15: Disjuntores.

Sigla	Designação	Descrição
Q01	Disjuntor (3~) Entrada da Rede	Disjuntor no início da instalação vinda da Rede
Q02	Disjuntor (3~) Entrada pelo Diesel	Disjuntor à saída do grupo diesel
Q03	Disjuntor (3~) Motor do Autotransformador	Protege o motor trifásico utilizado para regular a posição do autotransformador
Q04	Disjuntor (3~) Autotransformador Entrada	Protege o primário do autotransformador
Q05	Disjuntor (3~) Autotransformador Saída	Disjuntor à saída do autotransformador
Q06	Disjuntor (3~) do Retificador	Protege a ponte retificadora
Q07	Disjuntor (2~) da Excitatriz BMP	Protege a excitatriz do gerador AC da BMP
Q08	Disjuntor (2~) da Excitatriz BMG	Protege a excitatriz do gerador AC da BMG
Q09	Disjuntor (3~) do <i>DC Drive</i>	Protege o <i>DC Drive</i>
Q10/Q20	Disjuntores (2~) do Motor DC	Protegem o motor DC contra sobreintensidades (armadura e campo)
Q11	Disjuntor (3~) do Motor AC	Protege o motor contra sobreintensidades
Q12	Disjuntor (3~) à saída do Gerador Pequenas	Disjuntor à saída do gerador da BMP
Q13	Disjuntor (3~) à saída do Gerador Grandes	Disjuntor à saída do gerador da BMG
Q14	Disjuntor (2~) do Analisador de Potência (AP), lado TI's, fase U	Protege as entradas de Corrente do Analisador de Potência da fase U
Q15	Disjuntor (2~) do AP, TI's, V	Protege as entradas de Corrente do Analisador de Potência da fase V
Q16	Disjuntor (2~) do AP, TI's, W	Protege as entradas de Corrente do Analisador de Potência da fase W
Q17	Disjuntor (2~) do AP, lado TT's, U	Protege as entradas de Tensão do Analisador de Potência da fase U
Q18	Disjuntor (2~) do AP, TT's, V	Protege as entradas de Tensão do Analisador de Potência da fase V
Q19	Disjuntor (2~) do AP, TT's, W	Protege as entradas de Tensão do Analisador de Potência da fase W

Os disjuntores da tabela 4.15 representam o maior grupo de equipamentos, sendo encarregues por proteger os diversos aparelhos de sobreintensidades de corrente.

Uma nota referente aos disjuntores que protegem as entradas de tensão do analisador de potência (Q17, Q18 e Q19) que diferem dos demais. Estes devem ser limitadores de sobretensão, capazes de interromper a ligação na eventualidade da diferença de potencial, entre os dois terminais, exceder os 600 V, de modo a evitar danos no analisador de potência.

Nomenclaturas

As letras utilizadas nas siglas dos equipamentos acima referidos estão de acordo com a norma IEC 61082-1 [18], que retrata, entre outras matérias, as nomenclaturas, incluindo siglas, que devem ser utilizadas para referências os diferentes aparelhos e dispositivos, nos documentos “eletrotecnológicos”. A tabela 4.16 de seguida reúne as siglas que devem ser utilizadas para referir os equipamentos, que constam nos desenhos esquemáticos.

Tabela 4.16: Nomenclaturas e siglas normalizadas utilizadas nos esquemas [18].

Referência	Aparelhos
F	Dispositivos de proteção
K	Relés de automatismos e Contactores
P	Instrumentos de medida
Q	Disjuntores
S	Botões

4.3.3.4 Bancada de comando do laboratório

De seguida, na figura 4.22, está apresentada uma sugestão da disposição dos botões e comutadores presentes na banca de ensaios, e que serão usados para comandar o laboratório.

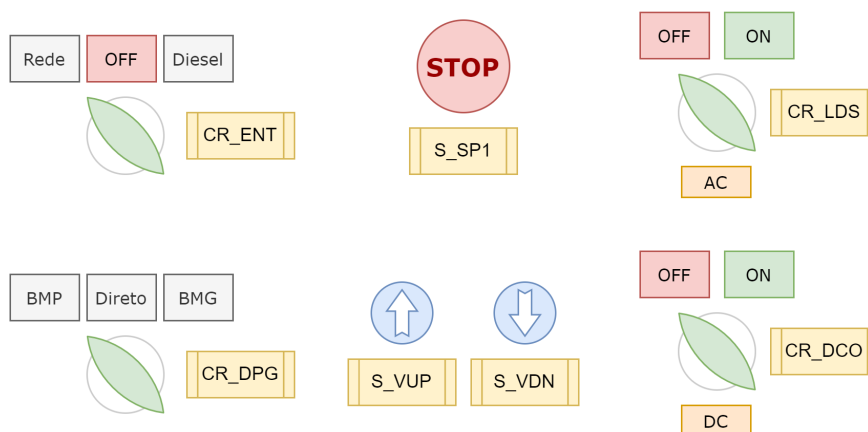


Figura 4.22: Sugestão da disposição da bancada do laboratório.

A proposta de disposição da bancada contém os aparelhos listados nas tabelas 4.9 e 4.10.

4.3.3.5 PLC - *Programmable Logic Controller*

A lógica de controlo do laboratório poderia ser desenvolvida recorrendo a 2 métodos:

→ Circuitos de lógica cablada, onde o “automatismo” e a programação do laboratório é pensada de antemão e implementada aquando da instalação, utilizando: relés, contactores e os respectivos contactos, bobinas de comando, botões de pressão, comutadores, temporizadores, ... É pouco flexível a alterações e atualizações e de difícil resolução de problemas que possam eventualmente surgir. É um método mais antigo mas de elevada robustez.

→ Circuitos comandados por um PLC, à base de contactores para abertura e fecho de circuitos e sensores que recolhem informações do sistema. A lógica do circuito é programada diretamente no aparelho, com linguagens de programação próprias, podendo ser alterada com relativa facilidade, promovendo também o fácil diagnóstico e resolução de problemas. Tal abordagem resulta em circuitos mais simples de implementar.

Optou-se pelo uso de um PLC, devido à maior simplicidade da implementação dos circuitos; à facilidade de modificação da programação de todo o sistema, na eventualidade de troca de componentes ou desejo de atualização das funcionalidades do laboratório, sem haver necessidade de refazer toda a instalação; à visão na automatização, podendo inclusive tomar partido das opções de conectividade do analisador de potência.

Um PLC é uma espécie de computador industrial, que suporta inúmeras entradas e saídas, que é tipicamente usado para a monitorização e para o controlo de equipamentos industriais ou instalações elétricas, seguindo uma programação desejada [19].

A construção modular dos PLC permite a adição de entradas e saídas específicas, adaptando-se às utilizações desejadas, aliada à rapidez de operação e relativa facilidade de programação. Há 5 linguagens de programação de PLC normalizadas, cada uma com as suas aplicações específicas e respetivas vantagens e desvantagens, podendo ser intercaladas para melhor realizar as funções pretendidas.

Pode-se dividir a operação de um PLC em 3 etapas cíclicas; recolha de informação nas entradas, execução do programa e atuação das saídas.

As entradas do PLC podem ser originárias de 2 fontes: oriunda de sensores, como os implementados nas máquinas ou que reportam grandezas; ou por intervenção humana, como botões de pressão e interruptores ou sistemas SCADA.

4.3.3.6 Lógica de controlo

Apesar de não ter sido feita a programação do PLC com a lógica do controlo do laboratório, reuniu-se: uma tabela (4.17) onde se apresentam quais os contactores que abrem e fecham, tendo em conta o comando do utilizador dos dispositivos da bancada; considerações acerca da comutação dos contactores em função dos dados dos sensores; uma proposta que permite tirar o maior proveito da instrumentação de medida; fluxogramas (figuras 4.23 e 4.24) como complemento da lógica pensada.

Tabela 4.17: Lógica de comando dos contactores - reação aos comutadores rotativos.

Comutador ou Botão	Estado	Contactores	
		Fechados	Abertos
CR_ENT	OFF	-	KM01, KM02, KM03
	Rede	KM01, KM03	KM02
	Diesel	KM02, KM03	KM01
CR_DPG	Direto	KM06	KM07, KM09, KM10, KM11, KM18
	BMP	KM07, KM09, KM10	KM06, KM11, KM18, KM08(Ativado)
	BMG	KM07, KM11, KM18, KM08(Desativado)	KM06, KM09, KM10
CR_DCO	ON	KM07, KM17(Desativado)	KM06, KM09, KM10, KM11, KM18
	OFF	-	KM17(Ativado)
CR_LDS	ON	KM16	-
	OFF	-	KM16
S_VUP	Pressionado	KM04	KM05
S_VDN	Pressionado	KM05	KM04
S_SP1	Pressionado	-	KM16

NOTA: Convencionou-se assim que o “sentido de rotação #1” do motor do autotransformador é o que o faz com que a tensão aumente, sendo então o “sentido #2” o que faz descer a tensão.

Considerações a ter na operação do laboratório

Há ainda vários aspetos a ter em consideração, relacionados com os sensores da tabela 4.11 e também com os transformadores de medida:

→ O contactor que fecha a ligação da alimentação pelo grupo diesel ao laboratório (KM02), não deve fechar sem antes ter a confirmação que o grupo diesel arrancou e está em funcionamento como esperado, através do sensor SE_GDI.

→ Se o sensor que deteta o estado do portão da entrada das máquinas (SE_PEM) indicar que o portão está aberto, então o contactor que liga a desliga a saída do laboratório (KM16) não pode fechar. Na eventualidade de, no decorrer do ensaio, o sensor detetar que o portão abriu, então o contactor deve abrir de imediato, cortando a alimentação da saída do laboratório.

→ Aquando da primeira vez, após cada arranque do laboratório, que é fechado um dos contactores à saída do autotransformador (KM06 e KM07), deve ser verificado que este se encontra na sua posição mínima, a que corresponde a tensão mais baixa, com recurso ao sensor SE_VLO.

→ O contactor que permite ao motor do autotransformador rodar no sentido (#1) de subir a tensão (KM04), deve abrir de imediato (ou permanecer aberto) caso: o sensor SE_MAT detetar que o autotransformador já se encontra no máximo; o sensor SE_MEP ou o SE_MEG detetar que foi atingido o limite máximo da respetiva excitatriz dos geradores auxiliares.

→ O contactor KM05, responsável por comandar que o motor do autotransformador rode no sentido (#2) de descer a tensão, deve abrir (ou permanecer aberto), caso tenha sido atingido o mínimo do autotransformador (sensor SE_VLO).

Aparelhos de medida

A comutação dos contactores (KM12 a KM15), responsáveis pela ligação entre os aparelhos de medida e o analisador de potência, deve ocorrer de forma a que seja sempre utilizado o equipamento com o calibre mais apropriado para a medição das grandezas. Para que tal seja possível, o PLC deve receber continuamente informação sobre a tensão e corrente da alimentação de saída, mesmo que de uma forma “grosseira”, a fim de decidir quais os contactores a abrir e quais a fechar, seleccionando os aparelhos a utilizar.

Quando uma das grandezas a medir se aproximar do limite máximo para um dado aparelho de medida, é efetuada automaticamente a troca para o aparelho de calibre seguinte. Com o mesmo raciocínio, quando o valor medido for inferior ao limite máximo do aparelho de calibre inferior ao atualmente usado, efetua-se a troca para esse mesmo aparelho. Deste modo, assegura-se que a leitura das grandezas é feita da forma mais precisa possível, tendo em conta a instrumentação de medida adotada.

Uma sugestão para o *input* das grandezas no PLC, é a utilização de cartas de entrada próprias, que estariam permanentemente ligadas aos terminais de saída dos transformadores de medida de calibre mais elevado.

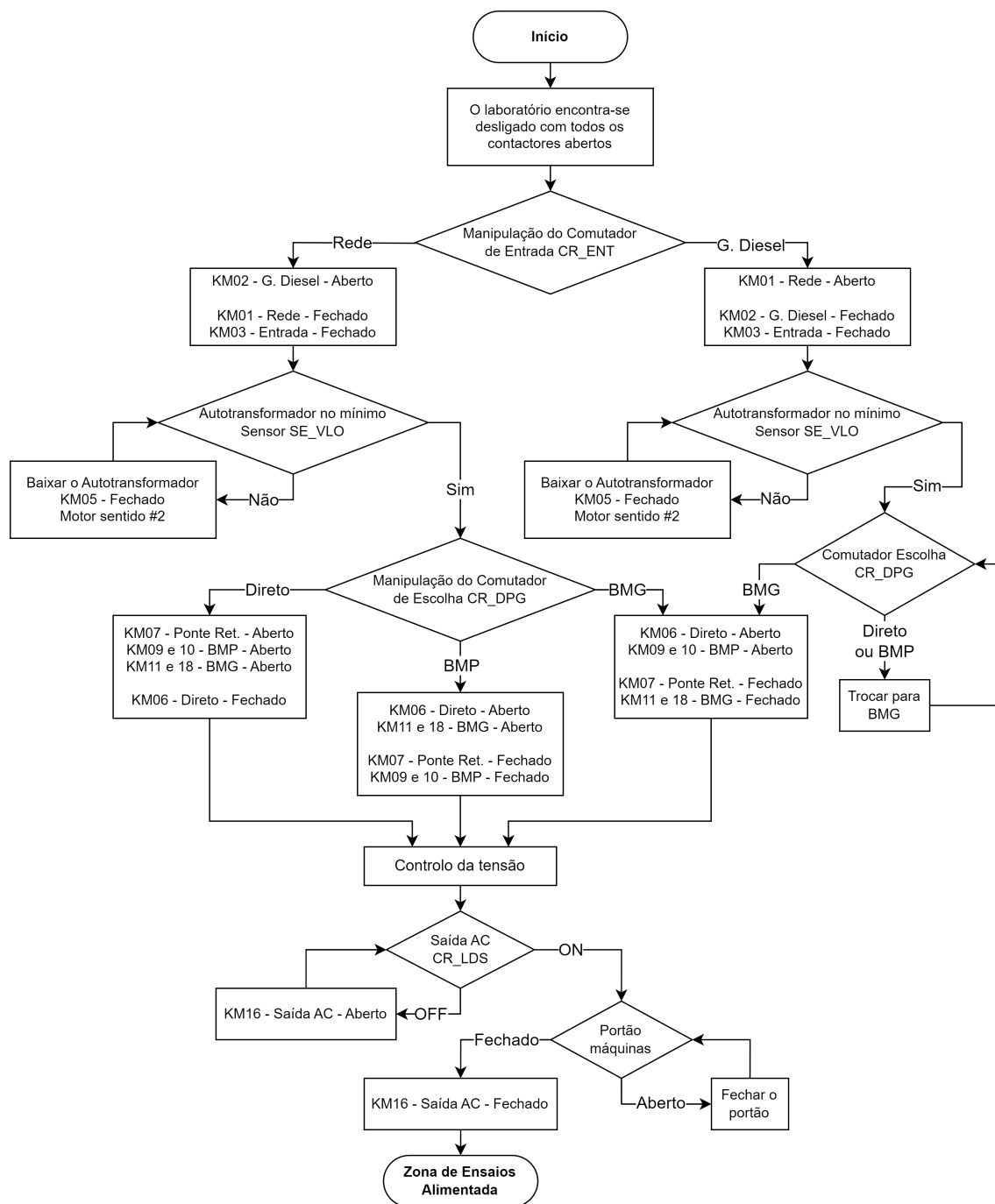


Figura 4.23: Fluxograma de funcionamento do laboratório.

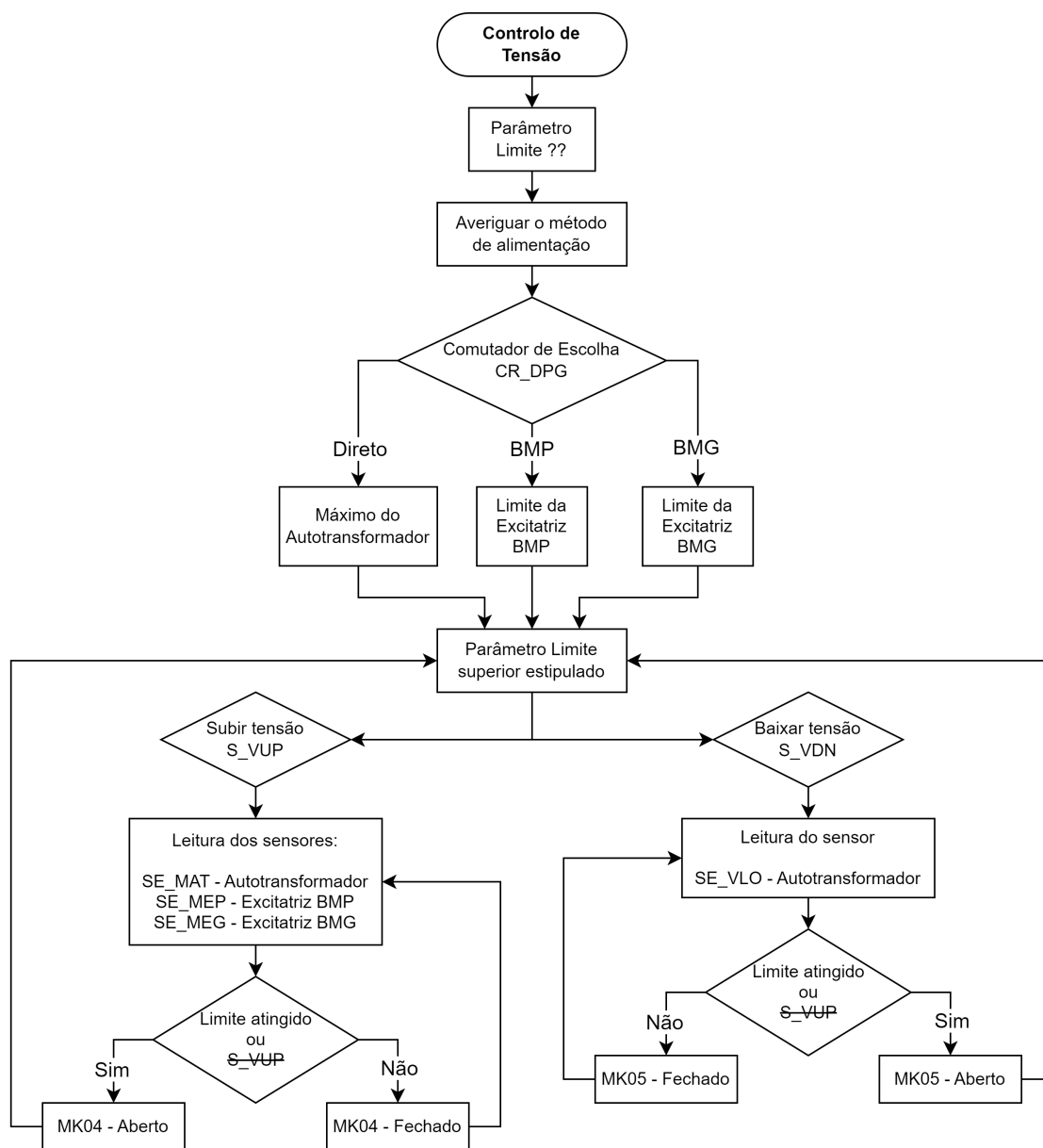


Figura 4.24: Fluxograma do controlo da tensão.

4.3.4 Novo layout, Segurança e Boas práticas

De seguida serão apresentadas considerações relativas ao novo *layout* do laboratório; assim como aspetos relacionados com a segurança, maioritariamente das pessoas, mas também dos bens materiais; são ainda feitas recomendações de boas práticas que devem ser seguidas na realização dos ensaios e típicas de quando se trabalha neste tipo de ambiente.

4.3.4.1 Layout

Projeta-se que o novo laboratório estará no mesmo local que o atual, porém com uma disposição diferente, estando representada na figura 4.25.

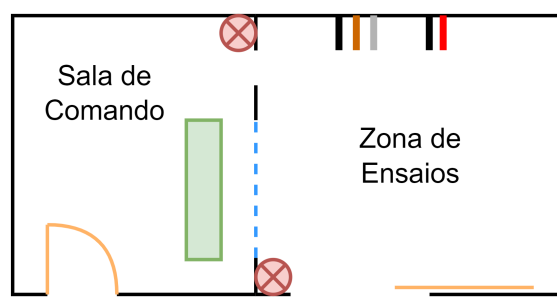


Figura 4.25: Novo *layout* do laboratório.

Observa-se a clara distinção entre as duas zonas: a da esquerda destinada ao comando do laboratório e visualização das grandezas medidas; a da direita, destinada às máquinas a ensaiar.

Sala de comando

A entrada da sala de comando é efetuada através de uma porta (a **laranja**), que deve conter sinalética de informação, relativa ao facto de: se estar a entrar numa zona onde há o risco de eletrocussão; ser apenas indicada para pessoal especializado e autorizado; poderem estar a decorrer ensaios a máquinas elétricas.

Representada pelo **retângulo verde** está a banca do laboratório, contendo a aparelhagem de comando, o analisador de potência e todos os mostradores com as grandezas das máquinas auxiliares. Diante da bancada está uma janela (**tracejado azul**) que permite a visão para a zona de ensaios, possibilitando observar a máquina durante o ensaio.

A passagem para a zona de ensaios deve ser sinalizada por uma luz (identificada pelo **círculo com a cruz vermelha**) que indica quando estão a decorrer ensaios e alertar o facto de se estar a entrar numa zona em tensão.

Zona de ensaios Este é o local onde devem ser realizados todos os ensaios em tensão, e os elementos usados na delimitação da zona, habitualmente metálicos, devem estar ligados à terra.

A entrada das máquinas para a zona de ensaios é feita através do portão deslizante (simbolizada pelas **linhas laranja paralelas**), que deve também estar ligado à terra, e que permite a fácil movimentação das máquinas recorrendo às pontes rolantes já instaladas na oficina.

O portão de entrada das máquinas deve ser mantido fechado durante o decorrer dos ensaios, e ser dotado de um sensor de fim de curso que se certifica do seu estado. A alimentação das saídas do laboratório não deve ocorrer caso o portão esteja aberto, e deve também ser cortada de imediato na eventualidade da abertura do portão no decorrer de um ensaio.

No decorrer dos ensaios, deve ser impedida a movimentação das pontes rolantes sobre na zona de ensaios, a fim de evitar o contacto accidental com peças em movimento ou em tensão.

Na zona de ensaios deve existir a sinalização luminosa e também sonora de alerta: aquando do início do procedimento de ensaios (ligação do laboratório à rede ou ao grupo diesel) deve soar um aviso para dar a conhecer aos restantes trabalhadores da fábrica que devem tomar as devidas precauções, precavendo-se dos perigos implicados; durante o decorrer dos ensaios, deve estar ligado um pirilampo luminoso, de modo a sinalizar visualmente que está a decorrer um ensaio e que há perigos associados àquela zona.

Esta zona deve ser mantida limpa e arrumada, nomeadamente os cabos de alimentação das máquinas a ensaiar, que quando não estão a ser utilizados, devem estar em suportes adequados para evitar danos mecânicos. Os aparelhos manuais auxiliares do laboratório devem ser arrumados nos locais previamente definidos, quando não estejam em utilização.

Na zona de ensaios deve existir um botão de paragem de emergência, facilmente acessível a quem estiver em redor da máquina a ser ensaiada, dotado com a capacidade do corte da alimentação ao laboratório.

Este espaço deve ter dimensões suficientes para que possa ser mantida uma distância de segurança, entre a máquina a ensaiar e os limites da zona de ensaios. Na eventualidade de, devido às dimensões da máquina tal não for possível, deverão ser tomadas as medidas necessárias para limitar a zona de ensaio por barreiras e sinalização, garantido as condições de segurança.

4.3.4.2 Medidas de Segurança e Boas práticas

Há vários procedimentos e atitudes que devem ser tomadas nas zonas do laboratório e durante os ensaios, a fim de promover a segurança de todos e facilitar o ritmo fluído de trabalho.

De seguida estão apresentadas algumas recomendações para o local dos ensaios assim como para os intervenientes, retiradas de manuais de recomendações [20] e normas internacionais [21]:

- As pessoas conduzem os ensaios devem usar equipamento de proteção individual, como luvas, óculos de segurança, calçado de trabalho e protetores de ruído;
- Os locais de comando do laboratório e ensaio das máquinas deve ser bem iluminado;
- Na zona de ensaios devem estar ao dispor extintores e kits de primeiros socorros devidamente identificados, sendo do conhecimentos de todos como os utilizar devidamente;
- Não deve estar no local nenhuma máquina para além daquela que está a ser ensaiada;
- O piso da zona de ensaios, onde assentam as máquinas, deve ser de metal, ligado à terra, e dispor de mecanismos que facilitem a fixação das máquinas.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho futuro

5.1 Considerações finais

Durante a elaboração deste trabalho de dissertação, com o tema projeto e desenvolvimento de um laboratório de máquinas elétricas, houve a oportunidade para debruçar sobre os principais aspetos relacionados com este espaço. Neste documento estão abordados: os requisitos operacionais que se esperam obter deste espaço; a alimentação das máquinas, tanto as que constituem o laboratório como as que são ensaiadas; a instrumentação utilizada para medir as grandezas envolvidas e a apresentação das medições; o controlo do laboratório, incluindo a aparelhagem de comando utilizada, assim como representações gráficas do funcionamento; os parâmetros de segurança dos quais deve ser dotado o laboratório de ensaios, assim como boas práticas de execução das tarefas.

Um laboratório de máquinas elétricas é um local essencial para a realização de ensaios que avaliam o estado operacional da máquina, indispensável àqueles que pretendem desenvolver atividades relacionadas com máquinas elétricas, envolvendo o seu fabrico, ações de manutenção e reparação. Considera-se que o trabalho desenvolvido e relatado no presente documento, cobre de forma fértil as considerações necessárias para o estudo, desenvolvimento e projeto de um espaço deste calibre.

O trabalho foi desenvolvido em ambiente empresarial, na IEME, tendo sido tirado o maior proveito deste facto. Durante o período de desenvolvimento houve oportunidade para: ter um primeiro impacto com o mundo empresarial; acompanhar de perto a realização de ensaios a máquinas elétricas rotativas, incluindo a participação pontual nos mesmos; ficar a conhecer alguns dos procedimentos da indústria, solidificando as aprendizagens adquiridas durante este ciclo de estudos, com exemplos práticos das atividades onde se exerce engenharia no dia a dia; alargar competências e promover o espírito crítico. Realçar para tal a importância de todos aqueles que acompanharam e contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Para além do projeto do laboratório, a grande mais valia deste trabalho residiu no enriquecimento das competências académicas, profissionais e pessoais de quem o levou a cabo.

5.2 Trabalho futuro

Como qualquer projeto desenvolvido num período finito de tempo, há temas que ficam por aprofundar, pormenores por abordar e assuntos por retratar, este trabalho não fica indiferente a esta regra. Um dos aspetos que se gostaria de ter tido a oportunidade de explorar, e que fica como uma das sugestões para trabalho futuro, é a programação do PLC, de modo a completar o projeto do laboratório e por se revelar útil na área da energia elétrica, da monitorização e automação dos sistemas.

Explorando de forma ainda mais aprofundada a programação do PLC e tirando partido das funcionalidades do analisador de potência, uma das tarefas futuras seria explorar a oportunidade de automatização da criação de relatórios finais de cada ensaio, já que atualmente os resultados dos ensaios são anotados em papel e redigidos posteriormente a computador.

Idealmente os relatórios seriam gerados de forma automática, uma vez recolhidos os resultados pelo analisador de potência, sendo posteriormente integrados com os sistemas informáticos da empresa que possam vir a ser desenvolvidos.

Ainda como trabalho futuro gostava-se, acima de tudo, de ver implementado o laboratório que foi projetado, onde fosse possível debruçar sobre a análise de mercado e escolha da aparelhagem e equipamentos a incorporar, assim como a montagem dos equipamentos e comissionamento da instalação, dos seus componentes e funcionalidades.

Referências

- [1] IEC. *Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary*, abril 2007. Disponível em <https://www.electropedia.org/>, acessado a última vez em 25 de junho de 2023.
- [2] Stephan J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw Hill, 4 edition, 2005.
- [3] Amrie Muchta. *7 Parts of Simple Electric Motor And Function*. Disponível em <https://www.autoexpose.org/2017/05/parts-of-simple-electric-motor.html>, acessado a última vez em 27 de março de 2023.
- [4] Stephan J. Chapman. *Fundamentos de máquinas elétricas*. McGraw Hill, 5 edition, 2013.
- [5] Jesús Fraile Mora. *Máquinas Eléctricas*. Concepción Fernández Madrid, 5 edition, 2003.
- [6] IEC. *Who we are*, 2020. Disponível em <https://www.iec.ch/who-we-are>, acessado a última vez em 12 de outubro de 2022.
- [7] IEC. *Terminology and Electropedia*. Disponível em <https://www.iec.ch/electropedia>, acessado a última vez em 03 de janeiro de 2023.
- [8] ISO. Família ISO 9000 - Gestão de Qualidade. Disponível em <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>, acessado a última vez em 07 de janeiro de 2023.
- [9] IEC. *Rotating Electrical Machines* - Todas as partes. IEC 60034:2023 SER.
- [10] EASA. *Good practice guide to maintain motor efficiency*, 2021.
- [11] IEEE. *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. IEEE Std 42-2020.
- [12] IEEE. *Evaluating Stator Cores of AC Electric Machines Rated 1 MVA and Higher*. IEEE P1719.
- [13] ABB. DCS550 Manual. Disponível em <https://new.abb.com/drives/dc/dcs550>, acessado a última vez em 05 de junho de 2023.
- [14] Yokogawa. WT300E Series Manual. Disponível em <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/power-analyzers/digital-power-meter-wt300e/#Documents-Downloads>, acessado a última vez em 2 de maio de 2023.
- [15] Elmark. *Current Measurement Transformers*. Disponível em <https://en.elmarkstore.eu/current-measurement-transformers-mes-86-60-400-5-0.5-product11508>, acessado a última vez em 3 de maio de 2023.

- [16] IEC. *Instrument transformers - Part 10: Additional requirements for low-power passive current transformers*. IEC 61869-10:2017.
- [17] IEC. *Graphical Symbols for Diagrams*. IEC 60617.
- [18] IEC. *Preparation of documents used in electrotechnology – Part 1: Rules*. IEC 60617-1.
- [19] Inductive Automation. *What is a PLC*. Disponível em <https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-a-PLC>, acessado a última vez em 15 de maio de 2023.
- [20] AEMT. *Safety in Electrical Testing - Good Practice Guide*. AEMT 1991.
- [21] EASA. *Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus*. EASA AR100-2020.

Anexo A

IEC 60034

A.1 Partes constituintes da norma IEC 60034

P1 *Rating and performance*

P2 *Standard methods for determining losses and efficiency from tests*

P3 *Specific requirements for synchronous generators driven by steam turbines or combustion gas turbines and for synchronous compensators*

P4 *Methods for determining electrically excited synchronous machine quantities from tests*

P5 *Degrees of protection provided by the integral design of rotating electrical machines (IP code) - Classification*

P6 *Methods of cooling (IC Code)*

P7 *Classification of types of construction, mounting arrangements and terminal box position (IM Code)*

P8 *Terminal markings and direction of rotation*

P9 *Noise limits*

P11 *Thermal protection*

P12 *Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*

P14 *Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity*

P15 *Impulse voltage withstand levels of form-wound stator coils for rotating a.c. machines*

P16 *Excitation systems for synchronous machines*

P18 *Functional evaluation of insulation systems*

- P19 *Specific test methods for d.c. machines on conventional and rectifier-fed supplies*
- P20 *Control motors - Stepping motors*
- P22 *AC generators for reciprocating internal combustion (RIC) engine driven generating sets*
- P23 *Repair, overhaul and reclamation*
- P24 *Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents - Application guide*
- P25 *AC electrical machines used in power drive systems - Application guide*
- P26 *Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors*
- P27 *Measurements on the winding insulation*
- P28 *Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors*
- P29 *Equivalent loading and superposition techniques - Indirect testing to determine temperature rise*
- P30 *Efficiency classes of AC motors (IE-code)*
- P31 *Selection of energy-efficient motors including variable speed applications - Application guidelines*
- P32 *Measurement of stator end-winding vibration at form-wound windings*
- P33 *Synchronous hydrogenerators including motor-generators - Specific requirements*
- P34 *AC adjustable speed rolling mill motors*

NOTA: Algumas partes estão em falta porque passaram a estar desatualizadas, deixaram de ser relevantes ou foram substituídas e/ou incorporadas noutras partes ou até normas separadas.

Anexo B

Simbologia utilizada nos esquemas



Figura B.1: Disjuntor.



Figura B.2: Contactor.

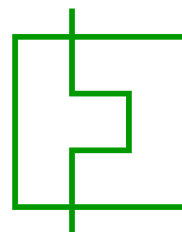


Figura B.3: Relé Térmico.



Figura B.4: Contacto Normalmente Aberto (NA).



Figura B.5: Contacto Normalmente Fechado (NF).

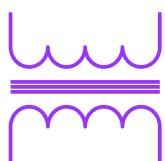


Figura B.6: Transformador de Tensão (TT).

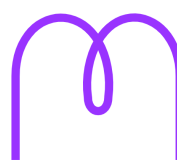


Figura B.7: Transformador de Intensidade (TI).

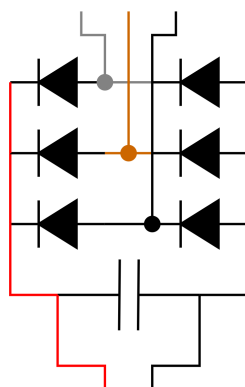


Figura B.8: Ponte Retificadora.