



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Brígida Alexandra Brás Lopes

Estudo sobre a engenharia inversa com projeto assistido por computador

Relatório de Estágio

Orientado por:

Professor Paulo Manuel Machado Coelho – Instituto Politécnico de Tomar
Engenheiro Bruno Rosa Marques Luís – Comboios de Portugal

Relatório de Estágio
apresentado ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Eletrotécnica

RESUMO

Neste projeto foram adquiridos conhecimentos relativos à Engenharia Inversa, incidindo sobre a sua aplicação em placas de circuitos impressos, revelando-se um processo útil e necessário na revitalização de sistemas eletrónicos com componentes obsoletos. Fazendo uso das noções adquiridas nesse estudo foi efetuado um processo de engenharia inversa para modernização de uma *eurocard* (placa de circuito impresso normalizada) pertencente à Unidade de Controlo Central da UQE 2300/2400 da Linha de Sintra, que corresponde ao módulo de acoplamento com o *bus* do comboio RS 485. Foi realizado o projeto assistido por computador, no *software* KiCad.

Alguns componentes eletrónicos da *eurocard* já se encontravam obsoletos, descontinuados no mercado, e também não existia muita informação sobre este circuito impresso. Foram escolhidos novos componentes eletrónicos, equivalente aos antigos obsoletos, recorrendo à tecnologia SMD, tendo em conta as funções e as características elétricas de funcionamento dos originais. No atual momento, esta etapa foi dificultada pelo problema de falta de *stock* de componentes eletrónicos a nível mundial. O esquemático e o circuito da PCB foram redesenhados tendo em conta a disposição dos pinos e as dimensões dos novos componentes eletrónicos selecionados. Após gerar os ficheiros de maquinação por comando numérico, designados por ficheiros Gerber, e a listagem de materiais, estes foram enviados para o fabricante de PCB. No final, foi simulado e validado o seu funcionamento em laboratório e efetuou-se o ensaio no comboio, com sucesso. Foram anotados aspetos para melhoramento quer do protótipo quer do processo de EI a aplicar nas próximas cartas eletrónicas.

Este trabalho pretendeu contribuir para a modernização de componentes do material circulante da CP, responsável pelo serviço de transportes ferroviário de passageiro em Portugal, visto que o transporte ferroviário é particularmente relevante para o futuro da mobilidade de grandes massas de população.

Palavras-chave: Engenharia Inversa, PCB, Circuito Impresso, Comboio, Automotora Elétrica, Comando, Controlo, Tração Elétrica, Ferrovia, KiCad

ABSTRACT

In this project it was acquired knowledge related to Reverse Engineering, focusing on its application in printed circuit boards, proving to be a useful and necessary process in the revitalization of electronic systems with obsolete components. Making use of the notions acquired in this study, a reverse engineering process was carried out to modernize a eurocard (standardized printed circuit board). This eurocard belongs to the Central Control Unit of the UQE 2300/2400 of the Sintra's Line, and it corresponds to the coupling module with the bus RS 485 of the train. The computer-assisted design was carried out using KiCad software.

Some electronic components of the eurocard were already obsolete, discontinued on the market, and there was not much information about this printed circuit either. New electronic components equivalent to the old obsolete ones, were chosen, using SMD technology, considering the functions and electrical operating characteristics of the originals. At the present time, this step was hampered by the problem of lack of stock of electronic components worldwide. The schematic and circuit of the PCB have been redesigned considering the pin layout and dimensions of the selected new electronic components. After generating the numerical command machining files, called Gerber files, and the bill of materials, these were sent to the electronic circuit manufacturer. In the end, its operation was simulated and validated in the laboratory and the test was carried out on the train, successfully. Aspects were noted for improvement of both the prototype and the RE process to be applied in the next electronic cards.

This work aimed to contribute to the modernization of the rolling stock components of CP, that is the enterprise responsible for the passenger rail transport service in Portugal, because rail transport is particularly relevant for the future of mobility of large masses of population.

Keywords: Reverse Engineering, PCB, Printed Circuit, Train, Electric Railcar, Command, Control, Electric Traction, Railway, KiCad

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Engenheiro Bruno Luís da CP por todos os conhecimentos práticos e teóricos que me transmitiu durante o período de estágio, de forma paciente, exigente e com um profissionalismo exemplar.

Agradeço ao Professor Paulo Coelho do IPT a sua total disponibilidade e as suas úteis orientações, e por ter sido sempre um excelente Professor, que me acompanhou desde o início ao fim do curso.

Índice

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
Índice	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas e siglas	xv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do estágio	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Plano de Trabalho.....	2
1.4. Estrutura do relatório.....	3
2. A Organização	5
2.1. Missão, Visão e Valores.....	6
2.2. Políticas de Gestão	7
2.3. Enquadramento histórico.....	9
3. Estado da Arte	15
3.1. Engenharia Inversa.....	15
3.1.1. Metodologias da Engenharia Inversa.....	18
3.1.2. Engenharia Inversa de PCB	23
3.2. Tecnologia ferroviária.....	26
4. Projeto de Engenharia Inversa.....	37
4.1. Objeto de estudo e descrição do problema.....	38
4.1.1. Material circulante	38

4.1.2. Unidade de Controlo Central	42
4.2. Análise do sistema e identificação de componentes	44
4.3. Escolha de componentes	47
4.4. Projeto da PCB.....	49
4.5. Ensaaios e resultados experimentais.....	55
4.5.1. <i>Eurocard</i> 6FH1061	56
4.5.2. <i>Eurocard</i> 6FH8163	67
5. Conclusão	77
Referências bibliográficas	81
ANEXOS.....	85
Anexo A – Listagem de componentes da <i>eurocard</i> 6FH8163	87
Anexo B – Esquemático da <i>eurocard</i> 6FH8163	89
Anexo C – Circuito da <i>eurocard</i> 6FH8163	91

Índice de figuras

Figura 1 – Logotipo e designação atual da CP	5
Figura 2 – Organograma da CP	5
Figura 3 – Organograma do Grupo de Empresas Participadas	8
Figura 4 – Composição do Comboio Real	9
Figura 5 – Gare do Oriente	11
Figura 6 – Automotora elétrica da série 4000	11
Figura 7 – Rede explorada pela CP	12
Figura 8 – Ciclo de vida típico de um produto	17
Figura 9 – Exemplo de um diagrama de blocos de uma <i>webcam</i>	20
Figura 10 – Exemplo da estrutura funcional de uma <i>webcam</i>	21
Figura 11 - Utilização de lixa para retirar a máscara de solda de uma PCB	24
Figura 12 – Metodologia de conversão de uma PCB utilizando Gerador Automático de Modelos Verilog HDL (AVMG).....	24
Figura 13 – Protótipo de comboio maglev	28
Figura 14 – Evolução da velocidade máxima do comboio desde 1980.....	29
Figura 15 – Estrutura de inclinação de um comboio pendular.....	30
Figura 16 – Estrutura de inclinação com um sistema de mola de ar	31
Figura 17 – Esquema de operação da tecnologia RFID no transporte ferroviário	33
Figura 18 – Fluxograma da parte prática do projeto	37
Figura 19 – Automotoras da série UQE 2300/2400	38
Figura 20 – Desenho cotado da automotora UQE 2300/2400.....	39
Figura 21 – Veículo ferroviário e os seus principais componentes.....	39
Figura 22 – Exemplo de <i>bogie</i> americano padrão	40
Figura 23 – Diagrama da locomotiva elétrica CA.....	41
Figura 24 – <i>Racks</i> da Unidade de Controlo Central e da Unidade de Controlo de Tração .	43
Figura 25 – <i>Eurocard</i> 6FH8163 inserida no <i>rack</i> da UCC de uma UQE 2300/2400	44
Figura 26 – Placa frontal da <i>eurocard</i> 6FH8163	45
Figura 27 – <i>Eurocard</i> 6FH8163	46
Figura 28 – Exemplo da janela inicial do KiCad	49
Figura 29 – Esquemático da <i>eurocard</i> 6FH8163	50

Figura 30 – Execução do esquemático no KiCad	50
Figura 31 – Edição de <i>footprints</i> no KiCad	51
Figura 32 – Conjunto dos <i>footprints</i> dos componentes	52
Figura 33 – Subsistemas da <i>eurocard</i> 6FH8163	52
Figura 34 – Execução do circuito da PCB no KiCad	53
Figura 35 – Colocação de <i>vias</i>	54
Figura 36 – Parte de <i>filled zone</i>	54
Figura 37 – Ícone que gera a BOM no KiCad	55
Figura 38 – Exemplo de informação contido nos ficheiros GERBER	55
Figura 39 – <i>Eurocard</i> 6FH1061 renovada após processo de EI	56
Figura 40 – Diagrama de blocos simplificado do sistema da <i>eurocard</i> 6FH1061	57
Figura 41 – Excerto do esquemático da <i>eurocard</i> 6FH1061: entradas e saídas na ficha X1	58
Figura 42 – Excerto do esquemático da <i>eurocard</i> 6FH1061: saída de verificação de funcionamento	58
Figura 43 – Ensaio da <i>eurocard</i> 6FH1061 obsoleta	59
Figura 44 – Esquema de montagem nas saídas B28 e Z28 em X1	60
Figura 45 – Esquema de montagem nas saídas B16 e Z16 em X2	60
Figura 46 – Formas de onda no teste do circuito de verificação redundante do sistema (..	62
Figura 47 – Formas de onda registadas no ligar do interruptor, a uma frequência de 300Hz	63
Figura 48 – Formas de onda registadas no desligar do interruptor, a uma frequência de 300Hz	64
Figura 49 – Formas de onda registadas no ligar do interruptor, a uma frequência de 1000Hz..	65
Figura 50 – Formas de onda registadas no desligar do interruptor, a uma frequência de 1000Hz	66
Figura 51 – Faces superior (a) e inferior (b) das <i>eurocards</i> 6FH8163	67
Figura 52 – Diagrama de blocos simplificado do sistema da <i>eurocard</i> 6FH8163	68
Figura 53 – Extrato do esquemático da <i>eurocard</i> 6FH8163	69
Figura 54 – Esquema de montagem nos pinos das fichas da <i>eurocard</i> 6FH8163	70
Figura 55 – Extrato parcial do esquemático da <i>eurocard</i> 6FH8163: relé K1	70

Figura 56 – Extrato parcial do esquemático da <i>eurocard</i> 6FH8163: resistência R13 e resistência R14	71
Figura 57 – <i>Eurocard</i> 6FH8163 atualizada, na posição G019 da <i>rack</i> da UCC	72
Figura 58 – Interruptor de alavanca para acionamento da bateria	72
Figura 59 – Mostrador analógico da tensão da catenária e monitor SIBAS	73
Figura 60 – Visão parcial do painel de comandos na UQE 2403/63	73
Figura 61 – Outra <i>eurocard</i> , referência 6FH8151	75
Figura 62 – Mostrador analógico do dinamômetro da UQE 2403/63	76

Índice de tabelas

Tabela 1 – Calendarização das fases do trabalho de estágio	2
Tabela 2 – Comparação entre valores de 1950 e de 1998 nos maiores caminhos de ferro .	27
Tabela 3 – Correspondência entre a entrada de sinal em X1 e o sinal de saída originado em X2, na <i>eurocard</i> 6FH1061	61
Tabela 4 – Parâmetros de validação da <i>eurocard</i> 6FH1061	67
Tabela 5 – Correspondência entre a existência de tensão nos pinos de X1 e o relé acionado, na <i>eurocard</i> 6FH8163	71

Lista de abreviaturas e siglas

AVMG	– <i>Automatic Verilog HDL Model Generator</i>
BOM	– <i>Bill Of Materials</i>
CA	– Corrente Alternada
CAD	– <i>Computer-Aided Design</i>
CAE	– <i>Computer-Aided Engineering</i>
CAM	– <i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CC	– Corrente Contínua
CI	– Circuito Integrado
CMOS	– <i>Complementary metal–oxide–semiconductor</i>
CP	– Comboios de Portugal
DB	– <i>General Federal Railways</i>
ECAD	– <i>Electronic Computer-Aided Design</i>
EDA	– <i>Electronic Design Automation</i>
EEPROM	– <i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EI	– Engenharia Inversa
EMEF	– Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário
E.P.E.	– Entidade Pública Empresarial
EUA	– Estados Unidos da América
HDL	– <i>Hardware Description Language</i>
ICE	– <i>Intercity Express</i>
IMT	– Instituto da Mobilidade e dos Transportes
INTF	– Instituto Nacional de Transporte Ferroviário
IPAC	– Instituto Português de Acreditação
IPT	– Instituto Politécnico de Tomar
JNR	– <i>Japanese National Railways</i>
MTBF	– <i>Mean Time Between Failures</i>
MVBUS	– <i>Multifunction Vehicle Bus</i>
NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PDN	– <i>Product Discontinuation Notice</i>
PCB	– <i>Printed Circuit Board</i>
OEM	– <i>Original Equipment Manufacturer</i>

RE – *Reverse Engineering*

REFER – Rede Ferroviária Nacional

RF – Rádio Frequência

RFID – *Radio Frequency Identification*

RoHS – *Restriction of Hazardous Substances Directive*

SMD – *Surface-Mount Device*

SMT – *Surface-Mount Technology*

TGV – *Train à Grande Vitesse*

TTL – *Time to Live*

UCC – Unidade de Controlo Central

UCT – Unidade de Controlo de Tração

UE – União Europeia

UQE – Unidade Quádrupla Elétrica

1. Introdução

Com o processo de revitalização do serviço de transporte ferroviário de passageiros a CP pretende cumprir a sua visão como líder nacional de mobilidade integrada – simples, pessoal e sustentável. Pretende concretizar a sua missão de ligar pessoas e comunidades, de forma sustentada e alicerçada no modo ferroviário, contribuindo para que Portugal atinja os objetivos assumidos no Acordo de Paris e na União Europeia, sendo a ferrovia considerada mundialmente como um meio de transporte ecológico, (Moreira, 2022).

1.1. Enquadramento do estágio

O presente estágio está enquadrado numa cooperação entre a CP – Comboios de Portugal, E.P.E. (Entidade Pública Empresarial) e o IPT – Instituto Politécnico de Tomar, tendo sido celebrado o respetivo Protocolo de Estágio Curricular entre as partes. Foi realizado em ambiente de trabalho nas instalações da CP no Entroncamento e com uma duração de 9 meses.

Para além do transporte ferroviário de passageiros, a CP adquiriu recentemente competências em áreas como a manutenção, reparação, grande reparação e reabilitação de material circulante ferroviário, incluindo todas as atividades complementares, e bem assim em áreas como as de estudos e conceção de instalações oficiais, fabrico, reparação e manutenção de componentes e desenvolvimento de soluções informáticas, após a integração da EMEF (Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário), (Moreira, 2022).

O presente estágio consistiu no desenvolvimento de um projeto que está inserido na área de eletrónica, mais concretamente centrado no estudo e desenvolvimento da substituição de componentes obsoletos, contribuindo para a modernização de material circulante, que já conta 30 anos de serviço, especificamente numa modernização tecnológica da UCC – Unidade de Controlo Central da automotora elétrica da série 2300/2400, que consiste numa UQE (Unidade Quádrupla Elétrica).

1.2. Objetivos

Em traços gerais, o foco deste projeto, recaiu sobre o estudo da Engenharia Inversa (EI), pressupondo a necessidade de aprofundar os conhecimentos relativos ao tema e efetuar

o desenvolvimento de técnicas para a EI de circuitos impressos, dos quais a CP tem pouca ou quase nenhuma documentação, e quando recebida do fabricante apresenta alguns erros ou está bastante incompleta.

Através da aplicação dos conhecimentos adquiridos durante o estudo e fazendo uso do projeto assistido por computador – *software* específico de projeto de placas de circuitos impressos (PCB - *Printed Circuit Board*) – pretendeu-se redesenhar os circuitos impressos do fabricante, com atualização dos seus componentes obsoletos, e recorrendo a componentes mais pequenos e avançados existentes atualmente no mercado, mantendo as funções e as mesmas características de funcionamento originais. No final, pretendeu-se simular e efetuar testes do *layout* desenvolvido, para possibilitar a validação da PCB ou formulação de alterações para correção de problemas encontrados.

1.3. Plano de Trabalho

Consideraram-se as seguintes fases na elaboração do plano de trabalho e a respetiva calendarização (Tabela 1):

Fase 1 – Acolhimento e formação sobre as técnicas em desenvolvimento e dos requisitos necessários à produção dos circuitos impressos.

Fase 2 – Formação, investigação e estudo teórico de técnicas e metodologias de engenharia inversa de circuitos impressos com projeto assistido por computador.

Fase 3 – Aplicação das técnicas e metodologia estudada e análise dos processos de reprodução dos circuitos.

Fase 4 – Ensaios dos circuitos reproduzidos e implementação de melhorias nos processos de engenharia inversa.

Fase 5 – Elaboração do relatório final de estágio.

Tabela 1 – Calendarização das fases do trabalho de estágio (elaboração própria).

Fases	dez 21	jan 22	fev 22	mar 22	abr 22	mai 22	jun 22	jul 22	ago 22
1									
2									
3									
4									
5									

Especificamente, na fase 1 foi feita uma apresentação do trabalho a desenvolver e das principais dificuldades a ultrapassar, intercalada com uma breve apresentação da empresa principalmente com visitas às várias instalações (instalações de manutenção de equipamento mecânico e eletrónico, oficina de pneumáticos, laboratório de calibração, entre outros) no parque oficial do centro (Entroncamento). Foi feita uma breve apresentação do sistema de comando e tração da automotora de passageiros UQE 2300/2400, em específico os automatismos de comando e controlo da tração (UCC e UCT – Unidade de Controlo de Tração). Estas unidades são constituídas por diversas cartas eletrónicas, do tipo *eurocard*, com diferentes funções analógicas e digitais nas entradas e saídas, e todos sinais são processados por meio de processadores intel x86 de 16bit, daí o equipamento se designar de SIBAS16.

A fase 2 englobou o estudo sobre as técnicas e metodologia de EI, com pesquisa da sua aplicação em casos reais, quais os principais obstáculos neles encontrados e como foram ultrapassados.

Na fase 3 procedeu-se à escolha de novos componentes para substituição dos atuais obsoletos, e sempre com recurso dentro do possível aos novos componentes de tecnologia SMD (*Surface-Mount Device*) ou SMT (*Surface-Mount Technology*). Concretizando o estudo da *eurocard* a modernizar, elaborou-se a respetiva listagem (BOM – *Bill Of Materials*). Resolveram-se alguns problemas relacionados com a obsolescência. Foram reproduzidos os circuitos com o *software* KiCad e no final desta fase foi fabricada a PCB.

A fase 4 consistiu na testagem da aplicação da EI ao circuito impresso tendo sido ensaiadas e testadas as PCB em laboratório e elaborados os respetivos planos de validação, assim como a relação do equipamento e material necessários. Foram formuladas e registadas as correções a efetuar na atualização da PCB e implementadas melhorias no processo de EI, a seguir na fabricação das próximas PCB.

Na fase 5 foi concluído o estágio com a redação do presente relatório.

1.4. Estrutura do relatório

O presente relatório está dividido em 5 capítulos e 3 anexos, apresentando uma abordagem sequencial dos assuntos e sua associação às várias fases do estágio.

No capítulo 1 foi feita a Introdução ao trabalho desenvolvido, através do enquadramento do estágio, discriminação dos objetivos e descrição do plano de trabalho.

No capítulo 2, foi apresentada a CP, enquanto organização de acolhimento do estágio, nomeadamente a sua estrutura e composição atual e as suas políticas de gestão. O seu enquadramento histórico foi efetuado de uma forma resumida, uma vez que a Empresa conta com cerca de 160 anos de história.

O Estado da Arte foi desenvolvido no capítulo 3, tendo sido abordados aspetos da EI que permitiram adquirir conhecimentos sobre alguns fundamentos e conceitos essenciais para aplicação na parte prática do projeto. Fez-se referência a alguns aspetos mais relevantes da tecnologia, mas de forma muito sucinta por ser um assunto vasto e diferenciado.

O capítulo 4 descreve o desenvolvimento do projeto de estágio, iniciando-se com a descrição do objeto de estudo (especificamente a PCB) e do material circulante, onde esta se inclui. Foi feita uma análise dos circuitos existentes e referido o processo de escolha de componentes, culminando no desenho do esquemático e do circuito da PCB, através do *software* de projeto KiCad. No final deste capítulo foi feita uma descrição do procedimento e resultados dos ensaios laboratoriais às PCB, com formulação de correções a efetuar nas novas *eurocards* e sugestões de melhoramento no processo de EI.

Finalmente, no capítulo 5 foram expostas as conclusões.

2. A Organização

A CP E.P.E. é uma empresa certificada integrada no Setor Público Empresarial, constituindo-se como o maior transportador ferroviário de passageiros do país, logotipo e designação atual na Figura 1). Cumpre integralmente os Princípios de Bom Governo das Empresas do Setor Empresarial do Estado determinados pelo Decreto-Lei n.º 133/2013, de 3 de outubro, bem como a legislação e a regulamentação em vigor.



Figura 1 – Logotipo e designação atual da CP (<https://www.cp.pt>).

No âmbito do modelo de governo adotado (Figura 2), a CP tem um Conselho de Administração, um Conselho Fiscal e um Revisor Oficial de Contas, sendo ainda auditada por um Auditor Externo.

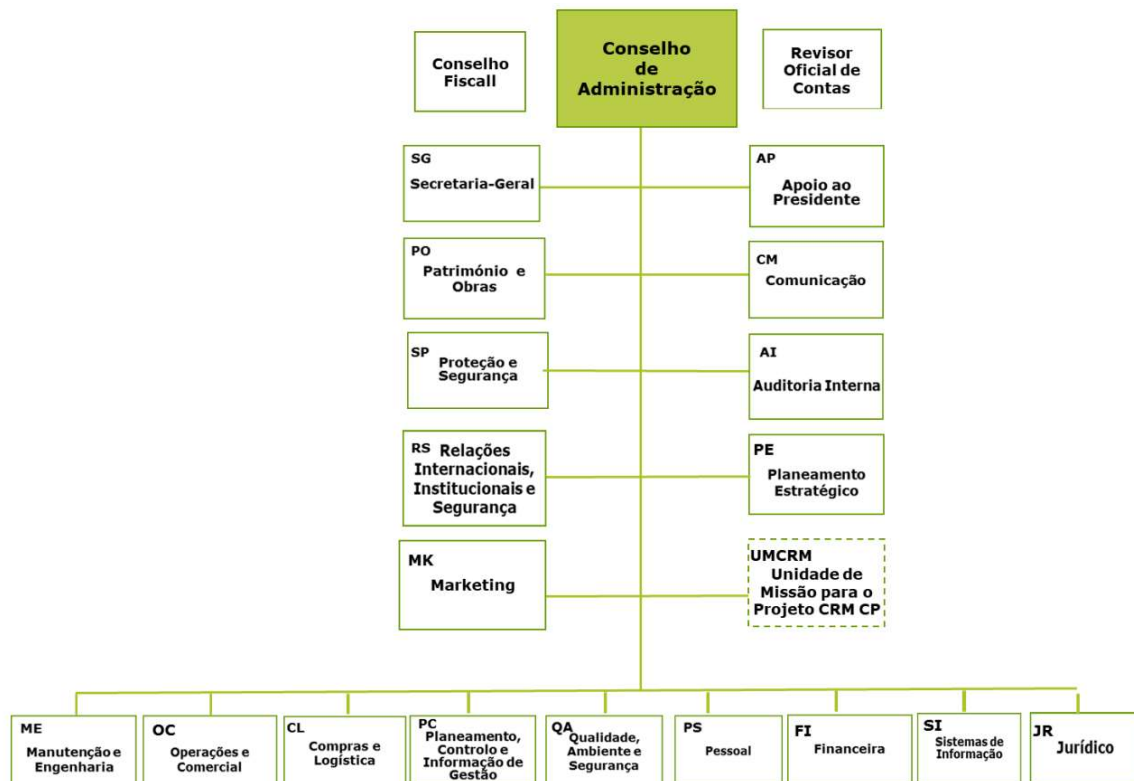


Figura 2 – Organograma da CP (<https://www.cp.pt/institucional/pt/empresa/modelo-governo>).

2.1. Missão, Visão e Valores

Num contexto favorável ao investimento na ferrovia, a CP assume o protagonismo na promoção de uma estratégia nacional de mobilidade na qual o modo ferroviário deve ter um papel primordial. Assim tem como Missão “Ligar pessoas e comunidades, de forma sustentada e alicerçada no modo ferroviário.”. A sua Visão é “A CP como líder nacional de mobilidade integrada – simples, pessoal e sustentável.”, (CP E.P.E., 2022).

A Empresa apresenta como Valores:

- Cliente

Segurança - prestar o serviço ao Cliente com segurança.

Ambiente - contribuir para a preservação do ambiente.

Confiança - garantir a qualidade do serviço e a satisfação dos Clientes.

- Equipa CP

Compromisso - trabalhar em equipa, com competência e partilha do conhecimento.

Ética - atuar com responsabilidade, norteando-nos pela integridade, honestidade e respeito por todos.

Resiliência - capacidade de adaptação à mudança e de encontrar soluções para as adversidades e desafios, superando-os mais fortalecidos.

- Futuro

Inovação - inovar para garantir a competitividade da empresa, a qualidade dos serviços e a satisfação do Cliente.

Sustentabilidade - estar empenhados em obter a sustentabilidade económica, ambiental e social.

Liderança na mobilidade - ir mais longe, para moldar o futuro da mobilidade nacional, aumentando a coesão territorial.

A CP cumpre a missão que lhe está atribuída, bem como os objetivos que estipula, tendo em conta parâmetros de qualidade exigentes e respeitando os princípios de responsabilidade social, desenvolvimento sustentável e serviço público. Trata com respeito, igualdade e integridade os seus trabalhadores, contribuindo ativamente para a sua valorização profissional. Trata com equidade todos os seus clientes e fornecedores e demais titulares de interesses legítimos, dispondo de procedimentos em matéria de aquisição de bens e serviços (CP E.P.E., 2022).

2.2. Políticas de Gestão

A CP tem implementadas as seguintes Políticas de Gestão:

- Política Ambiental, instituída numa base puramente voluntária, através da implementação do seu Sistema de Gestão Ambiental, para cumprir não só a legislação e os regulamentos ambientais aplicáveis e compromissos assumidos, mas também para aumentar a sua eficiência energética, melhorar a gestão dos seus recursos e assegurar o encaminhamento correto dos seus resíduos (CP E.P.E., 2022).

- Política de Gestão de Ativos, que tem por finalidade estabelecer as diretrizes, os objetivos e as competências para a implementação do Sistema de Gestão de Ativos, de modo a assegurar a sustentabilidade dos ativos da CP que são de importância estratégica, e insubstituíveis, para a mobilidade no país. Considera-se essencial para percecionar as áreas relevantes para a produção e concomitante aumento de valor para a Empresa, e impõe-se como meio de conseguir o equilíbrio entre os custos, os riscos e o desempenho desejado desses ativos, sejam eles físicos, humanos, financeiros, intangíveis ou de informação (CP E.P.E., 2022).

- Política de Gestão da Inovação que define as intenções e direções da Organização formalmente expressas pela sua gestão de topo para a implementação do Sistema de Gestão de Inovação. Este Sistema conduz a Organização a determinar a sua visão, estratégia, política e objetivos de inovação e o suporte de processos necessários para alcançar os resultados pretendidos. Permite ainda aumentar a capacidade de gerir a incerteza e melhorar a sua sustentabilidade e resiliência (CP E.P.E., 2022).

- Política de Gestão de Pessoas, por a CP a considerar que os seus trabalhadores são uma força vital para o desenvolvimento da empresa e assumir a responsabilidade social como referencial para a gestão das pessoas (CP E.P.E., 2022).

- Política da Qualidade e da Segurança através da implementação do Sistema de Gestão de Qualidade (SGQ) e do Sistema de Gestão da Segurança. Em 1999, cobrindo as suas oficinas de grande reparação de material circulante (a então EMEF, Empresa do grupo CP) foi certificada de acordo com a NP EN ISO9002:1995. Em 2020 ocorre a integração da EMEF na CP, mantendo-se o SGQ da CP certificado em conformidade com a norma NP EN ISO 9001 no domínio do serviço de transporte de passageiros. De igual modo, fruto desta integração, a CP passou a dispor da certificação do SGQ no domínio industrial, abrangendo a conceção, fabrico, manutenção e reparação de material circulante e respetivos

componentes, e operações de carrilamento. Reforçando a aposta na Qualidade, foi desenvolvido na EMEF, um Sistema de Gestão da Qualidade no Laboratório de Ensaios e Metrologia, acreditado pelo IPAC – Instituto Português de Acreditação, de acordo com a norma NP EN ISO/IEC 17025, garantindo padrões de rigor e confiança de acordo com este exigente *standard* Internacional, nos serviços de calibração internos e prestados ao exterior. Este Laboratório localizado no Entroncamento, está acreditado para realizar calibrações no âmbito dimensional, eletricidade, momento e pressão (CP E.P.E., 2022).

A CP é a empresa-mãe de um grupo de empresas subsidiárias e associadas, atuando em diversos segmentos de atividade e em todo o território nacional oferecendo serviços essenciais para o desenvolvimento do país e para a sua coesão social e territorial, operando ainda a nível internacional (Figura 3). A CP detém ainda algumas participações minoritárias numa lógica de cooperação com outros Operadores, (CP E.P.E., 2022).

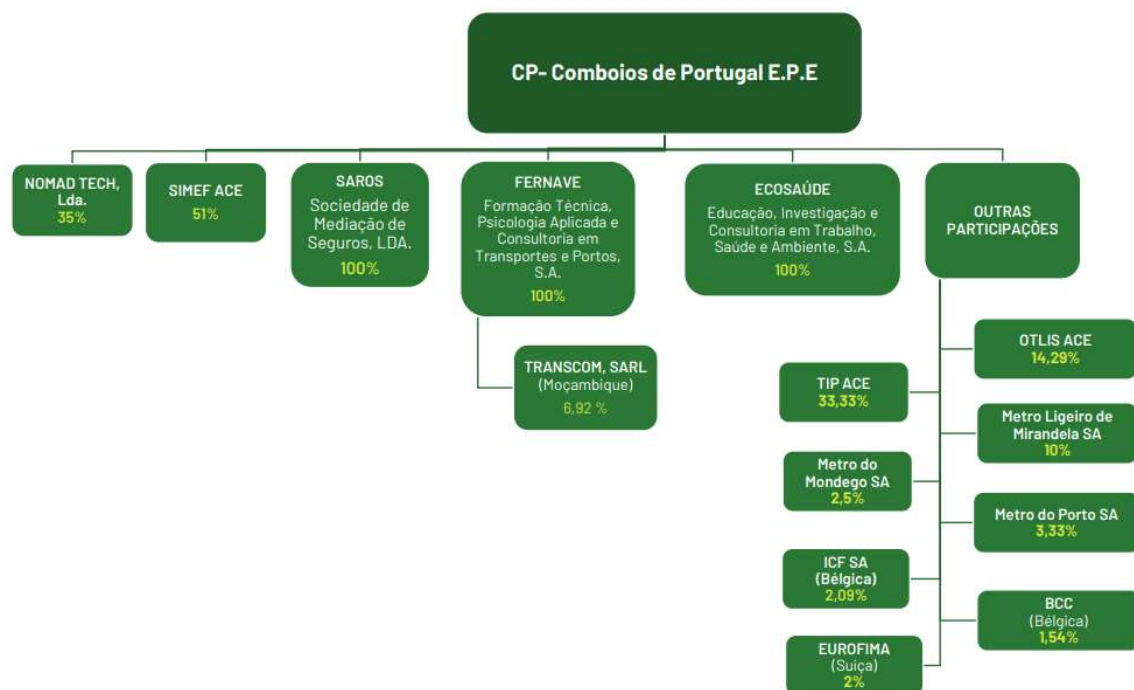


Figura 3 – Organograma do Grupo de Empresas Participadas
(<https://www.cp.pt/institucional/pt/empresa/empresas-participadas>).

Na dependência direta do Conselho de Administração da CP, existe a Comissão de Ética que tem por missão, entre outras, zelar pelo cumprimento e divulgação do Código de

Ética. Cuida também do incremento da ética no modelo de governo de cada uma das Empresas do Grupo CP.

O Código de Ética do Grupo CP, revisto em 2019, incorpora o conjunto de valores fundamentais das Empresas do Grupo CP e orientadores comportamentais dos seus colaboradores, independentemente da natureza dos seus vínculos com as mesmas.

2.3. Enquadramento histórico

A inauguração do primeiro troço dos caminhos de ferro portugueses ocorreu no dia 28 de outubro de 1856, com a realização da viagem de comboio entre Lisboa e o Carregado, seguindo-se um longo período de expansão da rede ferroviária até à década de quarenta do séc. XX, (CP E.P.E., 2022).

A CP é a empresa herdeira da Companhia Real dos Caminhos de Ferro Portugueses, constituída em 20 de junho de 1860. Era uma das companhias de caminho-de-ferro que atuavam em Portugal (Figura 4), visto existirem outras responsáveis pela construção e exploração de linhas férreas, em diferentes pontos do país. Com a instauração da República, a designação social da empresa perdeu o Real e passou a ser denominada Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses.



Figura 4 – Composição do Comboio Real incluindo a locomotiva D. Luiz e os Salões D. Maria Pia e do Príncipe, exposta no Museu Nacional Ferroviário do Entroncamento (<https://historiaschistoria.blogspot.com/2019/01/comboios-reais-portugueses.html>).

Em Portugal, o transporte ferroviário nasceu como sinónimo do consenso alargado sobre o modelo de desenvolvimento a adotar, sendo a construção financiada por capitais privados e públicos visto que o próprio Estado se responsabilizou pela “política de melhoramentos materiais”, através do financiamento da construção, assegurando taxas de juro, formando quadros, criando as estruturas da Administração Central e explorando diretamente as redes do Minho e Douro e Sul e Sueste, (CP E.P.E., 2022).

Em 1947, em consequência da pressão efetuada pela rodovia e pela situação financeira difícil das companhias ferroviárias, foi publicada a Lei 2008: Lei da Coordenação dos Transportes Terrestres. Em 1951, foi assinado o contrato de Concessão Única, entre a CP e o Estado, para a exploração de toda a rede ferroviária nacional com a exceção da Linha de Cascais, esta arrendada à Sociedade Estoril desde 1918 e integrada na CP em 1976. O contrato de Concessão Única implicou a extinção da Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses da Beira Alta, da Companhia Nacional dos Caminhos de Ferro, da Companhia dos Caminhos de Ferro do Norte de Portugal e da Companhia dos Caminhos de Ferro do Vale do Vouga, bem como a aprovação de novos estatutos.

Com a Revolução de 25 de Abril de 1974, a Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses passou a empresa nacionalizada (Decreto-Lei n.º 205-B/75 de 16.04.75) e alterou a sua denominação social para Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses, E.P., passando o Estado a deter 100% do seu capital.

Em 1991, a Diretiva Comunitária 91/440 estabeleceu linhas de orientação no sentido da reestruturação do setor ferroviário, designadamente apontando a separação da gestão das infraestruturas da operação de transporte. Nesse sentido, o Governo definiu as linhas gerais desta reorganização assente num modelo baseado em três entidades: Operadores de Transporte, Gestor da Infraestrutura e Organismo Regulador. Assim, em 1993, foi criada a EMEF, no âmbito da autonomização das áreas de reparação, manutenção e reabilitação do material circulante da CP. Em 1997, foi criada a Rede Ferroviária Nacional - REFER, EP (Decreto-Lei n.º 104/97), a qual ficou responsável pela gestão das infraestruturas ferroviárias, funções atualmente integradas nas Infraestruturas de Portugal. A CP, por sua vez, ficou responsável pela atividade de exploração do transporte ferroviário, (CP E.P.E., 2022).

Em 1998, foi criado o Instituto Nacional de Transporte Ferroviário – INTF (Decreto-Lei n.º 299- B), com funções de regulação, supervisão e desenvolvimento do setor

ferroviário, que atualmente se encontram no âmbito das competências do IMT - Instituto da Mobilidade e dos Transportes. Na Figura 5 pode visualizar-se a Gare do Oriente, uma das interfaces ferroviárias e rodoviárias mais importantes de Portugal, que foi iniciada por Caminho de Ferro Portugueses e terminada após a criação da Rede Ferroviária Nacional, (CP E.P.E., 2022).



Figura 5 – Gare do Oriente, concluída em 1998 (CP E.P.E., 2022).

Em 1999 foi introduzido o serviço Alfa Pendular, efetuado pelas automotoras elétricas da série 4000 (Figura 6), com capacidade de pendulação, que possibilita uma velocidade máxima de 220km/h e foi considerado como um dos marcos mais importantes no desenvolvimento do transporte ferroviário em Portugal, (CP E.P.E., 2022).



Figura 6 – Automotora elétrica da série 4000 a efetuar o serviço Alfa Pendular da CP (CP E.P.E., 2022).

Conforme referido, a CP tem implementado um Sistema de Gestão Integrado da Qualidade e Ambiente, tendo sido, em 2008, obtida a certificação global da Organização no âmbito da Qualidade que se mantém. A CP encontra-se também certificada ao nível do

Sistema de Gestão da Segurança, conforme Certificado de Segurança, dando cumprimento ao disposto na legislação nacional e comunitária no âmbito da certificação de empresas ferroviárias e gestores de infraestruturas (CP E.P.E., 2022).

Em 2009, a CP transformou-se numa entidade pública empresarial, passando a denominar-se CP - Comboios de Portugal, E.P.E., através da alteração dos seus estatutos pelo Decreto-Lei n.º 137- A/2009, de 12 de junho, revistos em 2012 pelo Decreto-Lei n.º 59/2012 de 14 de março.

Ainda em 2009, com a criação da CP Carga, SA, foi autonomizado o transporte de mercadorias, tendo em vista responder aos desafios lançados pela União Europeia com a liberalização do transporte ferroviário de mercadorias.



Figura 7 – Rede explorada pela CP (CP E.P.E., 2022).

A Resolução do Conselho de Ministros nº 110/2019, de 27 de junho, determinou a fusão por incorporação da EMEF na CP, e a necessidade de adaptação orgânica da CP a esta nova realidade, com efeitos a 1 de janeiro de 2020. Este processo teve como objetivo garantir a normalização e o reforço da qualidade do serviço público prestado pela CP, postulando-se como fator de um modelo de negócio social e economicamente sustentável, permitindo melhor afetação de recursos e eliminando redundâncias.

Em dezembro de 2019 a CP contava com 2635 trabalhadores ao serviço (dos quais 14% mulheres) e após a incorporação da EMEF na CP, passaram a 3643 (dos quais 11% são mulheres). Os números de 2021 revelam 30,5 milhões de euros em venda online e cerca de 99,1 milhões de passageiros transportados por ano. Assim, é uma das mais representativas empresas portuguesas e a maior empresa de transportes terrestres a operar em Portugal, com uma rede ferroviária de 2221 km (Figura 7), (CP E.P.E., 2022).

3. Estado da Arte

Neste capítulo, por estar relacionado com a problemática do presente trabalho, é abordada a Engenharia Inversa (EI), nomeadamente a sua definição e as motivações para a sua aplicação, onde se destaca a obsolescência de componentes eletrónicos. Pretendeu-se abordar especificamente a EI aplicada no desenvolvimento e na produção de novas placas de circuito impresso, contribuindo para o estudo do Estado da Arte desta área de investigação.

Referem-se alguns aspetos que mais se destacam na área da tecnologia ferroviária, de forma muito sucinta, por ser um tema muito vasto e diferenciado.

3.1. Engenharia Inversa

A engenharia inversa, também designada de *reverse engineering* ou reengenharia, consiste em desmontar e analisar em detalhe um produto ou dispositivo para descobrir o seu funcionamento, os conceitos envolvidos na sua fabricação e ainda resumir o seu processo de reconstrução. Geralmente, é utilizada para duplicar ou reproduzir algo semelhante com o intuito de aperfeiçoar um objeto existente, que no caso da eletrónica pode ser realizado ao nível do circuito, dos componentes eletrónicos, da placa e/ou do sistema (Barai, Shete, & Raut, 2015).

No entanto, Younis & Tutunji (2012) distinguem entre engenharia inversa e reengenharia: enquanto o primeiro é o processo de desmontagem e análise de um sistema para identificar os seus componentes e as suas inter-relações, a reengenharia é um processo de alteração com o objetivo de reconstruir um sistema de uma forma diferente. A EI é um processo de exame e análise, não se dedica a criar um novo funcionamento do sistema.

A EI é uma prática que remonta às antigas indústrias, mas atualmente pode ser vista como um processo de análise de um sistema, para o qual se pretende manter ou atualizar quando já não existe suporte por parte do seu fabricante ou autor. É um processo baseado na identificação dos seus componentes e das suas inter-relações, de forma a criar representações desse sistema. As motivações da EI são variadas, e têm-se como exemplo histórico a espionagem de dispositivos militares e de códigos no tempo da Guerra Fria, mas atravessa a história humana desde a pirataria comercial, à inteligência competitiva e aos tribunais (pela resolução de casos com patentes). Nas últimas décadas e em todo o mundo a EI teve uma

significativa importância na disseminação da tecnologia na indústria eletrônica (Torrance & James, 2007).

Assim, a EI é aplicada em *hardware*, tal como se aborda neste estudo, especificamente no caso da reprodução de PCB, mas também em campos tão diversos como engenharia de *software*, engenharia mecânica, desenvolvimento automotivo, produtos químicos, entre muitos outros, e em áreas tão diferentes como a saúde e o entretenimento. Como exemplo, pode referir-se que na engenharia civil, os projetos de pontes e edifícios são copiados de sucessos anteriores para que haja menor probabilidade de falhas catastróficas. Na engenharia de *software*, um bom código-fonte geralmente é uma variação de outro bom código-fonte, e muitas vezes a EI é utilizada no desenvolvimento de programas mais baratos do que os existentes no mercado ou para relacionar dados de forma mais eficaz entre diferentes sistemas operacionais (Raja & Fernandes, 2008).

Normalmente, a EI aplicada aos PCB ocorre pela necessidade de substituir as placas obsoletas, que deixam de estar disponíveis no fabricante original, ou por já não existir o fabricante original. Para além da fabricação ausente, a EI pode ser utilizada para melhorar as operações de manutenção, apoio e suporte a sistemas já existentes, ou para introduzir novos materiais e técnicas, tal como a atualização de componentes para fornecer um melhor desempenho a um processo antigo (Mat, Azmi, Daud, Zulkifli, & Ahmad, 2006).

No presente caso, a motivação em aplicar a EI centrou-se na obsolescência dos componentes eletrônicos das PCB, pelo que se destaca este aspeto. Segundo a norma internacional IEC 62402:2019, a obsolescência é a transição de um item de disponível para indisponível pelo fabricante de acordo com a especificação original. Como exemplo desses itens tem-se:

- Ativos físicos: produtos, equipamentos, subconjuntos, componentes, ferramentas de fabrico, equipamentos de teste, peças de reposição;
- Consumíveis: cartuchos de tinta, baterias;
- Materiais: metais, fluidos, polímeros, compósitos;
- *Software*: ambiente operacional, *middleware*, *firmware*, aplicações específicas;
- Sistemas: sistemas de informação, sistemas de classificação;
- Serviços: manutenção, comunicação e informação.

A obsolescência é um fator de custo significativo numa organização, principalmente se for de carácter imprevisível, e pode ocorrer em todas as fases do ciclo de vida de um item

(Figura 8), e de forma relativamente rápida. As razões pelas quais os itens se tornam obsoletos são principalmente fatores de mercado, incluindo a sua procura reduzida, a falta de lucro na sua produção ou a introdução de novas tecnologias e recursos que fazem com que o fabricante emita um aviso de descontinuação de produto (PDN - *Product Discontinuation Notice*).

A alteração do item, ao nível da configuração, classificação ou a sua atualização (também ao nível de matérias-primas ou outros subitens que o compõem) podem torná-lo obsoleto. Indiretamente as questões de marketing, fusão ou aquisição do fabricante por outra organização, ou por exemplo, a perda ou a alteração de: capacidade, habilidade ou conhecimento de fabrico ou em dar suporte ao item, são outras razões para a obsolescência. Ainda se referem a perda de autoridade legal para os fabricantes colocarem o item no mercado devido a regulamentos (por exemplo, controlo de exportação), legislação de proteção ambiental (como RoHS¹ - *Restriction of Hazardous Substances Directive*), ou acordos legais (International Electrotechnical Commission, 2019).

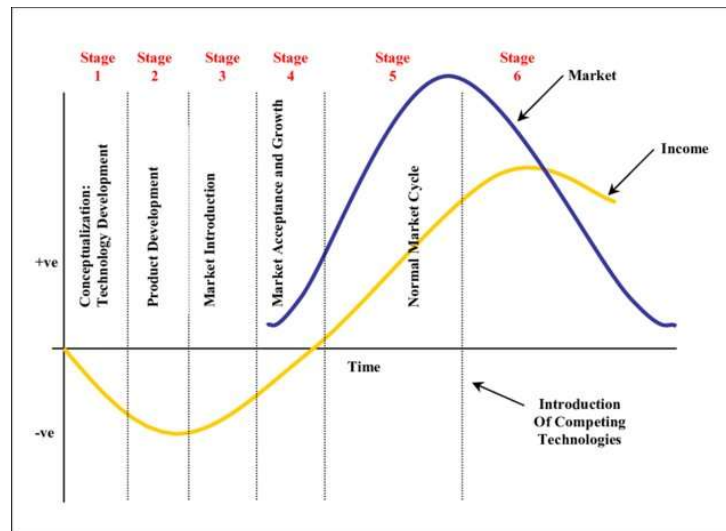


Figura 8 – Ciclo de vida típico de um produto

(https://www.researchgate.net/publication/229003718_The_Use_of_Computer_Simulation_for_the_Design_of_a_Bioheap_Leach_for_Sphalerite).

Quando a obsolescência ocorre de forma imprevisível, para além dos custos para a organização, pode alocar recursos não planeados para a sua resolução, e em casos mais

¹ RoHS é uma Diretiva da UE (União Europeia) que diz que os dispositivos eletrónicos não podem conter chumbo ou outras substâncias perigosas. Para placas de circuito impresso, a conformidade com RoHS é controlada pelo material base e pela superfície (Multi-cb, 2022).

graves pôr em risco a estabilidade financeira, operacional e reputação da mesma. A maioria dos itens tende a ficar obsoletos, e existe alguma incerteza quando e em que circunstâncias isso ocorrerá, e quais as consequências dessa obsolescência. Porém, a gestão da obsolescência garante que ela seja gerida como parte integrante da vida útil de um item e procura reduzir o seu risco através de atividades planeadas de redução de problemas de obsolescência e/ou reduzir o impacto quando um item se torna obsoleto (International Electrotechnical Commission, 2019).

Um outro motivo para aplicar a EI aos sistemas eletrónicos é o do custo de fabrico, quando os PCB são considerados propriedade do fabricante original (OEM – *Original Equipment Manufacturer*). A inexistência da informação que lhes deu origem ou em formato digital – ficheiros Gerber², por exemplo – é outra motivação da EI (Armistead, 2022).

A EI pode ser utilizada indevidamente, revelando detalhes de projeto, na reprodução ou imitação fraudulenta de produtos protegidos por direitos de autor ou de propriedade industrial, surgindo diariamente novas ameaças de contrafação e falsificação de todo o tipo de sistemas eletrónicos (Arema, 2021).

Por sua vez, a EI pode ela própria contribuir para a análise de segurança, e de verificação da integridade de circuitos integrados (CI) onde a verificação dos componentes obtidos de diferentes fontes tornou-se uma necessidade devido a alteração e violação de propriedade intelectual (Rematska & Bourbakis, 2016).

3.1.1. Metodologias da Engenharia Inversa

Segundo Younis & Tutunji, (2012) a EI pode ser dividida em quatro áreas: sistema, mecânica, eletrónica, e software.

Engenharia inversa de sistema

Segundo Torrance & James (2009), tal como existe uma variedade de sistemas eletrónicos que consistem em *hardware*, *software*, *firmware*, comunicações, transdutores entre outros, também existem variados métodos para os analisar. Logo, é um método de análise hierárquico que consiste no desmantelamento do sistema físico, anotando as ligações

² O ficheiro Gerber é um formato padrão vetorial ASCII aberto, usado pelo *software* de projeto eletrónico (EDA – *Electronic Design Automation*) ou de projeto assistido por computador (CAD – *Computer-Aided Design*) que descreve a imagem do PCB e gera os dados do seu fabrico (camadas de cobre, máscara de solda, legenda, furação, entre outros).

entre os vários sistemas, ou seja, um processo de EI de sistema é definido como a desmontagem e remontagem do dispositivo, tendo o cuidado de documentar, testar, analisar e relatar o estudo da sua função, sendo que incide apenas sobre o projeto mecânico e a fabricação do sistema e inclui os seguintes passos, (Younis & Tutunji, 2012):

(a) Pré-triagem: este passo inicial da EI consiste em escolher um produto candidato e é usualmente impulsionado pelas necessidades de mercado.

(b) Observação: uma vez adquiridas as amostras do produto, é feito um estudo da funcionalidade e das suas especificações. Inclui a pesquisa bibliográfica para adquirir informações sobre o produto em teste, que depois de recolhida é resumida e analisada. O produto é testado e os seus parâmetros funcionais são registados em laboratório.

(c) Desmontagem: é uma etapa crítica e demorada e deve ser realizada com cuidado extremo e bem documentada. Um produto de amostra é desmontado e outro deve ser deixado intacto e usado para comparação posterior. Todas as peças e suas funcionalidades devem ser identificadas. Devem ser gerados documentos como modelos funcionais e lista de materiais (BOM- *Bill Of Materials*).

(d) Análise: consiste na análise do que cada submontagem e componente faz e como os componentes estão ligados entre si. É essencial para entender o projeto do produto e inclui o desenho de diagramas de blocos, esquemas de circuitos e desenho mecânico. Também pode envolver modelação e simulação.

Engenharia inversa mecânica

Compreender e analisar a mecânica de um produto pode ser dividido em construção e desenho, estática e dinâmica, cinemática e estudo do material (propriedades e uso), (Younis & Tutunji, 2012). A EI é normalmente conduzida para uma prototipagem rápida, que pode ser definida como um modelo que representa um produto ou um sistema. A prototipagem rápida produz protótipos físicos em pouco tempo, e as peças resultantes são muitas vezes feitas de plástico. As etapas da prototipagem rápida em engenharia inversa mecânica incluem a captura de dados e digitalização, reconstrução de um modelo de software (SW) e criação de um modelo através de fabrico assistido por computador (CAM – *Computer-Aided Manufacturing*). O modelo é analisado quanto à robustez e desempenho da sua montagem e dos seus componentes, usando ferramentas de engenharia assistida por computador (CAE – *Computer-Aided Engineering*).

Engenharia inversa eletrónica

Segundo Torrance & James (2007), a EI de produtos eletrónicos pode ser conduzida de diversas formas:

- Desmontagem do produto: identifica o produto, invólucro, placas internas e componentes. A desmontagem do produto consiste no seu dismantelamento e na inventariação e fotografia dos seus componentes e subconjuntos, e na documentação das ligações entre eles. Um diagrama de blocos (Figura 9) é inicialmente construído e depois o dispositivo é então desmontado. Os dados são usados para fornecer uma lista de materiais e estimativa de custo para o fabrico.

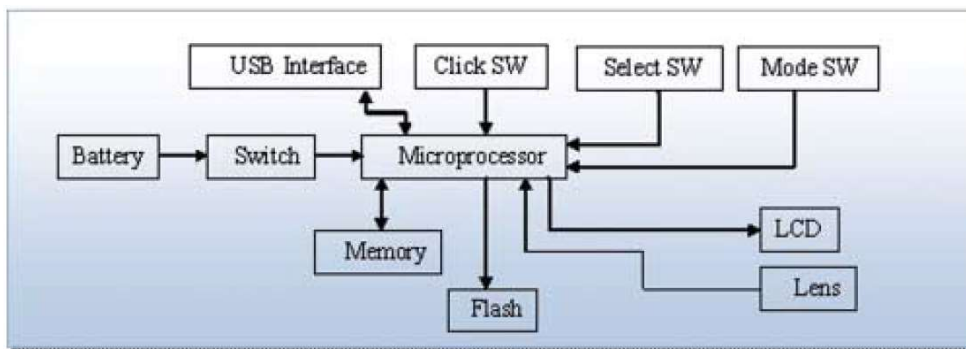


Figura 9 – Exemplo de um diagrama de blocos de uma *webcam* (Younis & Tutunji, 2012).

- Análise ao nível do sistema: analisa operações, funções, tempo, sinais e interligações. É feita uma análise funcional, uma vez que os componentes são deixados intactos e as ligações entre os subsistemas se mantêm, de forma a permitir o seu funcionamento. Faz-se a monitorização do sistema durante a operação funcional, através de equipamentos de laboratório como: multímetros, osciloscópios, geradores de sinal ou analisadores lógicos, por exemplo. As pontas de prova são colocadas nos principais barramentos, pinos dos circuitos integrados (CI) e conectores e opera-se o sistema. Os sinais são então analisados e os resultados recolhidos, para entender a operação e definir o caminho do sinal (Torrance & James, 2009). No final desta análise pode obter-se a estrutura funcional do dispositivo (Figura 1Figura 10):

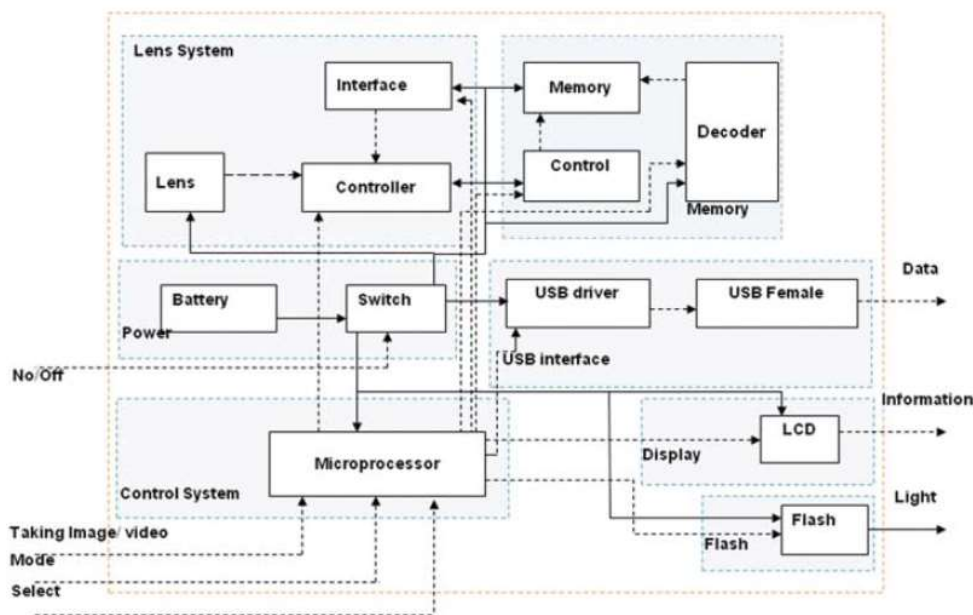


Figura 10 – Exemplo da estrutura funcional de uma *webcam* (Younis & Tutunji, 2012).

- Análise do processo: examina a estrutura e materiais para saber como é fabricado e de que é feito. Existem há algum tempo ferramentas micro analíticas que facilitam a análise do processo. São utilizadas nas fábricas para controlo do processo e análise de falhas, usando falhas equivalentes ao nível de laboratório (Torrance & James, 2009). Salientam-se os desafios na análise de processo de semicondutores, devido à diminuição das suas dimensões, segundo a lei de Moore, na ordem de 45 nm e inferior; e uma maior integração de processos de sinais mistos (com RF – Rádio Frequência) e memória incorporada em processos lógicos CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*). Na escala nanométrica (onde os óxidos da *gate* têm atualmente 1,2 nm - 1,5 nm de espessura) as capacidades analíticas são levadas aos limites, onde apenas podem ser visualizados com microscópios eletrónicos de alta resolução, ou obtendo detalhes da composição química da estrutura e entrando na contagem de átomos (Torrance & James, 2009).

- Extração de circuito: decompõe até ao nível do transístor, para obter as ligações e componentes e depois criar esquemas e *netlists*. Basicamente, o processo de extração do circuito apresenta as seguintes etapas: remoção de invólucro (*package*), separação das camadas do dispositivo, aquisição de imagens, anotação, verificação e criação do esquemático, análise do esquemático e organização.

A extração de circuitos de CI semicondutores é cada vez mais difícil, pois há 10 - 20 anos um CI típico teria uma camada de metal e tecnologia de 1 μm - 2 μm . Após a remoção do invólucro, geralmente todas as características poderiam ser observadas a partir da vista planar de metal de nível superior. A matriz seria colocada sob um equipamento de imagem ótica para obter várias imagens de alta ampliação e as fotografias seriam reveladas e gravadas numa outra matriz para recriar uma imagem do CI. Seriam anotados fios e transístores, para depois desenhar o esquemático, primeiro em papel, depois em desenho assistido por computador. Hoje em dia, aumentou a complexidade dos dispositivos e diminuíram as suas dimensões, conforme já referido, sendo necessário extrair atualmente CI de 45 nm e dispositivos de até 12 camadas de metal, por exemplo, e que usam uma combinação de materiais para criar tanto os condutores como os dielétricos. Podem apresentar agora centenas de milhões de portas lógicas, além de enormes áreas analógicas, RF, memória e outras macrocélulas (Torrance & James, 2009).

Engenharia inversa de *software*

Os sistemas de *software* também podem ser analisados usando a EI, e através da sua decomposição adquirir o código fonte, independentemente da linguagem de programação, que foi usada para criá-los, e converter o código de máquina numa forma humanamente legível. Assim, a primeira tarefa é muitas vezes a extração do código embebido na memória de um CI. Estão disponíveis algumas técnicas, como os programadores de EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*), monitorização do barramento durante o *upload* e a extração do código. Estes sistemas podem apresentar uma proteção do código com bloqueios de *software* ou *hardware*, que podem ser desativados e permitir o acesso ao seu conteúdo através da porta de teste de um CI por exemplo, ou através da microcirurgia para modificar ou ignorar bloqueios de *hardware*. Para utilizar tais técnicas é necessário analisar primeiro os circuitos para identificar os bloqueios e encontrar forma de os desabilitar (Torrance & James, 2007).

O código encriptado requer a análise da sua criptografia, seguida da descriptação, o que requer tanto as chaves, como uma compreensão do algoritmo de criptografia. Por vezes as chaves podem ser lidas da memória embebida, junto com o código e o algoritmo da criptografia pode ser descoberto por meio de documentação ou análise funcional. Após esta etapa, o código pode ser estruturado e analisado por especialistas em *software* em modo

estático (“morto”) ou modo dinâmico (“ao vivo”). A análise ao vivo é realizada, quando é possível, para obter o controlo total do processador, iniciando e parando o código e inspecionando a memória. Esta análise é sempre preferível à do código morto que consiste em analisar apenas as instruções sem a capacidade de inspecionar o código durante a execução. Outro modo de realizar EI aos sistemas de *software* é o uso de simuladores de *software*, que está entre esses dois modos (Torrance & James, 2009).

3.1.2. Engenharia Inversa de PCB

A EI aplicada a PCB tem como base a aquisição de um conjunto de dados e informação, para depois modificar essa base e obter uma PCB moderna e de construção mais económica. Este processo é influenciado por fatores económicos, complexidade técnica e quantidade de informação existente. Os componentes preferenciais para este processo são os de maior utilização e alto custo por unidade, mas de complexidade técnica relativamente baixa (Armistead, 2022).

As PCB são fotografadas, e todos os componentes são catalogados e removidos seletivamente. As ligações entre todos os componentes são identificadas e inseridas no esquema da placa. Armistead (2022) sugere que sejam obtidas pelo menos duas amostras, procedendo-se depois à remoção e registo de todos os componentes. Estes devem ser todos identificados e obtidas as especificações de cada um. Esta etapa pode conduzir à inutilização de uma placa de amostra, mantendo-se a outra intacta e utilizável – placa de referência. A identificação de todos os componentes gera a informação necessária para a criação da lista de materiais (BOM) e também mais tarde para a pesquisa de *footprints* necessárias para a produção de ficheiros Gerber.

As PCB são usualmente constituídas por várias camadas finas de cobre (condutoras) que são “entremeadas” com camadas isolantes (não condutoras), constituindo o transportador físico e os caminhos elétricos para os componentes. Tanto podem ser usadas técnicas não destrutivas como técnicas destrutivas no acesso à informação dessas camadas no seu processo de EI: acesso a camadas de cobre, analisar o *layout* e as ligações entre os componentes.

Das técnicas destrutivas destaca-se a necessidade de retirar a máscara de solda que permite o acesso às áreas de cobre utilizando-se: lixa (Figura 11), escova de fibra de vidro, jato abrasivo de areia, processos químicos ou laser (Grand, 2014).

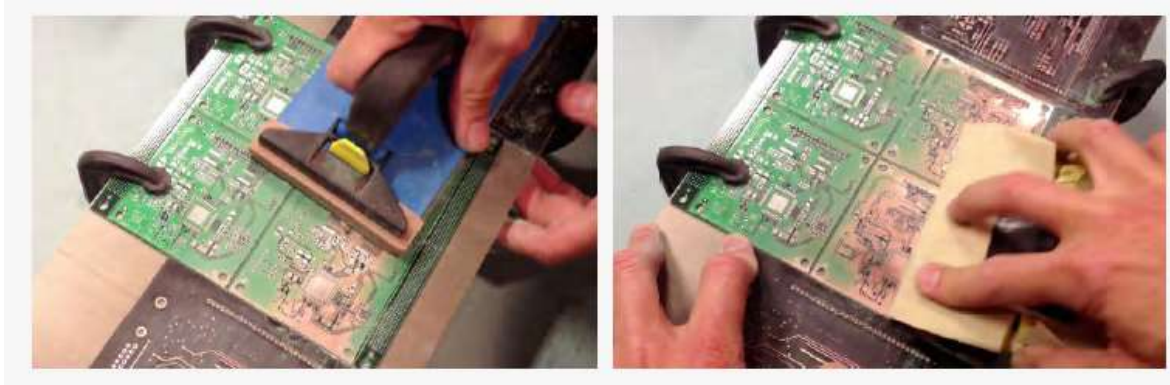


Figura 11 - Utilização de lixa para retirar a máscara de solda de uma PCB, (Grand, 2014).

Quanto às técnicas não destrutivas destacam-se o uso de raio-x e de tomografia computadorizada (3D). Atualmente, a EI de PCB pode ser realizada usando sistemas dedicados que utilizam captura de imagem para gerar automaticamente o esquemático do circuito, tradução de decomposição de elementos e, finalmente, a geração de código de linguagem de descrição de hardware (HDL – *Hardware Description Language*), (Younis & Tutunji, 2012).

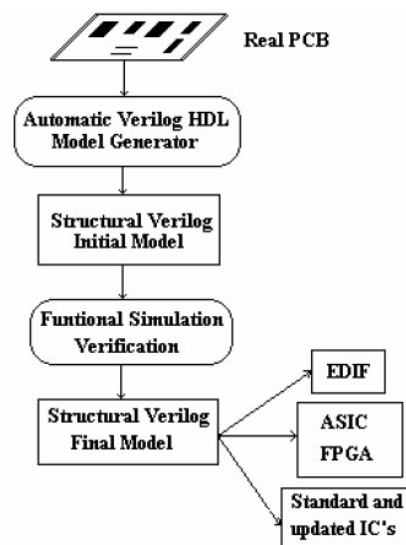


Figura 12 – Metodologia de conversão de uma PCB utilizando Gerador Automático de Modelos Verilog HDL (AVMG), (Koutsougeras, Bourbakis, & Gallardo, 2002).

Koutsougeras, Bourbakis, & Gallardo (2002) descrevem no seu trabalho o uso de processamento de imagens, para obter uma funcionalidade do sistema de descrição e converter esta descrição para Verilog XL como parte da conversão de *hardware* para novas

tecnologias. A metodologia de conversão é baseada no Gerador Automático de Modelos Verilog HDL (AVMG - *Automatic Verilog HDL Model Generator*), mostrado na Figura 12.

O AVMG inclui tarefas EI para extrair informações de um PCB com um mínimo de intervenção. É gerada uma estrutura de descrição do sistema em Código Verilog HDL. Essa estrutura de descrição requer testes que verificarão que características originais não foram modificadas e se o novo sistema realmente executa cada uma das suas tarefas originais. Geralmente são necessários ajustes e depois o projeto da nova tecnologia é convertido em um modelo físico. A descrição serve de exemplo caso a PCB tenha apenas uma ou duas camadas, mas no caso de ser multicamadas existe a necessidade de obter adicionalmente imagens de raios-X e processá-los em coordenação com imagens óticas. Para descobrir o espaço e relações de caminhos de fio que se teria, sendo necessário ter imagens de pelo menos duas posições (de modo a obter perspectiva espacial).

Após a identificação de todas as conexões elétricas entre os componentes da placa (lista de nós, lista de rede ou *netlist*) é construído o esquemático. Se necessário procede-se à digitalização das camadas externas da PCB e depois das internas, se existiram. O esquemático é produzido no *software* de projeto assistido por computador, incluindo a edição de imagens e *footprints* de componentes que não estão nas bibliotecas da aplicação. As conexões esquemáticas da PCB devem ser verificadas. Os dados obtidos e os ficheiros Gerber gerados para a PCB são normalmente enviados para um fabricante externo, que instala na PCB os componentes indicados na BOM (Mat, Yusof, Daud, Zulkifli, & Ahmad, 2006). Após a fabricação da PCB, esta é sujeita a análise dos circuitos e testes de validação.

No final do projeto de EI de uma PCB deve-se ter obtido:

- Os esquemáticos completos, incluindo *netlists*, reconhecíveis à maioria dos engenheiros eletrotécnicos;
- A lista completa de materiais, incluindo a ficha de especificações (*datasheet*) individual de cada componente;
- Os ficheiros Gerber completos para produção da PCB;
- Um protótipo de PCB montado com componentes para teste e avaliação.

As etapas anteriores abrangem a maior parte dos requisitos de EI de PCB embora possa ser feita de várias maneiras e a maioria das organizações que a executa não revelam as etapas na produção da nova PCB (Armistead, 2022).

3.2. Tecnologia ferroviária

O transporte ferroviário ocupa uma posição cimeira no sistema de mobilidade. Ao ser feita uma análise comparativa destes meios, disponíveis ao serviço da população, conclui-se que o transporte ferroviário é considerado um dos mais eficientes em termos de custos para a transferência em massa de mercadorias e passageiros em longas distâncias. As vantagens do transporte ferroviário sobre outros tipos de transporte são a eficiência de custos, eficiência de recursos, preferência ambiental (em termos de ruído e poluição) e segurança no trânsito (Popova, et al., 2021).

A tecnologia ferroviária tem uma história que remonta ao século XIX e se iniciou numa forma desenvolvida de transporte de passageiros sobre carris, entre Liverpool e Manchester (Reino Unido). O princípio da tecnologia ferroviária mantém-se o mesmo atualmente, constituído por uma combinação do baixo atrito de rodas de aço interligadas por um eixo maciço, rolando sobre carris paralelos de aço. Embora a implementação tenha mudado, e de forma mais acentuada nos últimos 50 anos, de tal forma que, as máquinas a vapor deixaram de realizar a locomoção dos comboios, para dar lugar às locomotivas de combustível (gasolina e gasóleo), posteriormente, por volta dos anos 50, locomotivas elétricas, e o aparecimento de automotoras diesel e elétricas nos anos 60, ainda assim noutra vertente, a manutenção das vias deixou de ser um trabalho intensivo e a sinalização foi revolucionada (Smith, 2001).

Na Tabela 2 visualizam-se dados com cerca de 50 anos de intervalo (entre 1950 e os finais do século XX) e na sua coluna final o ratio de produtividade destes dois momentos. A produtividade do sistema depende da soma dos passageiros/km e do frete/km (transporte de carga) pelo comprimento da via ferroviária (km). Pode observar-se que o ratio é superior à unidade (com exceção da Argentina) indicando uma maior produtividade, sendo que alguns sistemas tiveram um aumento considerável, como a China e o Brasil (este foi resultado dos fretes ferroviários na mineração de Mato Grosso), (Smith, 2001).

Tabela 2 – Comparação entre valores de 1950 (linhas inferiores) e de 1998 (linhas superiores) nos maiores caminhos de ferros (Smith, 2001).

	Route-km	Freight (million tone-km)	Passengers (million passenger-km)	Productivity	Ratio 1998/1950
Canada	69,167	149,000	4,532	2.22	
	69,677	304,233	1,341	4.39	1.98
Mexico	23,332	9,391	3,025	0.53	
	26,613	41,957	1,799	1.64	3.09
USA	360,137	864,000	51,161	2.54	
	170,200	1,979,835	19,449	11.75	4.62
Argentina	42,864	17,309	13,229	0.71	
	34,059	7,659	10,642	0.54	0.75
Brazil	36,681	8,066	10,267	0.50	
	26,962	428,873	1,539	15.96	31.94
France	41,300	38,900	26,400	1.58	
	31,939	48,136	55,311	3.24	2.05
Germany	49,819	58,200	48,840	2.15	
	40,826	68,490	60,514	3.16	1.47
Italy	21,550	10,400	23,578	1.58	
	16,003	21,720	49,700	4.46	2.83
UK	31,336	36,200	32,472	2.19	
	16,536	12,292	28,656	2.48	1.13
Russia/USSR	116,900	602,000	88,000	5.90	
	147,500	3,362,200	384,000	25.40	4.30
S Africa	20,175	23,411	n/a	1.16	
	25,555	95,591	9,675	4.12	3.55
China	22,200	39,406	21,236	2.73	
	54,616	1,287,420	354,261	30.06	11.00
Japan	27,401	33,823	118,000	5.54	
	27,404	24,747	395,278	15.33	2.77
India	54,845	44,163	67,065	2.03	
	62,725	277,567	357,013	10.12	4.99

Upper value 1950 data from International Historical Statistics, Mitchell, BR, Europe 3rd. Ed., 1992
Africa, Asia & Oceania, 2nd Ed., 1995, The Americas, 2nd Ed., 1993.
Lower value, for various recent years, from World Bank Railway Database, 1998
Productivity defined as (million tonne-km + million passenger-km)/route-km

O desenvolvimento da ferrovia varia com as circunstâncias e com as regiões e países, mas mesmo com o aumento do tráfego automóvel e aéreo nos últimos 50 anos, o transporte ferroviário tem visto um aumento da sua produtividade e da qualidade dos seus serviços (Smith, 2001).

Em 1950 a maior parte dos sistemas ferroviários estavam a recuperar lentamente dos danos e excesso de uso causados pela II Guerra Mundial, e nesta altura as velocidades não excediam os 100km/h. Por todo o mundo foi dada atenção a estratégias de longo prazo para produzir sistemas modernos capazes de atender tanto às necessidades de tráfego no pós-guerra como às do futuro previsível, e que envolviam também a escolha de uma alternativa à tração a vapor – o gasóleo ou a eletricidade. Como exemplo, alguns planos de ação foram no sentido de melhorar as vias para serem permitidas maiores velocidades, substituir a

sinalética mecânica por sistemas automáticos de segurança e modernização das telecomunicações, ou ao nível do comboio a substituição das carruagens com incorporação de novas técnicas estruturais mais seguras e confortáveis (Smith, 2001).

O final da tração a vapor constituiu uma viragem na ferrovia, a introdução de várias unidades autoalimentadas ofereceu uma flexibilidade de operação muito maior do que uma única unidade de energia transportando uma carruagem de armazenamento de carvão tanto para operações de passageiros de maior distância como para serviços menos movimentados em ramais rurais. Os novos comboios elétricos podiam chegar aos 150km/h, mas as linhas férreas, por exemplo, no caso do Reino Unido, possuíam zonas de curvas apertadas e outras de grande inclinação.

No caso dos serviços ferroviários do Japão, o JNR (*Japanese National Railways*), propuseram-se a desenvolver uma nova tecnologia e novas normas de segurança diferentes das tradicionais, para responderem ao desafio de atingir a velocidade máxima de 250km/h, cobrindo a distância entre Tóquio e Osaka (550km) em 3 horas num comboio elétrico. Em 1964, fundaram uma rede de vias-férreas dedicadas a alta velocidade— *Shinkansen* — para ligarem regiões afastadas, e de forma a desenvolverem economicamente o país. Assim, os comboios de alta-velocidade foram surgindo por todo o mundo, desde o maglev na China (Figura 13), ao TGV (*Train à Grande Vitesse*) em França e ao ICE (*Intercity Express*) na Alemanha, e até aos últimos países que os incluíram como a Espanha, Suécia, Itália e Taiwan (Smith, 2001).



Figura 13 – Protótipo de comboio maglev projetado pela China em 2019, para atingir velocidades na ordem dos 600km/h (Xinhua photo: <https://news.cgtn.com/news/3d3d514f3163444f34457a6333566d54/index.html>)

O sistema de veículos ferroviários baseado em rodas de aço sobre vias de aço tem vindo a enfrentar algumas barreiras no desafio da alta velocidade: a adesão para transferir a força de tração das rodas para as vias sem escorregar; a estabilidade dos *bogies* em viagem em alta velocidade; a alimentação do comboio com pantógrafos. Devido à melhoria na aderência dos rodados à via, na diminuição do atrito do ar e aumento na potência de tração, a barreira de velocidade para veículos ferroviários, que estava em torno de 300 km/h, foi ultrapassada (Figura 14).

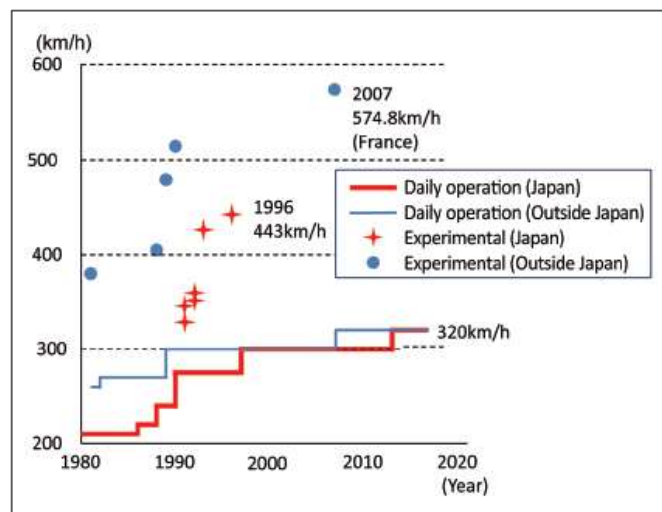


Figura 14 – Evolução da velocidade máxima do comboio desde 1980 (Koizumi, 2013).

No caso de projeto de *bogies* para operação em alta velocidade, especificamente, no estágio inicial de desenvolvimento da Linha Tokaido Shinkansen, a cinética dos *bogies* dos comboios de teste era tão violenta que as vias ficavam frequentemente deformadas. Chegaram a ser contratados ex-projetistas de aviões de combate que após a II Guerra Mundial mudaram da indústria aeronáutica para a JNR e aplicaram os resultados da análise da vibração da asa da aeronave ao exame do problema, e a cinética do *bogie* foi colocada sob controlo. Atualmente, o problema é resolvido através de ferramentas de análise, como simulação de computador para definir os parâmetros de *bogies* e instalações como bancadas de teste de *bogies*, (Koizumi, 2013).

Outra questão tem a ver com o desconforto dos passageiros quando a velocidade do comboio em curva é excessivamente alta, e a força centrífuga faz aumentar a força lateral sobre os passageiros, sendo uma aceleração lateral de $0,8 \text{ m/s}^2$ geralmente considerada o

limite superior de uma condução confortável. Por isso, as vias são inclinadas para o interior de uma curva, de modo a cancelar a força centrífuga para o exterior com a queda para o interior pela força gravitacional. Mas por vários fatores nem sempre é possível esta alteração na via e surgiu outra solução: inclinar o corpo do comboio para compensar os efeitos insuficientes da inclinação. Sendo assim, sistemas de inclinação da carroceria foram desenvolvidos e aplicados comercialmente para anular a desagradável aceleração lateral dos passageiros e permitir o aumento da velocidade (Koizumi, 2013).

No Japão, foi desenvolvido e aplicado comercialmente em 1973 um sistema de inclinação de carrocerias em que estas eram apoiadas em rolos inclinados em curvas sob força centrífuga (Figura 15), surgindo o comboio pendular.

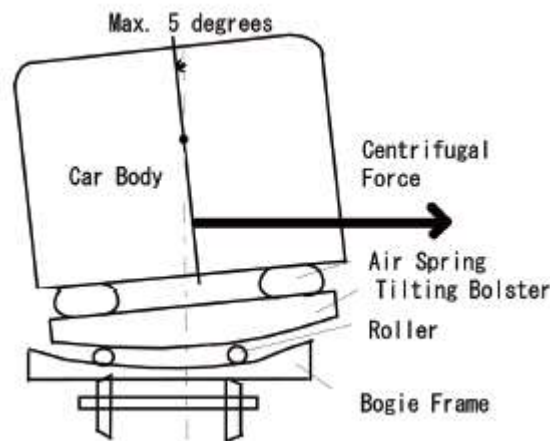


Figura 15 – Estrutura de inclinação de um comboio pendular (Koizumi, 2013).

Esse mecanismo permitia que os corpos se inclinassem em até aproximadamente 5° e os comboios passassem nas curvas em velocidades mais altas, mas, no entanto, o movimento de inclinação atrasava na entrada e na saída da curva porque só se manifestava quando a força centrífuga superava a resistência rotacional dos rolos, o que causava enjoo em muitos passageiros. Em consideração a isso, foi desenvolvido posteriormente um sistema avançado de inclinação do corpo (Figura 16), controlado com base nos dados de curva armazenados no controlador do sistema e na função de rastreamento de deslocamento, sendo o movimento de inclinação assistido pneumaticamente antes de entrar numa curva. Embora este método permitisse um aumento bastante limitado da velocidade do comboio porque o

ângulo máximo de inclinação foi definido em 2°, a sua estrutura simples foi uma vantagem significativa (Koizumi, 2013).

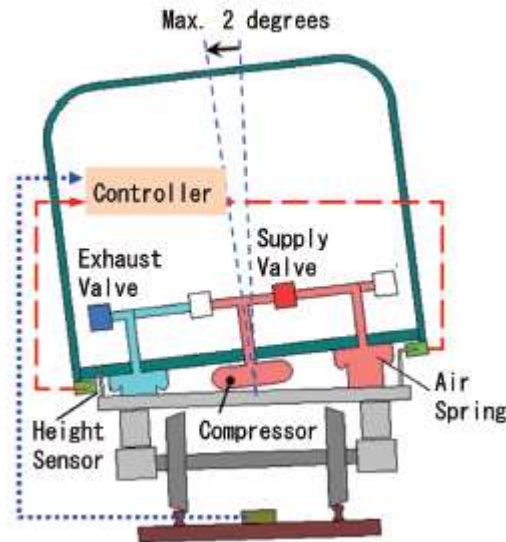


Figura 16 – Estrutura de inclinação com um sistema de mola de ar (Koizumi, 2013)

A importância da tecnologia de frenagem aumenta com o aumento da velocidade do comboio, considerando-se até que é mais fácil aumentar a velocidade de um comboio do que pará-lo. Atualmente os comboios elétricos costumam utilizar dois tipos de freio para abrandar ou parar. São eles os freios elétrico e/ou pneumático, dependendo se é para abrandar ou se é para imobilizar por completo o comboio, respetivamente. No freio elétrico, que pode ser subdividido em regenerativo ou dissipativo, fazendo uso dos próprios motores de tração, funcionando como geradores elétricos; a força de frenagem é obtida convertendo a energia cinética do comboio em energia elétrica e consumida por outros veículos ferroviários, ligados na mesma catenária, ou no mesmo ramal de subestação; ou dissipada sob a forma de calor em resistências elétricas instaladas no próprio comboio, quando não existe nenhum veículo ferroviário a circular no mesmo ramal ou subestação, onde se encontra ligado.

Por outro lado, o freio pneumático existe implementado em todos os veículos ferroviários e é aquele que assegura a maior força de frenagem até imobilizar o comboio, e pode funcionar em simultâneo com o freio elétrico regenerativo em proporções distribuídas de forma variável. A frenagem mecânica é de extrema importância nos veículos ferroviários

exercendo grande parte do esforço por ação mecânica dos calços ou pastilhas, diretamente nos rodados ou discos de freio (Koizumi, 2013).

A tecnologia de energia elétrica na indústria ferroviária refere-se aos meios de fornecimento de energia elétrica de boa qualidade para o veículo. Consiste principalmente na tecnologia de conversão em subestações, circuitos de alimentação para alimentação DC e sistemas de alimentação AC, e a estrutura, materiais, medição e manutenção elétrica das linhas aéreas. A captação de energia através da linha aérea pelo pantógrafo, foi introduzido há cerca de 100 anos, no início da história da eletricidade na ferrovia, e permanece basicamente inalterado em aparência física. No entanto, o desenvolvimento da sua tecnologia durante o século passado fez aumentar a sua capacidade atual, velocidade e segurança, sendo suficiente para integrar os comboios de alta velocidade.

A manutenção preventiva é outra área importante da tecnologia ferroviária uma vez que os veículos passam por inspeções periódicas em intervalos definidos pela distância percorrida ou intervalo de tempo. Atualmente é possível que as condições dos equipamentos dos veículos sejam monitorizadas remotamente por meio de cabos que passam pelo comboio. Além de detetar uma falha no equipamento quando ela ocorre, os sistemas de monitorização geralmente possuem uma função adicional para armazenar informações sobre o funcionamento do dispositivo em questão antes e depois da falha para posterior investigação da causa. Nos sistemas mais avançados, o funcionamento de todos os componentes de um veículo inteiro pode ser constantemente monitorizado e permitir que a inspeção e a reparação sejam realizadas quando um sintoma de falha é detetado, em vez de fazê-lo depois de ocorrer. Vários sistemas foram desenvolvidos para aplicação em *bogies*, para monitorizar a temperatura dos rolamentos, vibração, entre outros (Koizumi, 2013).

A integração de nova tecnologia nos sistemas ferroviários é um grande desafio, tendo em conta elevados padrões ou requisitos para uma maior eficiência, precisão e flexibilidade da atratividade do transporte ferroviário. Podem ser instalados sistemas eletrónicos para controlo e comando, incluindo controlo remoto, tanto na área de segurança e da sinalização como na área da informação, nos sistemas de controlo e *check-in* de passageiros (Leso, 2017). O uso de tecnologia digital moderna nos sistemas de transporte aumenta a eficiência dos processos internos com foco no cliente, custo, eficiência e segurança (Popova, et al., 2021).

A tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) tem sido usada há alguns anos em várias indústrias, e atualmente está a ser introduzidas no transporte ferroviário, constatando-se que reduz o risco de erros humanos durante o transporte de mercadorias. Um sistema RFID geralmente consiste numa etiqueta RFID anexada ao objeto de identificação (vagão ferroviário ou componentes), um leitor RFID e uma antena RFID. O leitor pode operar de forma independente, mantendo um registo das etiquetas detetadas indicando o tempo de deteção e pode controlar um relé ou uma porta digital, ou sob o controlo de um computador que faz parte da infraestrutura de controlo de informação da empresa (Figura 17).



Figura 17 – Esquema de operação da tecnologia RFID no transporte ferroviário: 1 — codificador integrado; 2 — unidade de leitura na infraestrutura; 3 — *hub* de dados; 4 — centro de processamento de dados da empresa; 5 — sensor de passagem da roda (Popova, et al., 2021).

Uma das principais tarefas da tecnologia RFID é armazenar informações sobre um objeto e permitir a leitura conveniente dessas informações, garantindo a precisão e confiabilidade das informações quando utilizadas no processo de transporte. Cada vagão tem um número próprio de inventário, incluindo algumas informações sobre ele que podem ser lidas manual ou automaticamente. Nas estações de carga, descarga ou transbordo, a leitura das informações é complicada, o que leva a uma diminuição da produtividade e da velocidade de movimentação dos vagões, levando ao aumento do tempo de entrega da carga, um dos critérios importantes do transporte de carga. Além da oportunidade de acesso rápido

às informações sobre os vagões, o sistema RFID possibilita o controlo da movimentação do material circulante ao longo de todo o trajeto, sendo possível detetar a localização dos vagões e determinar a direção do movimento do material circulante. Indiretamente resolve problemas de controlo de inventário de armazém pois são garantidos os registos atualizados e a monitorização da movimentação dos itens no armazém e redução de erros de pessoal na separação de pedidos (Popova, et al., 2021).

As principais vantagens da aplicação de RFID no transporte ferroviário incluem: não serem necessárias baterias para o funcionamento das etiquetas RFID (passivas), não haver necessidade de contato físico entre a etiqueta e o leitor, ser possível a identificação simultânea de múltiplas etiquetas e manter a funcionalidade em condições extremas (inclusive em todas as condições climáticas). As desvantagens da tecnologia RFID são o alto custo de implementação e a operação só ser possível se o sistema estiver totalmente instalado.

Foi concluído por Popova, et al. (2021) que o uso da tecnologia RFID no transporte ferroviário reduz custos causados por atrasos não programados pelo tempo de inatividade nas estações e aumenta o prestígio e a segurança do transporte ferroviário, aumentando a sua competitividade. Também otimiza os custos de transação para operações de manobra e reduz o tempo de permanência do comboio, excluindo o tempo gasto pelos operadores na logística de transporte e inventário de armazém, que agiliza o trabalho ao mesmo tempo que resolve várias questões em vários campos de atividade. Na implementação de processos operacionais, essas tecnologias garantem operações rápidas com o mínimo de tempo gasto.

As comunicações ferroviárias inteligentes têm sido estudadas e desenvolvidas, especialmente devido à expansão da alta velocidade. O setor de transporte ferroviário precisa de desenvolver arquiteturas de rede de comunicação e tecnologias-chave que possam garantir transmissões de alta qualidade para passageiros, para os sistemas de controlo e para operacionais ferroviários. Ai, Molisch, Rupp, & Zhong (2020) consideram que as tecnologias de quinta geração (5G) podem ser uma solução promissora para lidar com os desafios de projetos ferroviários que exijam alta confiabilidade e alto rendimento nas suas comunicações, para além de garantirem alta mobilidade, segurança, transparência, previsibilidade e confiabilidade.

Refere-se a arquitetura de rede para 5G-R de sistemas em nuvem, com interface aérea definida por *software* e que permitem o acesso rádio contínuo. No entanto, os requisitos da

arquitetura de rede para ferrovias são diferentes das da rede de comunicação móvel pública em muitos aspectos, sendo que a arquitetura de rede para a ferrovia deve ser uma rede de transmissão de comunicação dedicada. Uma rede que se liga ao centro de operações em todos os níveis, garantindo que todos os elementos interajam uns com os outros por meio de diferentes modos de informação, como chamadas de voz entre maquinista e centro de expedição, dados de controle de operação do comboio, e dados de monitorização de vídeo para infraestrutura ferroviária inteligente. Além disso, a rede de comunicação ferroviária tem de estabelecer um sistema de comando de emergência integrado e confiável que forneça informações em tempo real e permita a tomada de decisão em emergências (por exemplo, desastres naturais ou acidentes de trânsito).

4. Projeto de Engenharia Inversa

O período de estágio apresentou uma parte teórica de acolhimento inicial e de formação contínua relativa à ferrovia, da qual se apresentam, de seguida, alguns breves aspetos. Abrangeu, ainda, trabalho de investigação e estudo teórico de técnicas e metodologia de EI, que se resumiram no capítulo do Estado da Arte.

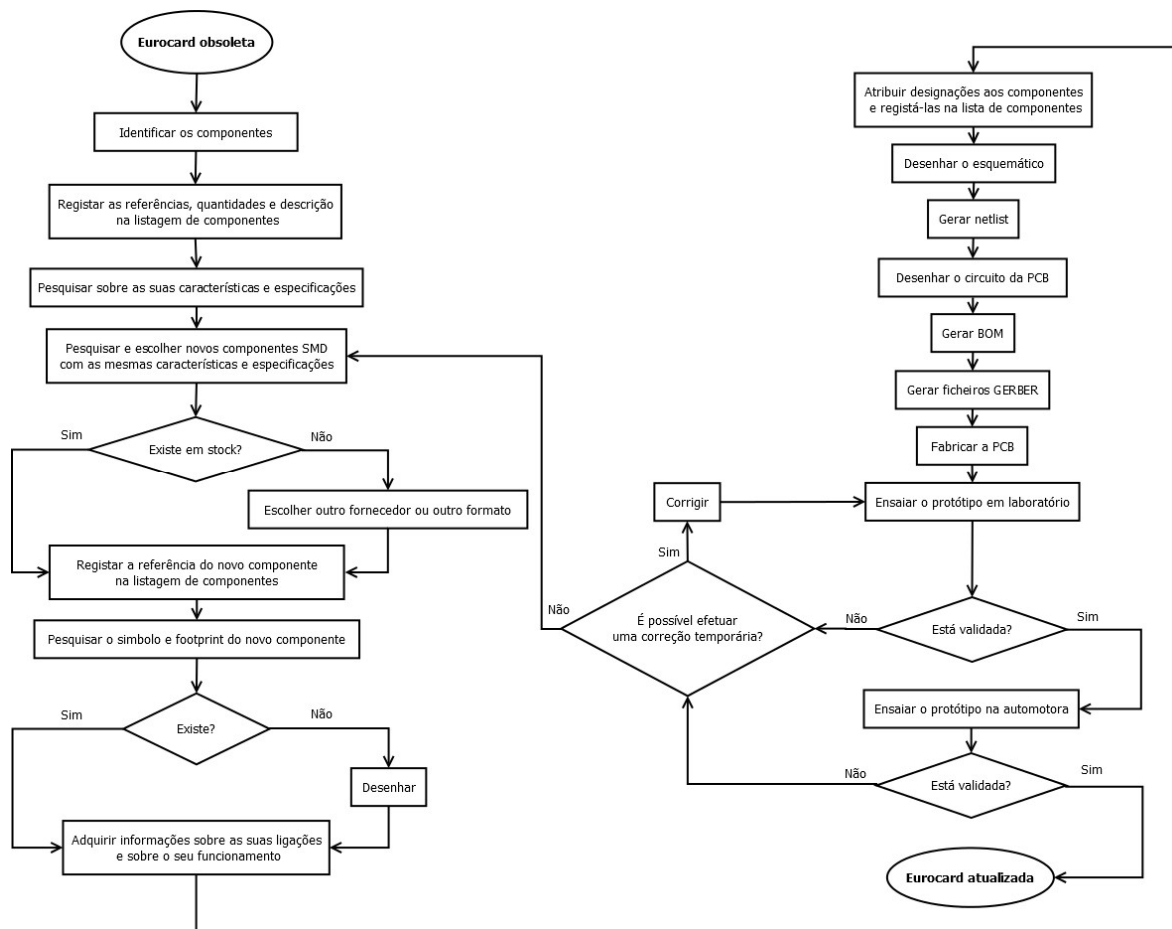


Figura 18 – Fluxograma da parte prática do projeto (elaboração própria).

A parte prática deste estágio consistiu na aplicação dos conhecimentos adquiridos durante o estudo teórico para proceder à atualização dos componentes da PCB e dos seus circuitos através do projeto assistido por computador. Foi obtida informação que permitiu a fabricação da PCB, e após a sua receção foram efetuados testes do *layout* desenvolvido, e formuladas alterações para correção de problemas encontrados, e registados aspetos para

melhorar, no futuro, o processo de EI dos projetos subsequentes. O fluxo da parte prática do projeto foi desenvolvido conforme a Figura 18.

4.1. Objeto de estudo e descrição do problema

O presente trabalho veio da necessidade de substituição e atualização das cartas eletrónicas do tipo *eurocard* que compõe a UCC da automotora elétrica 2300/2400 UQE – Linha de Sintra, conforme referido no capítulo 1. A principal motivação deste projeto prendeu-se com a degradação das PCB e a obsolescência dos seus componentes e pressupôs o desenvolvimento de um estudo sobre a EI para aplicar as técnicas estudadas e executar um novo projeto de PCB assistido por computador.

4.1.1. Material circulante

O material circulante é todo um conjunto de veículos ferroviários que se locomovem sobre a via permanente, incluindo material de tração e material rebocado, como locomotivas e vagões. O comboio é um conjunto de veículos ferroviários acoplados em série. Os veículos de passageiros podem ser do tipo carruagens ou automotoras elétricas, unidades simples ou múltiplas (conjunto de unidades motoras comandadas de uma única cabine de condução), (RailSystem, 2021).

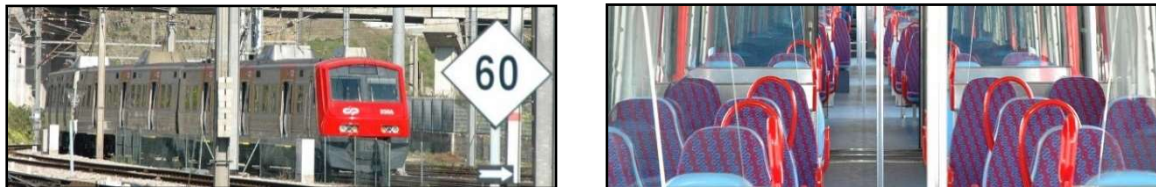


Figura 19 – Automotoras da série UQE 2300/2400: automotora da série 2300 a operar na Linha de Sintra (à esquerda) e interior da automotora 2400 (à direita), (<https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante>).

O presente trabalho incidiu sobre a automotora da série UQE 2300/2400 (Figura 19) que se trata de uma unidade quádrupla elétrica (composta por quatro veículos permanentemente acoplados) e que opera na Linha de Sintra (Comboios Urbanos de Lisboa). Segundo CP E.P.E. (2022), ambas as séries entraram ao serviço durante a década de 90, a série 2301-2342 e 2351-2392 em 1992 e a série 2401-2414 e 2451-2664 em 1997. Não há diferenças entre elas senão em alguns e poucos equipamentos eletrónicos embebidos, e porque as 2300, a série que chegou primeiro, não trazia ar condicionado de origem. Como

foi implementado posteriormente às 2400, as 2300, tal como se observa na Figura 19, têm os equipamentos de ar condicionado no tejadilho relativamente mais altos que nas UQE 2400, estas últimas compradas pouco depois, já trouxeram ar condicionado. de origem e, portanto, o equipamento é mais compacto e mais baixo no tejadilho.

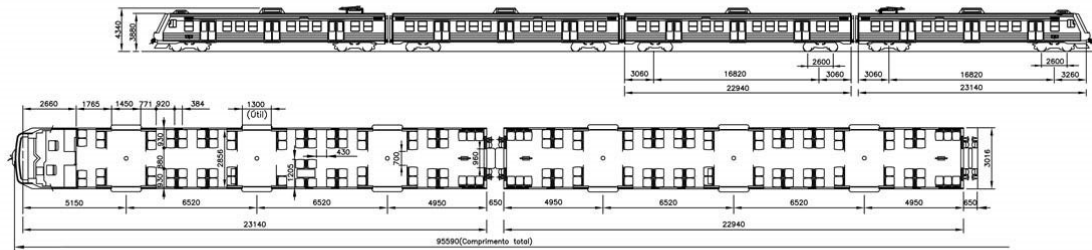


Figura 20 – Desenho cotado da automotora UQE 2300/2400: vista lateral de exterior e vista superior do interior de meia UQE (sendo estas exatamente simétricas, mas inseparáveis a nível de funcionamento na via), (<https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante>).

Existem 42 unidades operacionais da primeira e 14 da segunda série, sendo que ambas têm uma potência de 3100kW, atingem uma velocidade máxima de 120 km/h e possuem transmissão elétrica de motores trifásicos assíncronos de tensão de 1600V e potência de 393kW. As partes mecânicas foram construídas pela Sorefame - Sociedades Reunidas de Fabricações Metálicas, S.A.R.L., o equipamento elétrico de tração e a transmissão pela Siemens AG, e o freio pela Knorr-Bremse GmbH (Trainlogistic, 2022). As suas dimensões estão expressas na Figura 20.

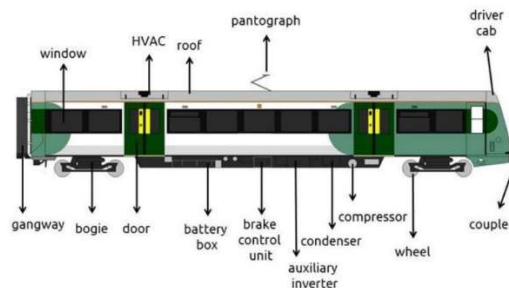


Figura 21 – Veículo ferroviário e os seus principais componentes (<https://www.tusamteknik.com/rayli-sistemler>).

O comboio é alimentado via catenária com uma tensão de 25kV a 50Hz através do pantógrafo, e destacam-se alguns dos muitos componentes do material circulante (Figura 21), de acordo com RailSystem (2021):

- Carroçaria, acessórios de encaixe no veículo e acopladores (frontal, intermediário, e de reboque);
- Equipamentos de movimento e orientação: *bogie*³ (Figura 22), rodados, eixos, suspensão e motores de tração (no caso de veículos motorizados);

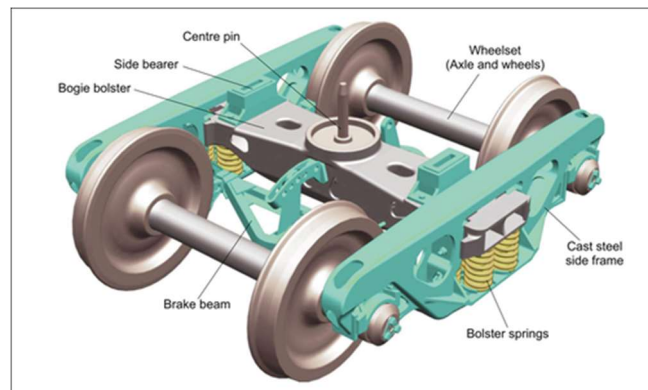


Figura 22 – Exemplo de *bogie* americano padrão de 3 peças usado em vagões de carga (<http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/bogies.html>).

- Sistema de inclinação: unidade de controlo de inclinação, sistema de atuação, sistema de inclinação do pantógrafo, monitorização e deteção de inclinação;
- Sistema de energia e sistema de propulsão, que se encontram simplificados na Figura 23, que mostra o diagrama de uma locomotiva elétrica CA (corrente alternada), recebendo energia de uma linha aérea. As linhas vermelhas no diagrama indicam o circuito CA monofásico, as linhas verdes os circuitos CC (corrente contínua) e as linhas roxas os circuitos CA trifásicos. Uma locomotiva que usa corrente de tração CC é semelhante à apresentada, só com a diferença de não ter circuito ou transformador CA monofásico. Assim, a corrente passa diretamente do pantógrafo (ou sapata) para os inversores principais e auxiliares.

³ *Bogie* é uma estrutura mecânica constituída por 2 ou 3 eixos e por um sistema de amortecimento que liga a caixa ao carril (Infraestruturas de Portugal, 2022).

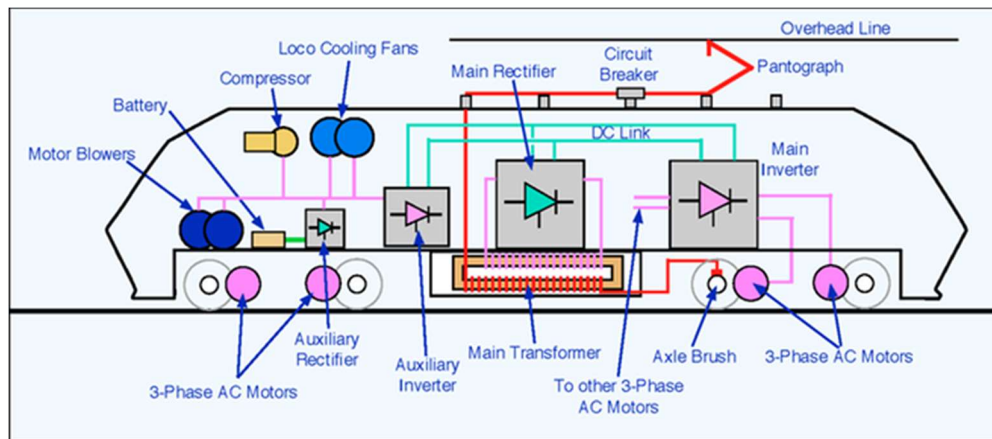


Figura 23 – Diagrama da locomotiva elétrica CA (<http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/electric-locomotives/>).

- Sistema de frenagem: sistema de controlo de freio pneumático, equipamento de freio de cepo sintetizado ou de disco ventilado, equipamento de freio de regenerativo ou elétrico, equipamento de freio de emergência;
- Controlo de bordo do veículo: sistema de controlo eletrónico de comboios, sistema de gestão de controlo de comboios, unidade de proteção automática, unidade de operação automática de comboio, registador de dados de falha, gravador de voz, vídeo-vigilância, espelho retrovisor eletrónico;
- Sistema de comunicação e de informação de passageiros: sistema de comunicação de voz a bordo, alarme de segurança e/ou emergência, sistema central de informação de passageiros, interface motorista-máquina para informações de comboio/viagem, equipamento de carris;
- Conforto de passageiros: aquecimento, sistema de ar condicionado, sistemas de distribuição e ventilação de ar;
- Iluminação: sistema de iluminação de emergência, sistema de iluminação exterior, sistema de iluminação interior;
- Sistemas auxiliares: sistema de alimentação elétrica auxiliar, equipamento de bateria, sistema de abastecimento de águas limpas externo, unidade de arrefecimento para os sistemas de energia e acionamento, sistema de proteção contra incêndio, areeiro (equipamento de proteção contra patinagem da roda), buzina, dispositivo de lubrificação de verdugos, entre outros;

- Interiores: decoração interior e painéis de eletricidade, sistema de wc, compartimento de máquinas, sistema de alimentação de tomadas AC para uso dos passageiros;
- Sistema de porta: portas de acesso exterior, portas de intercomunicação;
- Cabos e armários.

4.1.2. Unidade de Controlo Central

Nas automotoras da série UQE 2300/2400 (linha de Sintra) o sistema de controlo principal e de uso geral é composto por um *hardware* computacional baseado no microprocessador de 16 bits, SIBAS-16, constituído por diversas cartas eletrónicas, com diferentes funções analógicas e digitais nas entradas e saídas. Todos sinais são processados por meio de processadores intel x86 de 16bit, daí o equipamento se designar de SIBAS16. Foi implementado pela empresa Siemens, desenvolvido em 1983, e mais de 9000 sistemas foram aplicados e ainda funcionam atualmente. O SIBAS 16 é um sistema modular para uso embestado e foi desenvolvido inicialmente para a indústria aeroespacial ao serviço da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), aeronáutica militar (EUA – Estados Unidos da América) e posteriormente adaptada à indústria ferroviária, como solução de última tecnologia.

Consiste no bloco de controlo e monitorização da tração (funções principais de tração e frenagem), controlo e monitorização da automotora ou composição de até 3 automotoras elétricas em série (comboio) perfazendo uma composição maior, analisando e calculando inúmeras variáveis dos diversos equipamentos de tração e frenagem ao longo de todo o comboio: autodiagnóstico, local (UQE) e central do próprio equipamento, bem como dos demais equipamentos ligados no *bus* de dados (AEAMESP, 2021).

Este avançado equipamento foi introduzido no meio ferroviário em 1993 (UQE2300/2400) e depois de confirmado o enorme sucesso, esta arquitetura teve continuidade até aos dias de hoje, sendo atualizada em meados dos anos 90 para processadores de 32 bit (SIBAS32), (Alfa-Pendular) e mais recentemente para 64 bit (SIBAS64).



Figura 24 – *Racks* da Unidade de Controlo Central (UCC, à esquerda) e da Unidade de Controlo de Tração (UCT, à direita) retiradas da UQE 2300/2400 para manutenção (foto nas instalações da CP).

A UCC, sobre a qual incide este projeto, e a UCT fazem parte do hardware deste bloco de controlo da tração, pertencente a meia UQE. Estão ligadas em rede e comunicam entre si e com todo o comboio, numa rede de dados protegida por um protocolo diferente do industrial, designado de MVBUS (*Multifunction Vehicle Bus*).

Estas unidades são constituídas por diversas *eurocard*, que são placas de circuito impresso com um formato padrão europeu e que podem ser conectadas numa caixa igualmente padronizada – *rack* (Figura 24). Por serem padronizadas, são intercambiáveis, sem necessidade de alterar, atualizar ou substituir significativamente o sistema de montagem geral para acomodar o novo *hardware*. As montagens no *rack* compreendem um número de guias, *slots*, com fenda na parte superior e inferior dos painéis internos, onde as *eurocards* deslizam para entrar e são mantidas com fiabilidade e segurança na posição horizontal fixas nas extremidades por fichas ou tampas de plástico ou metal. As ligações no painel traseiro do *rack* encaixam em conectores (fichas) correspondentes nas PCB à medida que cada uma é inserida, e permitem que o sinal de saída da PCB flua pela rede conforme é necessário (RS Components Ltd., 2022).

Os conectores DIN 41612 (também padronizado com a IEC 60603.2), são o padrão mais comum para uso com *eurocards*, e são amplamente utilizados em sistemas elétricos baseados em *rack*. Estão disponíveis em vários formatos diferentes, conforme o número diferente de contactos, o suporte de cabo, a forma de montagem no painel, ou os pinos de encaixe. O desempenho padrão desses conectores é uma capacidade de carga de corrente de

2A por pino e uma tensão de trabalho de 500V, mas estes valores variam caso a caso, conforme as especificidades da sua aplicação, a relação dos requisitos de *hardware*, a segurança operacional e as condições ambientais. No mercado existem muitas variações, incluindo, por exemplo, vários tipos de construções diferentes quer de metal quer de plástico; disponibilidade de versões de conectores angulares e retos; existência de conexões macho e fêmea e com várias configurações de montagem diferentes disponíveis para os próprios conectores.

4.2. Análise do sistema e identificação de componentes

As PCB sujeitas a EI, no projeto de atualização da UCC, são do tipo *eurocard* de tamanho padronizado, ou seja, 100 mm por 160 mm (com uma espessura de 1,6 mm) – *Eurocard* 3U⁴. Este trabalho em particular incidiu sobre a *eurocard* 6FH8163, que a seguir se descreve.



Figura 25 – *Eurocard* 6FH8163 inserida no *rack* da UCC de uma UQE 2300/2400 (foto nas instalações da CP).

A *eurocard* 6FH8163 está inserida na posição G019 na UCC (Figura 25) e corresponde ao módulo de acoplamento com o *bus* do comboio RS 485, possuindo para isso

⁴ O “U” refere-se a 'unidades', em que 1U corresponde a 44,45 mm de altura, que equivale à altura de uma unidade de rack de 19 polegadas. Assim sendo, uma sub-rack de 3U tem 133,35 mm (5,25”) de altura e, portanto, acomoda um eurocard de 3U de 100 mm de altura (RS Components Ltd., 2022).

duas interfaces (fichas SUB-MIND de 9 pinos: X2 e X3) na placa frontal (Figura 26). A ficha X2 destina-se à ligação do *bus* do comboio no sentido R1 (pinos 1 e 5) e a ficha X3 à ligação no sentido R2 (pinos 6 e 9). R1 e R2 são linhas de entrada e de saída correspondente às ligações de comunicação da composição da frente e/ou composição de trás, quando a automotora está em múltipla. A atribuição de sinais diferentes aos pinos evita ligações erradas durante eventuais trocas inadvertidas das fichas.

A *eurocard* 6FH8163 faz a ligação ao restante sistema da UCC, no painel traseiro da *rack*, através de um conector DIN 41612 macho, de 64 pinos encastrável e codificável (ficha X1). É alimentada por uma fonte de alimentação de 5V e 1100mA.

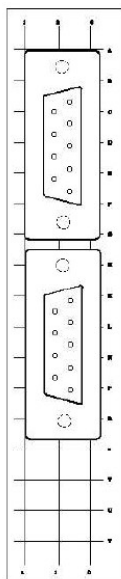


Figura 26 – Placa frontal da *eurocard* 6FH8163, com fichas de ligação do *bus* do comboio – direção R1 (cima) e direção R2 (baixo), (documentação interna da CP).

A *eurocard* 6FH8163 (Figura 27) é constituída essencialmente por conversores de tensão DC-DC (de 5V para 60V e de 5V para 15V), relés transformadores de impedância, bobinas e condensadores de filtragem, e díodos de proteção. Os conversores de tensão fornecem a tensão simétrica de 60V (uma saída de 80mA e outra de 30mA) e de 15V e 50mA (alimentação). A tensão de alimentação de 15V destina-se aos comparadores que vigiam a tensão do *bus* do comboio. Os relés permitem isolar o *bus* do comboio, a fim de se lhe aplicar a tensão de 60V e integrar no circuito as resistências de término, o que ocorre durante o processo de inicialização (“atribuições/configuração” do *bus* do comboio). Os

transformadores destinam-se ao isolamento galvânico dos circuitos eletrônicos do *bus* do comboio, e as bobinas desempenham o papel de supressoras de interferências – filtragem.



Figura 27 – Eurocard 6FH8163 (propriedade da CP).

Embora na pesquisa efetuada, sobre processos de EI, refiram o desmantelamento do sistema para extração do circuito e identificação dos componentes, não foi necessário aplicar tal etapa a esta PCB. O esquemático do circuito consta do arquivo interno da CP, tendo sido facultado, e para identificação dos componentes foi suficiente o uso de multímetro, paquímetro e lupa.

Foi efetuada uma listagem dos componentes identificados e pesquisadas as suas especificações, essencialmente na internet, mas também em *datasheets*. Devido ao efeito da obsolescência (salienta-se o caso dos conversores) algumas especificações/componentes já não se encontravam disponíveis atualmente. Incluiu-se na listagem de componentes a designação (que os identificam na PCB e no esquemático), a quantidade de cada um, a referência (*part number*⁵) e sua descrição.

⁵ Part number (PN, P/N, part no, ou part #) é um código padronizado de identificação de componentes, que permite a múltiplos fabricantes venderem o mesmo item sem gerar problemas de compatibilidade. Trata-se de uma sequência de números e algarismos impressos de forma idêntica em todas as unidades (Olist Serviços Digitais, 2021).

4.3. Escolha de componentes

A escolha de novos componentes teve em consideração vários aspetos, salientando-se as dimensões, características elétricas (tolerâncias, valores típicos, valores mínimos e máximos), físicas (temperatura, presença de humidade, vibrações), económicas, durabilidade e facilidade de reparação. A atualização dos componentes, mantendo as mesmas funções e nas mesmas condições de funcionamento foi um aspeto sempre presente, e existiu especial atenção na presença de algumas condicionantes específicas. Como exemplo, refere-se a temperatura de funcionamento, que como pode apresentar valores extremos dentro do armário do comboio, implicou a escolha de componentes preparados para operar em intervalos de temperatura aproximada de -20°C a 100°C.

As dimensões dos novos componentes não puderam exceder o espaço disponível, em cada *slot* da *rack*, pelo que se impôs uma altura máxima destes de aproximadamente 125mm. Por norma, para evitar um aumento da superfície a utilizar na PCB as dimensões dos novos componentes não excederam as dos componentes substituídos. Sempre que possível, foi dada prioridade a componentes SMD, uma vez que é objetivo modernizar estes circuitos eletrónicos, recorrendo a métodos tecnológicos mais avançados.

Foram analisadas as características elétricas dos componentes presentes na PCB e escolhidos aqueles que apresentavam idênticas características. Relativamente às características técnicas dos componentes, foi tido em conta que o intervalo entre os valores mínimo e máximo de funcionamento do novo componente não pode ser inferior ao do componente obsoleto. Por exemplo, se o componente obsoleto operar até uma tensão de 100V, o novo componente tem de suportar pelo menos essa tensão; ou se necessitar de uma corrente mínima de 100mA para funcionar, o novo componente também tem de apresentar esse requisito ou inferior.

O fator económico mais determinante na escolha dos novos componentes foi o *stock*. As cadeias de abastecimento afetadas pela pandemia e a conjuntura político-económica mundial provocaram uma escassez de componentes eletrónicos com consequências significativas em termos de planeamento de produção, e como no presente caso, no desenvolvimento de novos projetos (TSF - Rádio Notícias, 2021). Foi tida esta situação em conta, e prevendo que se mantenha algum tempo, foram escolhidos componentes com *stock* garantido.

Relativamente à durabilidade, sempre que possível indagou-se sobre o tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*) de cada componente, se bem que este parâmetro seja mais significativo em alguns do que em outros. Estes valores representam uma aproximação estatística de quanto tempo um conjunto de dispositivos deve durar antes da falha e são geralmente indicados em termos de horas. O MTBF pode ser radicalmente alterado por fatores físicos ou ambientais, por exemplo, com valores extremos de temperatura ou com a vibração excessiva (tal como se verifica no setor ferroviário) ou por alguma forma de uso indevido. Este parâmetro também varia ao longo da vida útil dos componentes, tendendo para apresentar uma alta taxa de falhas durante um período inicial de funcionamento (os defeitos de fabrico levam a um grande número de falhas precoces do sistema). Durante a vida útil operacional do componente o MTBF melhora, as falhas tornam-se muito mais raras, pois os sistemas que apresentam falhas precoces foram reparados ou substituídos. Com o desgaste o MTBF tende a piorar até que os dispositivos sejam substituídos por novos equipamentos (Tech-FAQ, 2022).

Por vezes, alguns componentes apresentaram vários modelos possíveis de escolha, e assim, consideraram-se o grau de estanqueidade, a classe de isolamento ou RoHS entre outros, como fatores determinantes.

A maior dificuldade encontrada nesta etapa do processo de EI da *eurocard* 6FH8163, foi a de não ter sido encontrado um novo conversor G2 com características idênticas de tensão e corrente ao do obsoleto. Este conversor apresentava uma tensão de entrada de 5V e duas saídas com tensão de 60V e correntes de 33mA e de 83mA em cada uma, ou seja, as correntes de saída eram relativamente baixas em relação à tensão de saída apresentada. Foram então escolhidos conversores que apresentassem as correntes requeridas à saída e colocados em série para se obter a tensão desejada de 60V.

Os conectores da *eurocard* à *rack* e ao *bus* do comboio (fichas X1, e fichas X2 e X3 respetivamente) não sofreram proposta de alteração porque todo o restante sistema se mantém.

Na listagem de componentes foi acrescentada uma nova coluna com a referência dos novos componentes e com esse registo procedeu-se à elaboração da BOM. Uma listagem efetuada durante o estágio consta do anexo A, e elucida para a correspondência entre os novos componentes e obsoletos (de furo passante essencialmente).

4.4. Projeto da PCB

Para desenhar o esquemático, o circuito da PCB e gerar a *netlist*, a BOM e o ficheiro Gerber foi utilizado o KiCad, que é um *software* de projeto de PCB, de código aberto para EDA. O programa corre em Windows, Linux e macOS e é licenciado sob GNU GPL v3.

O editor de esquemáticos possibilita a criação de projetos hierárquicos complexos caso necessário. A biblioteca oficial do KiCad tem milhares de símbolos e é permitida a criação de símbolos personalizados. O editor de PCB é bastante acessível com ferramentas aprimoradas de visualização e seleção. Possui um visualizador 3D que permite uma inspeção do PCB para verificar o ajuste mecânico e visualizar o produto acabado (KiCad, 2021).

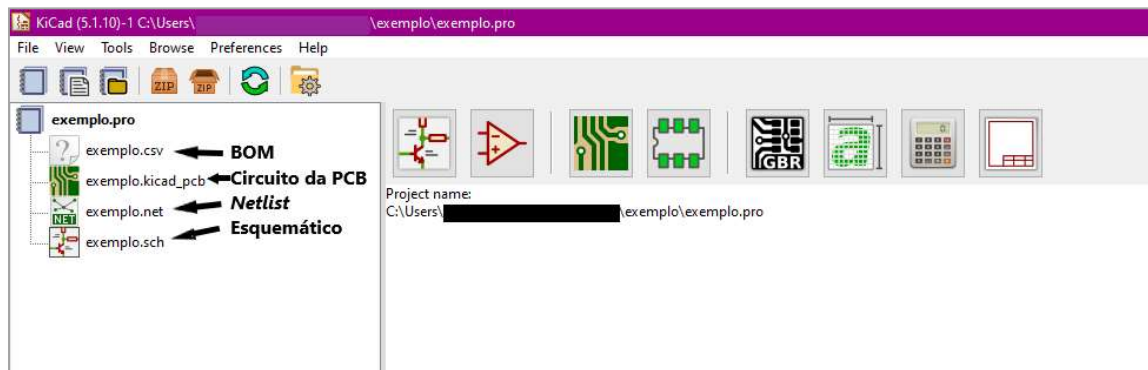


Figura 28 – Exemplo da janela inicial do KiCad com os ficheiros do projeto (elaboração própria).

Todos os ficheiros gerados (esquemático, circuito da PCB, *netlist*, BOM) foram guardados conjuntamente num projeto e puderam ser acedidos a partir da janela inicial, como no exemplo da Figura 28.

O novo esquemático da *eurocard* 6FH8163 (Figura 30 e anexo B) foi redesenhado a partir do existente (Figura 29), após a escolha de todos os componentes e obtenção dos dados a eles referentes (*datasheets* com a respetiva pinagem, *footprint*, símbolo e desenho 3D).

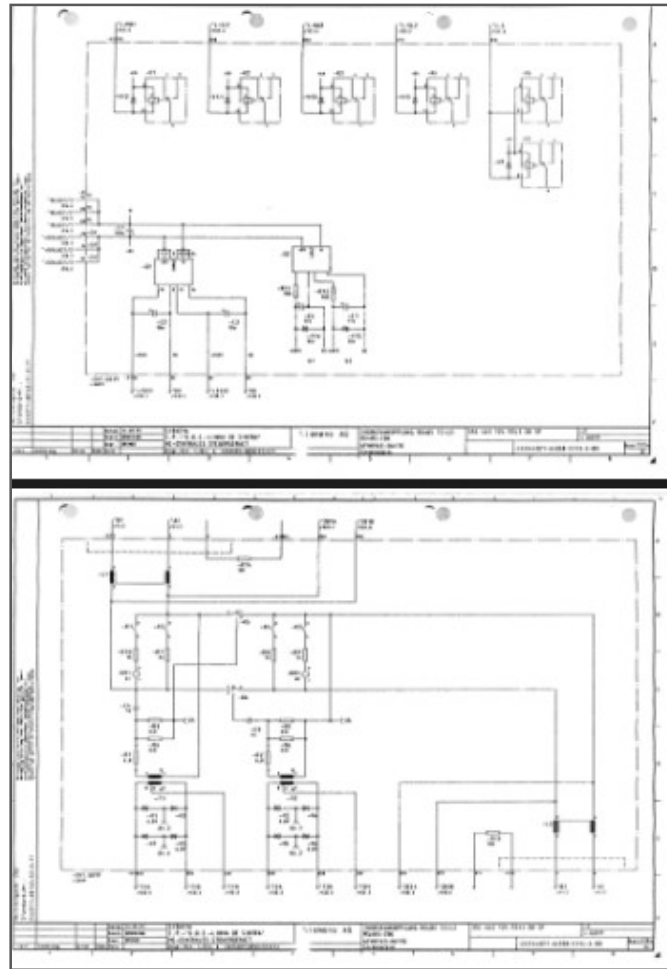


Figura 29 – Esquemático da *eurocard* 6FH8163 (documentação interna da CP).

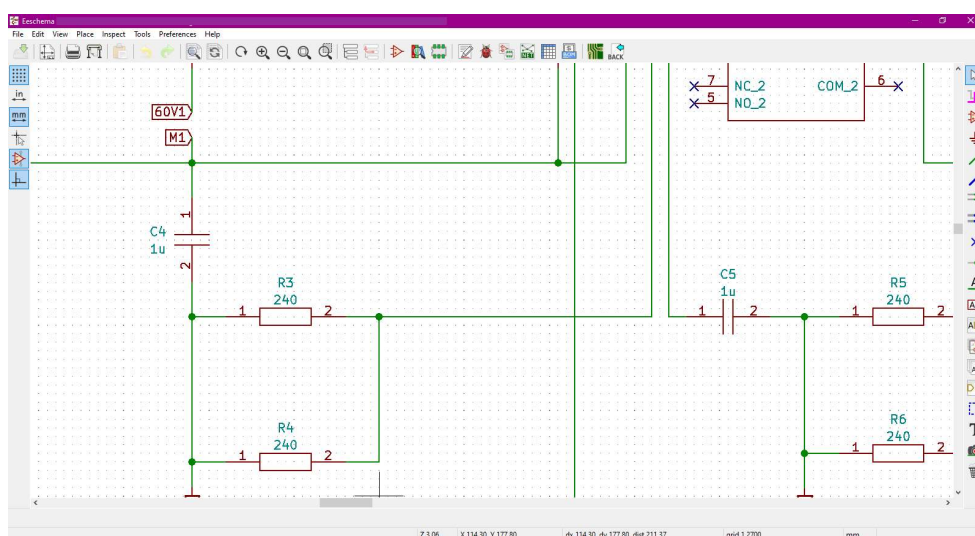


Figura 30 – Execução do esquemático no KiCad (elaboração própria).

Foram introduzidos os símbolos, *footprints* e modelo 3D de cada componente no projeto de KiCad, através do carregamento de livrerias pelo *Library Loader*. Esta aplicação funciona em conjunto com o banco de dados de bibliotecas de componentes PCB da SamacSys Ltd (SamacSys Ltd, 2021). Converte o *footprint* do símbolo e modelo 3D no formato ECAD escolhido, carregando-os na biblioteca escolhida e anexando-os ao projeto em desenvolvimento. A referida informação foi descarregada de *web sites* como: <https://componentsearchengine.com>, mas o KiCad permite ainda a criação e edição de *footprints* e modelos (Figura 31), caso não se encontrem disponíveis.

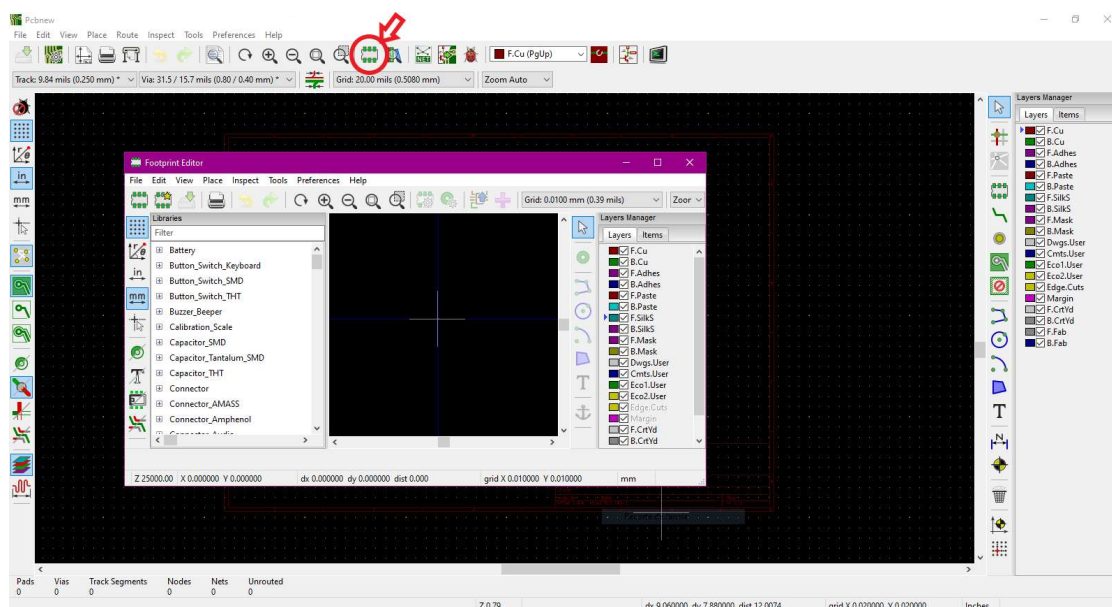


Figura 31 – Edição de *footprints* no KiCad: janela *Footprint Editor* e o ícone correspondente assinalado a vermelho (elaboração própria).

Após a execução do esquemático foi gerada a *netlist* correspondente e a partir dela iniciou-se a elaboração do circuito da PCB (anexo C). Após aceder à *netlist* gerada os componentes ficam disponíveis para ser “arrumados” na PCB e serem desenhadas as pistas. As ligações entre os componentes podem ser exibidas para auxiliar esse processo (Figura 32).

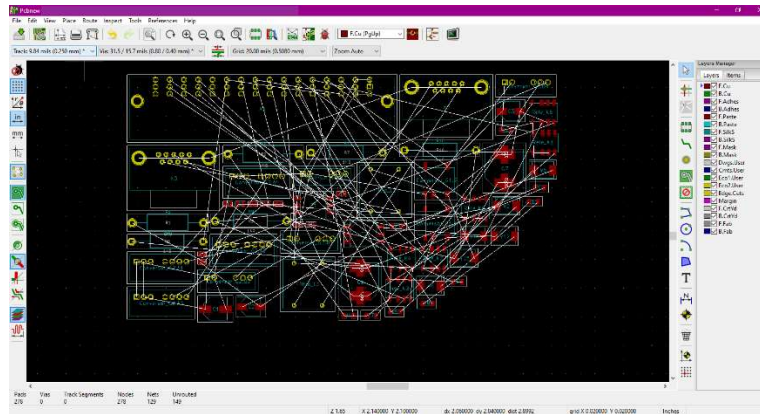


Figura 32 – Conjunto dos *footprints* dos componentes e ligações entre eles no editor de PCB do KiCad, conforme a informação da *netlist* (elaboração própria).

Durante a etapa de análise do sistema e da identificação de componentes, foram considerados os subsistemas identificados na Figura 33, que auxiliaram na organização da disposição de componentes na nova PCB.

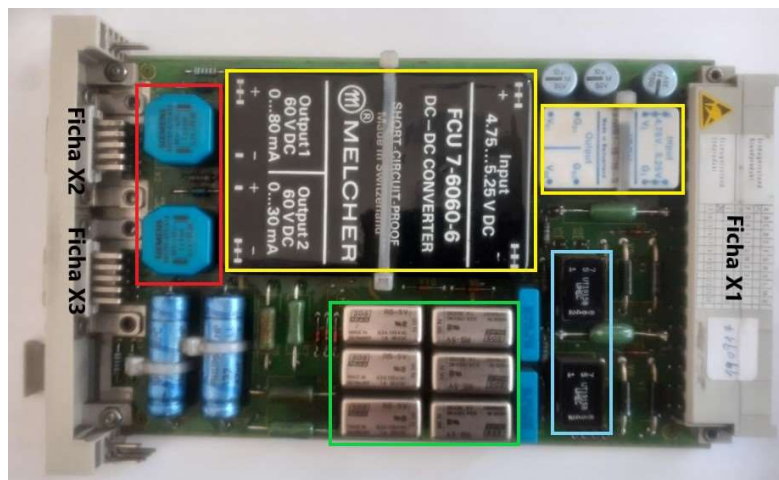


Figura 33 – Subsistemas da *eurocard* 6FH8163 (elaboração própria).

No circuito da nova PCB, mantiveram-se agrupados os componentes da mesma forma, ou seja, conforme o seu tipo/função:

- Bobinas supressoras de interferências (vermelho) colocadas junto às entradas, nas fichas X2 e X3 de interface com o *bus* do comboio, com função de filtragem do sinal antes de entrar ou sair;

- Conversores de tensão 5V/60V e 5V/15V (amarelo) que foram substituídos por uma série prevista de conversores DC-DC;
- Relés (verde) mantiveram-se agrupados e relativamente próximos dos conversores 5V/60V pois fazem o corte/ligação desta tensão;
- Transformadores (azul) mantiveram-se em grupo e dispuseram-se junto deles os diodos de proteção, para isolamento galvânico e de proteção respetivamente, do *bus* do comboio dos circuitos eletrónicos.

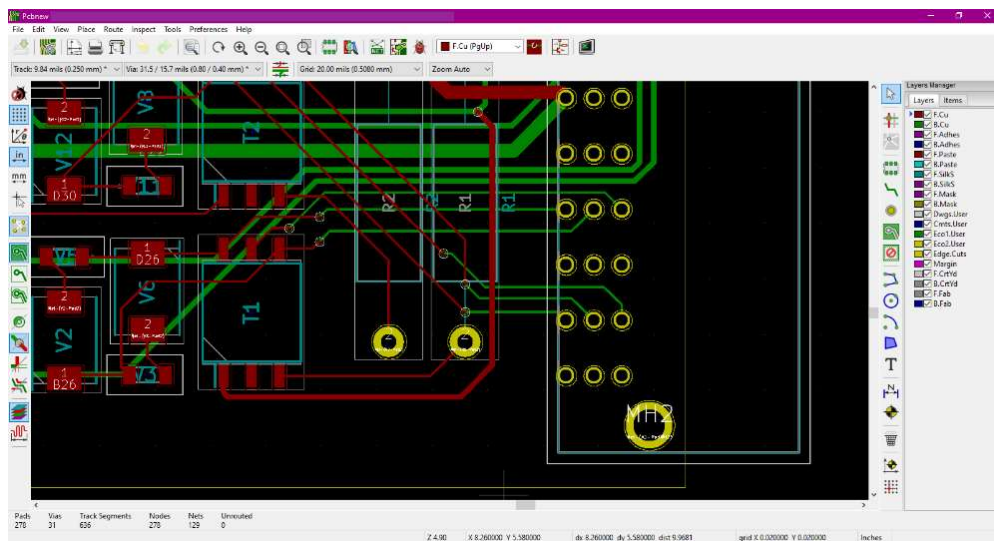


Figura 34 – Execução do circuito da PCB no KiCad (elaboração própria).

Foi executado o circuito da PCB no KiCad (Figura 34) sem autorroteamento⁶ (*auto-rotating*) das pistas, tendo sido feito uso de *vias* (Figura 35) para evitar cruzamentos de pistas e/ou pistas de grande extensão.

As pistas de alimentação (5V) e massa (M, M1 e M2) apresentam maior largura devido à corrente de atravessamento nominal ser ligeiramente maior, e de acordo com a espessura do circuito impresso original.

⁶ O autorroteamento ou comumente *auto-rotating* é o algoritmo de calcular, organizar e arrumar automaticamente as pistas e vias sem falhas técnicas, usado pelo *software* EDA.



Figura 35 – Colocação de *vias* (assinalado pelas setas amarelas) entre a camada superior (pistas verdes) e a camada inferior (pistas vermelhas) da PCB, e ícone que lhes dá origem (assinalado pela seta vermelha), (elaboração própria).

Foram definidas *filled zones* para a ligação à massa dos parafusos, com o cuidado de não intercalar nenhuma pista (para além das correspondentes à massa).

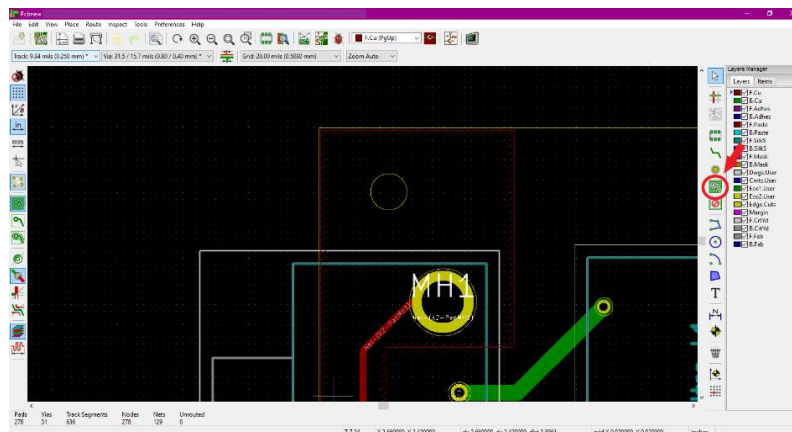


Figura 36 – Parte de *filled zone* (vermelho) junto à furação da PCB e ícone que lhe dá origem (assinalado a vermelho), (elaboração própria).

A disposição dos componentes e pistas teve em conta a reparação futura da *eurocard*, recorrendo a pistas um pouco mais largas, evitando assim que se arranquem facilmente com uso do ferro de soldar, em caso de avaria/substituição de componentes.



Figura 37 – Ícone que gera a BOM no KiCad (elaboração própria).

Para a *eurocard* ser enviada para o fabricante foram gerados, pelo KiCad, a BOM (Figura 37) e os ficheiros em formato GERBER (Figura 38).

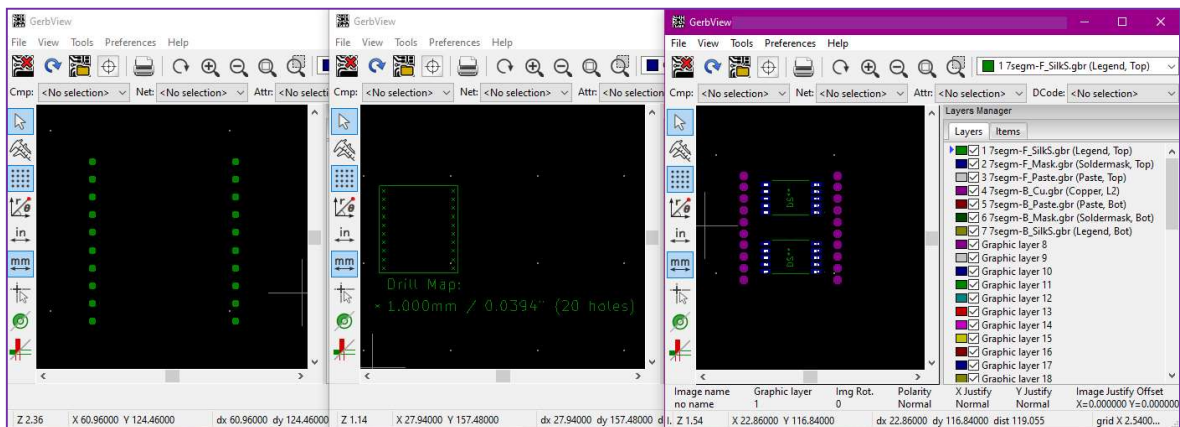


Figura 38 – Exemplo de informação contido nos ficheiros GERBER (elaboração própria no KiCad).

4.5. Ensaios e resultados experimentais

Após o fabrico das novas *eurocards*, estas devem ser submetidas a ensaio e respetivos testes de validação do seu funcionamento, de acordo com o seu projeto e replicando o ambiente elétrico (sinais de entrada e saída e alimentação) que a *eurocard* teria de estar sujeita se estivesse inserida no seu *slot* do *rack* da UCC da automotora. Este procedimento permite antecipar falhas e detetar defeitos para que possam ser corrigidos atempadamente, evitando assim o uso direto na *rack* da UCC e a possibilidade de causar danos em outras cartas eletrónicas. A verificação e validação garante que o *hardware* cumpre as especificações pretendidas e os objetivos que lhe estão conferidos, evitando problemas de implementação no comboio, especialmente ao nível da segurança, e identifica erros de conceção permitindo executar correções prévias.

Podem existir defeitos de PCB que sejam estruturais (dimensões, alinhamento dos componentes, falta de componente, problemas de solda) ou elétricas (componente defeituoso, componente errado, orientação errada). A simples análise visual pode verificar

se existe erro de posicionamento dos componentes ou problemas nas conexões da solda, mas é necessário proceder a uma análise instrumental para verificação do seu funcionamento, antes de a colocar na automotora. Após a inspeção e testes, caso se considere a *eurocard* defeituosa, é necessário proceder às devidas alterações para correção dos erros identificados. Caso contrário a *eurocard* é validada, e pode prosseguir para testes *in situ*.

Durante o intervalo de espera do fabrico da *eurocard* 6FH8163 pelo fabricante, foi utilizada uma outra que já tinha sido renovada num processo de EI – a *eurocard* 6FH1061 – para efetuar testes em laboratório e assim ensaiar esta última etapa do processo de EI aplicado à PCB.

4.5.1. *Eurocard* 6FH1061

A *eurocard* 6FH1061 sofreu um processo de EI do qual resultou a PCB da Figura 39. Convém fazer uma breve descrição do sistema desta *eurocard*, que pode ser esquematizado no diagrama de blocos simplificado da Figura 40, para compreender a etapa de ensaios.

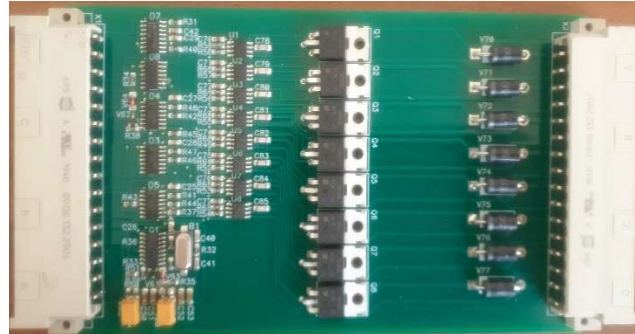


Figura 39 – *Eurocard* 6FH1061 renovada após processo de EI (propriedade da CP).

Os sinais da sua entrada TTL (*Time to Live*) acionam os MOSFET de saída de potência, que se encontram separados eletricamente por um isolamento galvânico capaz de suportar continuamente 2,5KV, e que funcionam como interruptores de potência dos sinais de saída na ficha X2 (a da direita na Figura 39). Existe um circuito de verificação do funcionamento da *eurocard*, a montante do isolamento, que engloba o cristal, o contador binário e o multivibrador monoestável. O normal funcionamento do circuito é verificado de forma redundante pela saída B28 e a sua negada Z28 na ficha X1 (Figura 42).

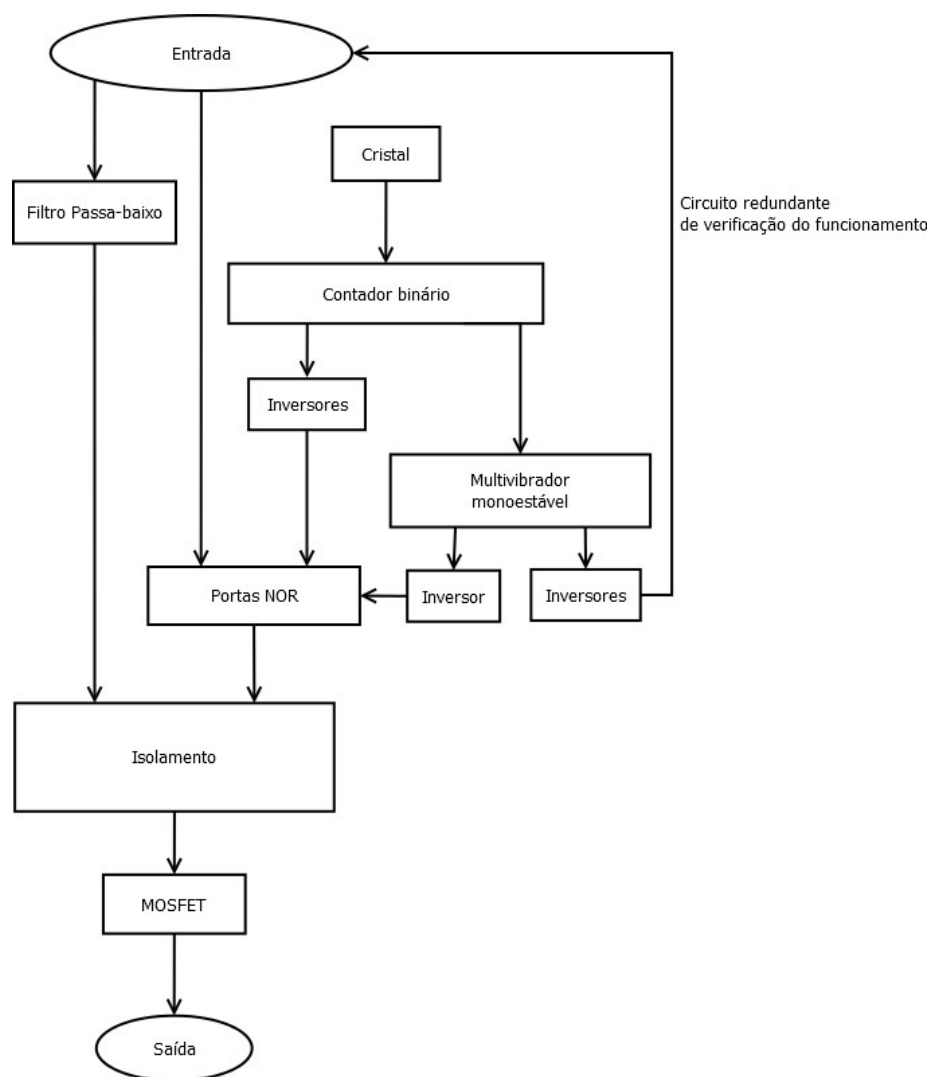


Figura 40 – Diagrama de blocos simplificado do sistema da *eurocard* 6FH1061 (elaboração própria).

Sendo assim, na ficha X1 têm-se as seguintes entradas e saídas (Figura 41):

- Z30 e Z32 (ligadas entre si internamente);
- Massa em B2 e B32;
- Alimentação de +5V em Z2;
- Alimentação de +15V em Z10 (com entrada alternativa em Z8);

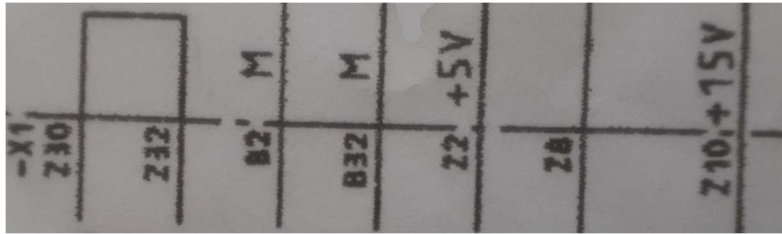


Figura 41 – Excerto do esquemático da *eurocard* 6FH1061: entradas e saídas na ficha X1 (documentação interna da CP).

- Entrada de sinal em Z14, Z16, B16 e B12 (para o transformador T1);
- Entrada de sinal em B24, B26, Z26, Z24 (para o transformador T2);
- Saída B28 e sua negada em Z28 para verificação de funcionamento (Figura 42);

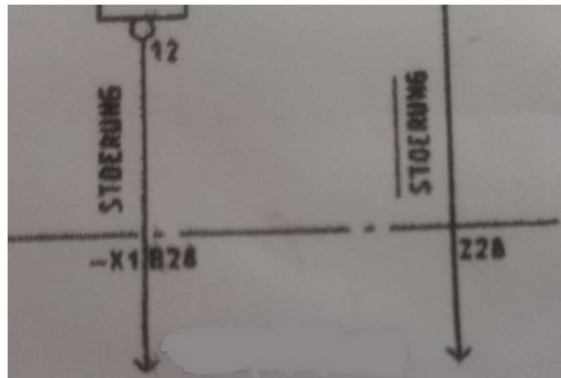


Figura 42 – Excerto do esquemático da *eurocard* 6FH1061: saída de verificação de funcionamento (documentação interna da CP).

Na ficha X2 tem-se as seguintes entradas e saídas de sinal:

- B16, Z16, B12, Z12, B8, Z8, B4 e Z4, a jusante do isolamento T2;
- B32, Z32, B28, Z28, B24, Z24, B20 e Z20, a jusante do isolamento T1.

4.5.1.1. Procedimento do ensaio

Na *eurocard* nova procedeu-se a uma verificação visual de todos os componentes e conexões, confirmando o seu posicionamento. Iniciou-se o teste ao processo, simulando o contexto de funcionamento através da alimentação da *eurocard* e aplicando nas respetivas entradas um sinal com uma frequência baixa que se foi variando de forma crescente. Os

testes dos vários pontos de verificação não precisaram de ser executados simultaneamente, uma vez que são canais de comando ou acionamento totalmente independentes.

Os dados de referência para as condições de teste foram $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente) e $\text{GND}=0\text{V}$ (massa). Foi necessária a seguinte instrumentação:

- Fonte de alimentação;
- Osciloscópio;
- Gerador de funções;
- Fios de ligação dos instrumentos e pontas de prova;
- Multímetro.

Fez-se uso de uma *breadboard* para interface com a *eurocard* e um conjunto de leds e resistências (de limitação de corrente) para sinalizar a existência de sinal digital nas saídas. Na Figura 43 pode visualizar-se o cenário de ensaio, no laboratório da CP, à *eurocard* 6FH1061 obsoleta. Este ensaio foi feito para se registar o funcionamento padrão pretendido e depois comparar e validar com o funcionamento da nova *eurocard* fabricada.

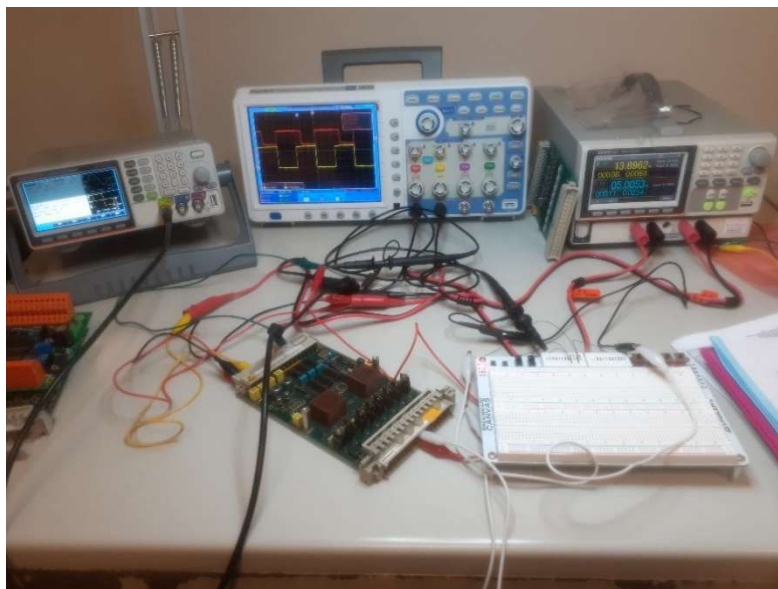


Figura 43 – Ensaio da *eurocard* 6FH1061 obsoleta (foto no laboratório da CP).

Em X1, ligaram-se as alimentações de +5V e +15V, a Z2 e Z10, respetivamente, a massa em B2 e B32. A continuidade entre as entradas Z30 e Z32 de X1 foi verificada aplicando nelas um multímetro.

Para testar o circuito de verificação redundante do sistema executou-se a montagem da Figura 46 e registou-se o comportamento dos leds.

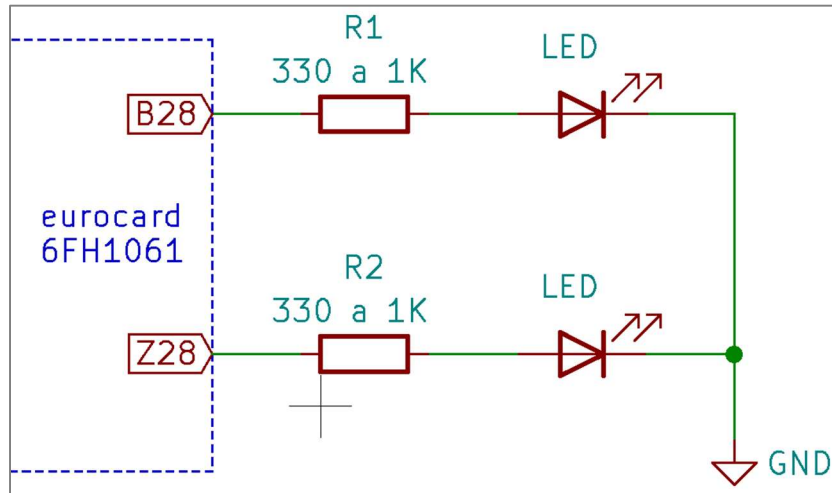


Figura 44 – Esquema de montagem nas saídas B28 e Z28 em X1 (elaboração própria no KiCad).

Para testar as saídas de potência X2 executou-se a montagem da Figura 45. Aplicou-se o sinal na entrada B24 em X1. Registaram-se os respectivos sinais de saída, em X2, aplicando-se nelas as pontas de prova do osciloscópio para comprovar o sinal replicado na entrada correspondente.

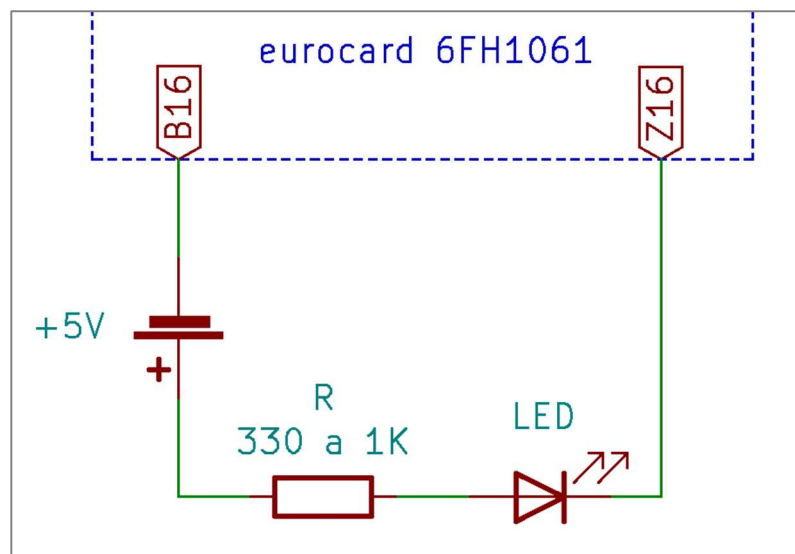


Figura 45 – Esquema de montagem nas saídas B16 e Z16 em X2 (elaboração própria no KiCad).

Repetiu-se o esquema para verificação das restantes saídas conforme a correspondência da Tabela 3:

Tabela 3 – Correspondência entre a entrada de sinal em X1 e o sinal de saída originado em X2, na *eurocard* 6FH1061 (elaboração própria).

Entrada de sinal em X1	Saída de sinal em X2	
B24	B16	Z16
B26	B12	Z12
Z26	B8	Z8
Z24	B4	Z4
Z14	B32	Z32
Z16	B28	Z28
B16	B24	Z24
B12	B20	Z20

Para testar a resposta do sistema a valores extremos de tensão, e respeitando as especificações de cada componente, fez-se variar a tensão na saída e na entrada até valores mínimos e máximos. Considerou-se o intervalo de tensão entre 2V e 30V a experimentar na saída (conforme o esquema da Figura 45), e de forma semelhante fez-se variar a tensão de alimentação na entrada Z2 num intervalo entre 0V e 6V e em Z10 entre 0V e 20V.

O intervalo de operação variou entre 2V e 6V, sendo o típico 5V, e teve uma gama permitida na fonte de alimentação entre -0,5V e 7V (pois ao aplicar uma tensão de entrada fora deste intervalo os componentes podem ser danificados).

4.5.1.2. Resultados

Foram obtidos parâmetros de funcionamento, a partir da *eurocard* obsoleta, que deverão servir de referência e ser respeitados para a validação das novas e recém-fabricadas *eurocards*.

Ao fazer baixar a tensão de alimentação de 15V, o circuito desligou-se ao atingir os 13,8V, considerando-se 13,9V o valor mínimo de funcionamento. De modo idêntico

determinou-se o valor mínimo de funcionamento de 2,9V para a tensão de alimentação de 5V.

Foi testado o circuito de verificação redundante do sistema nas saídas B28 e Z28 na ficha X1, cujo comportamento das formas de onda se apresenta na Figura 46.

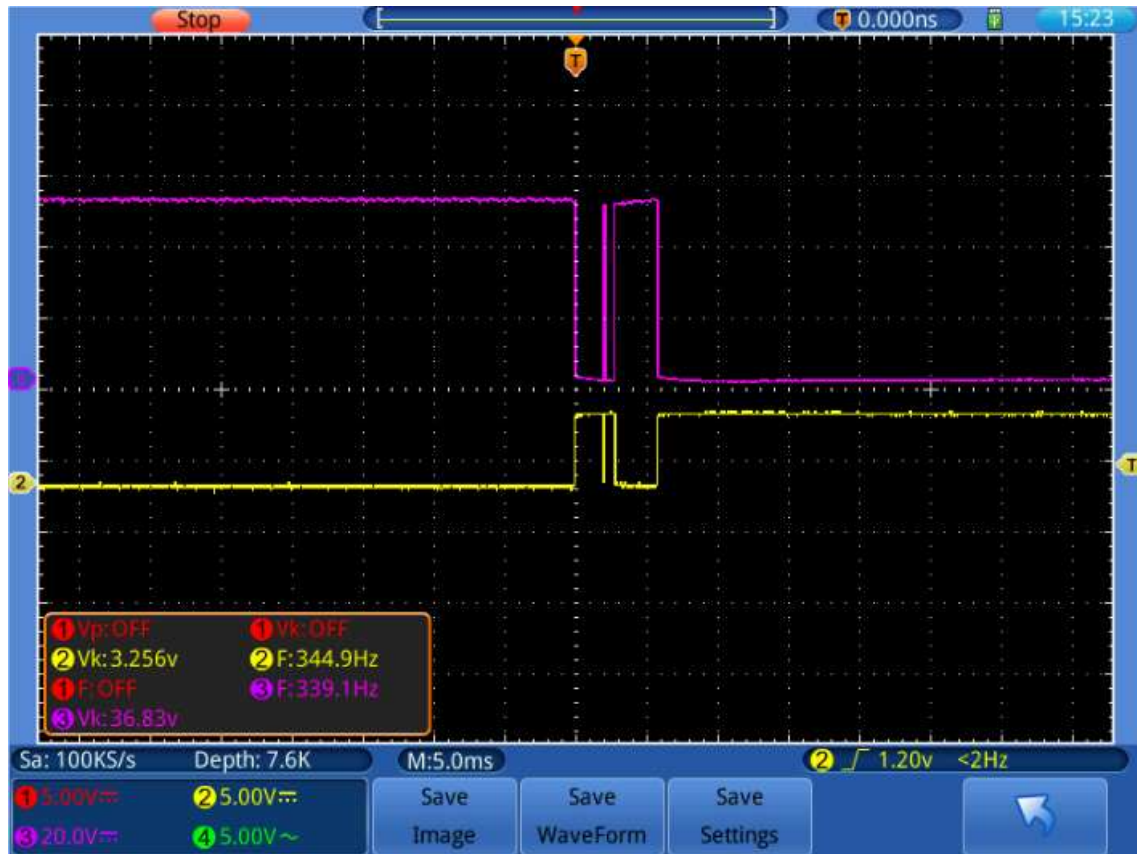


Figura 46 – Formas de onda no teste do circuito de verificação redundante do sistema (osciloscópio do laboratório da CP).

Ao receber um sinal no sistema, ambas as saídas respondem, sendo Z28 negada de B28, confirmando, de forma inequívoca, o seu funcionamento.

Ao testar o tempo de resposta dos MOSFET, enquanto interruptores, foi registrado um atraso na ordem das unidades de μs na *eurocard* obsoleta e na ordem das centenas de μs na nova, conforme mostrado nas Figura 47 até à Figura 50. Registaram-se também os atrasos no desligar do interruptor, que se verificaram serem inferiores na *eurocard* nova.

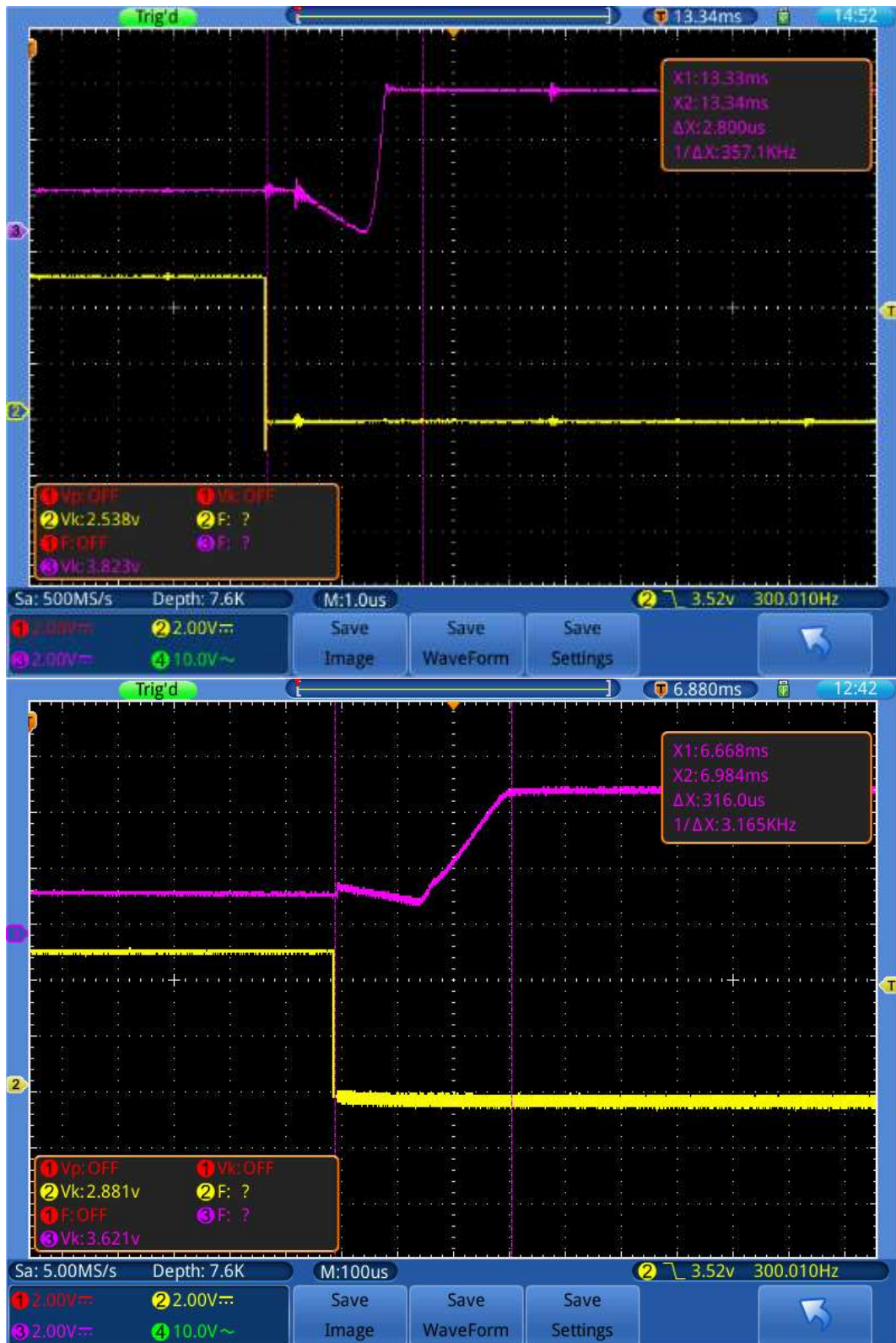


Figura 47 – Formas de onda registadas no ligar do interruptor, a uma frequência de 300Hz. Na *eurocard* obsoleta o interruptor liga em 2,8 μ s (à esquerda) enquanto na *eurocard* nova o interruptor liga em 316 μ s (à direita), (osciloscópio do laboratório da CP).

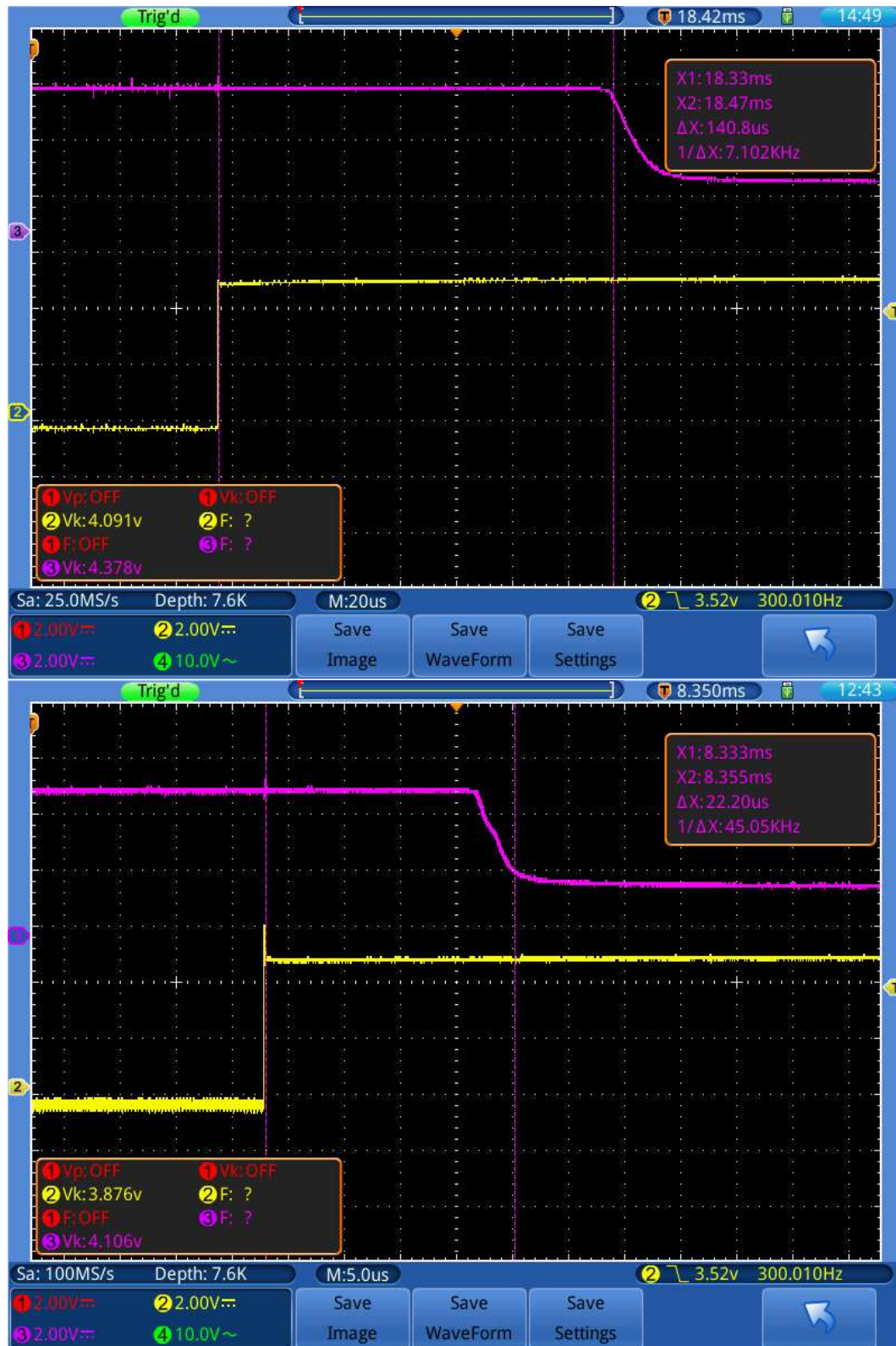


Figura 48 – Formas de onda registadas no desligar do interruptor, a uma frequência de 300Hz. Na *eurocard* obsoleta o interruptor desliga em 140,8µs (à esquerda) enquanto na *eurocard* nova o interruptor desliga em 22,2µs (à direita), (osciloscópio do laboratório da CP).



Figura 49 – Formas de onda registadas no ligar do interruptor, a uma frequência de 1000Hz. Na *eurocard* obsoleta o interruptor liga em 2,6μs (à esquerda) enquanto na *eurocard* nova o interruptor liga em 318μs (à direita), (osciloscópio do laboratório da CP).



Figura 50 – Formas de onda registadas no desligar do interruptor, a uma frequência de 1000Hz. Na *eurocard* obsoleta o interruptor desliga em 140 μs (à esquerda) enquanto na *eurocard* nova o interruptor desliga em 38 μs (à direita), (osciloscópio do laboratório da CP).

Atendendo às características da *eurocard* obsoleta, e após testar várias frequências, especificaram-se os tempos de atraso não superior a $3\mu\text{s}$ e não superior a $150\mu\text{s}$, a ligar e a desligar o interruptor, respetivamente. Na Tabela 4 estão resumidas as especificações a que a *eurocard* 6FH1061 tem de obedecer para que seja validada.

Tabela 4 – Parâmetros de validação da *eurocard* 6FH1061 (elaboração própria).

Parâmetro	Valor
Tensão de alimentação em Z10 – valor mínimo de funcionamento	13,9 V
Tensão de alimentação em Z2 – valor mínimo de funcionamento	2,9 V
Tempo máximo de atraso no ligar do interruptor	$3\mu\text{s}$
Tempo máximo de atraso no desligar do interruptor	$150\mu\text{s}$

A *eurocard* nova, não satisfaz as condições de tempo de ligar o interruptor e, sendo assim, por falhar nos testes do ensaio não foi validada, tendo sido reencaminhada para a substituição de circuito integrado com maior frequência de resposta.

4.5.2. *Eurocard* 6FH8163

A *eurocard* 6FH8163, com a qual foi iniciada este processo de EI, foi fabricada antes do término do período de estágio, pelo que ainda se inclui alguma informação relativa aos ensaios e resultados experimentais finalizados durante aquele período. Nas figuras seguintes é possível comparar o aspeto das *eurocards*, a obsoleta e a atualizada.

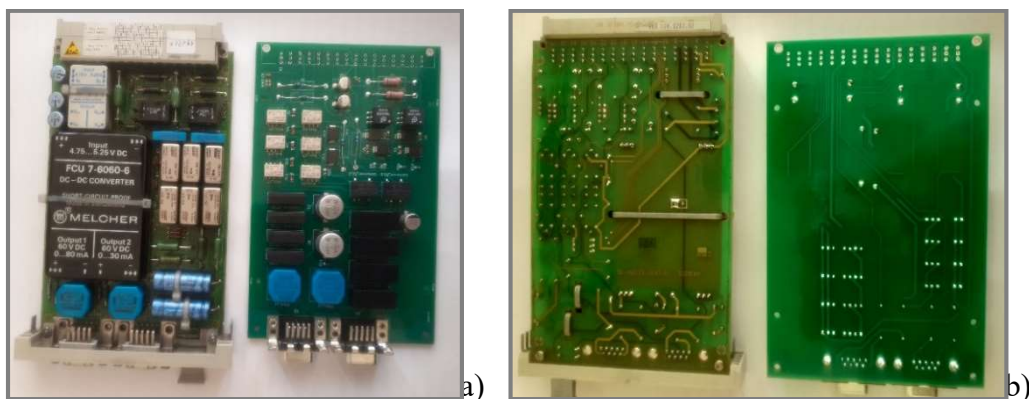


Figura 51 – Faces superior (a) e inferior (b) das *eurocards* 6FH8163: a obsoleta à esquerda e a atualizada à direita (propriedade da CP).

O sistema desta *eurocard* foi sendo estudado durante o processo de EI e pode ser esquematizado na Figura 52. Como se preservou a *eurocard* obsoleta foi possível utilizá-la para testes e registo das características de funcionamento.

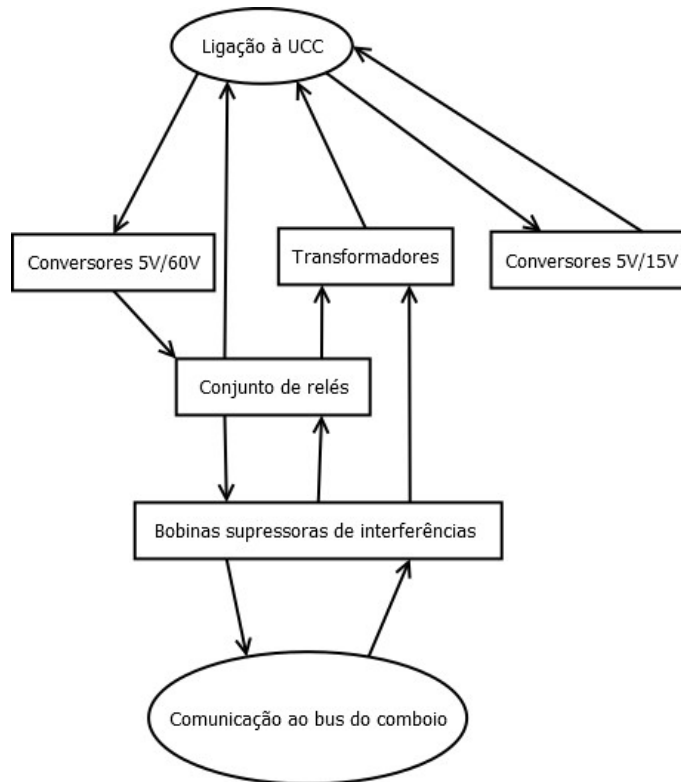


Figura 52 – Diagrama de blocos simplificado do sistema da *eurocard* 6FH8163 (elaboração própria).

Sendo assim, tem-se na ficha X1, que faz a ligação à UCC:

- Alimentação de +5V em Z2, Z4 e B4;
- Massa em B2, D2 e D4;

Estas entradas da *eurocard* ligam aos conversores de tensão, conforme o diagrama acima, sendo que as tensões de saída dos conversores 5V/15V podem ser medidas em X1, nos seus pinos Z6 e D6, e em Z8 e D8.

Os sinais de saída dos conversores 5V/60V, que passam pelo conjunto de relés e pelas bobinas podem ser medidos nas fichas X2 (pinos 1 e 5) e X3 (pinos 6 e 9) de ligação ao *bus* do comboio. Esses sinais, podem ser medidos antes de serem filtrados pelas bobinas de supressão de interferências, na ficha X1 nos pinos D16 e D18, e em D20 e D22 (Figura 53).

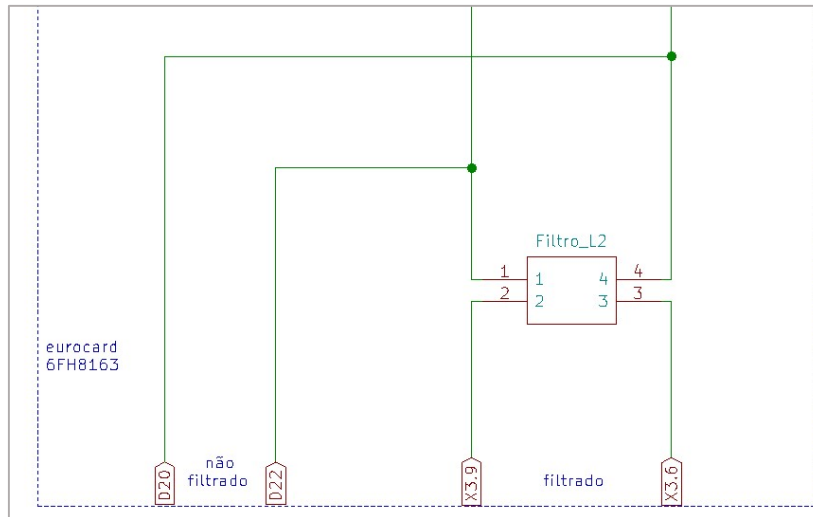


Figura 53 – Extrato do esquemático da *eurocard* 6FH8163 (que nesta figura aparece delimitada a azul tracejado): pinos D20 e D22 da ficha X1 onde o sinal não está filtrado; e pinos 6 e 9 da ficha X3, onde o sinal se apresenta filtrado pela bobina L2 (elaboração própria no KiCad).

4.5.2.1. Procedimento do ensaio

Os dados de referência para as condições de teste foram $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente) e $\text{GND}=0\text{V}$ (massa), tal como na *eurocard* anterior, e utilizou-se o multímetro, a fonte de alimentação e fios de ligação dos instrumentos e pontas de prova para proceder ao ensaio. Após a receção da *eurocard* atualizada procedeu-se a uma verificação visual de todos os componentes e conexões. Confirmou-se o posicionamento e polaridade de cada um (com o multímetro),

Para testar os conversores fez-se a ligação à alimentação de +5V em Z2, e à massa em D4. Para medir as tensões de saída dos conversores 5V/15V utilizou-se o multímetro na ficha X1, nos pinos Z6 e D6 para uma das saídas, e em Z8 e D8 para outra.

Para ensaio dos relés, dos conversores 5V/60V e das bobinas fez-se uso de uma *breadboard* com um conjunto de leds e resistências (de limitação de corrente) para sinalizar a existência de sinal nas saídas (Figura 54).

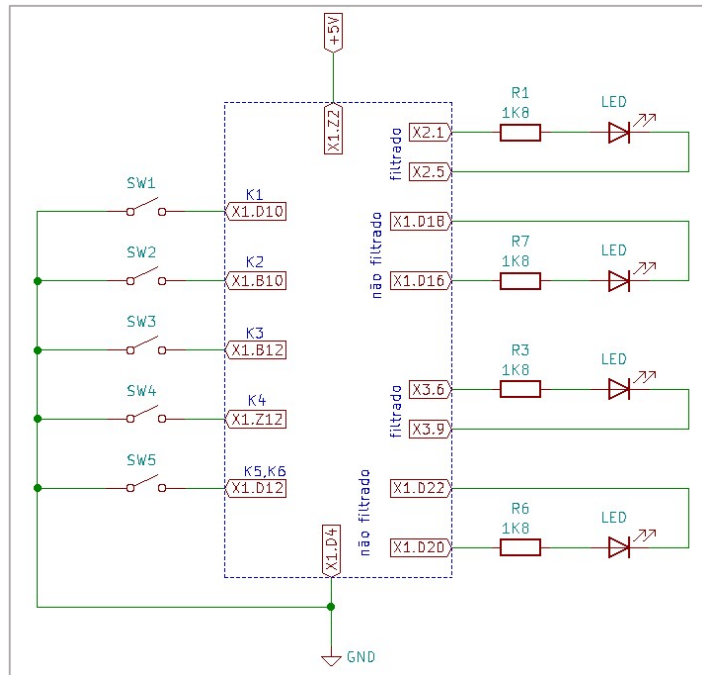


Figura 54 – Esquema de montagem nos pinos das fichas da *eurocard* 6FH8163 (traço descontinuo a azul), (elaboração própria).

Os relés foram acionados conforme a existência de tensão (+5V) em cada entrada correspondente da ficha X1 (Tabela 5), a Figura 55 apresenta o exemplo do relé K1 inserido no esquemático da *eurocard* 6FH8163.

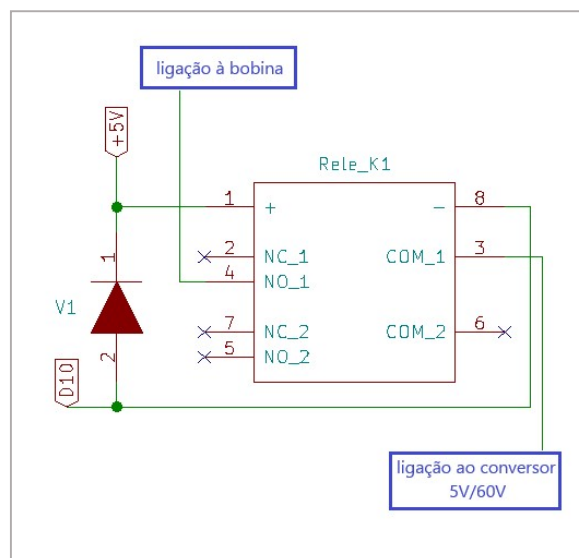


Figura 55 – Extrato parcial do esquemático da *eurocard* 6FH8163: relé K1 e as suas ligações a outros componentes (elaboração própria no KiCad).

Tabela 5 – Correspondência entre a existência de tensão nos pinos de X1 e o relé acionado, na *eurocard* 6FH8163 (elaboração própria).

Pino de X1	Relé acionado
D10	K1
B10	K2
B12	K3
Z12	K4
D12	K5
	K6

A resistência R13 faz ligação entre as fichas X1 e X3, e a resistência R14 entre as fichas X1 e X2 (Figura 56), pelo que os seus valores ôhmicos foram medidos aplicando o multímetro em:

- R13: pino B14 de X1 e pino 3 de X3;
- R14: pino D14 de X1 e pino 3 de X2.

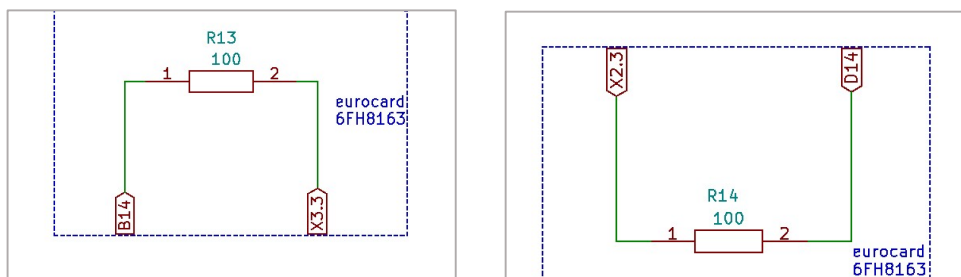


Figura 56 – Extrato parcial do esquemático da *eurocard* 6FH8163: ligação da resistência R13 entre o pino B14 da ficha X1 e o pino 3 da ficha X3 (à esquerda); e ligação da resistência R14 entre o pino 3 da ficha X2 e o pino D14 da ficha X1 (elaboração própria no KiCad).

Após validação do funcionamento da *eurocard* protótipo no laboratório, foi de seguida realizado o ensaio no comboio, na respetiva UCC da cabine da UQE 2403/63, no parque oficial de Campolide.



Figura 57 – *Eurocard* 6FH8163 atualizada, na posição G019 da *rack* da UCC da automotora UQE 2403/63, com as ligações ao *bus* do comboio (foto no parque oficial de Campolide).

Este ensaio consistiu em substituir a *eurocard* original que se encontrava na *slot* da *rack* da UCC, pela nova *eurocard* desenvolvida (Figura 57), e foi colocado o comboio em funcionamento, num ensaio “tração contra freio” que resumidamente consistiu em:

- Ligar a bateria do comboio (Figura 1Figura 58);



Figura 58 – Interruptor de alavanca para acionamento da bateria (assinalada pela seta azul) e o interruptor de alavanca para libertar o freio de estacionamento (assinalado pela seta verde), na UQE 2403/63 (foto no parque oficial de Campolide).

- Acionar a subida do pantógrafo (Figura 60), confirmando a presença de 25kV na entrada de alimentação do comboio, através do mostrador analógico de tensão da catenária (Figura 59);



Figura 59 – Mostrador analógico da tensão da catenária (à esquerda) e monitor SIBAS (à direita) no painel de comandos da UQE 2403/63 (foto no parque oficial de Campolide).

- Ligar o disjuntor principal (Figura 60);



Figura 60 – Visão parcial do painel de comandos na UQE 2403/63: interruptor de alavanca de acionamento do pantógrafo (assinalado pela seta azul) e interruptor de alavanca de acionamento do disjuntor principal (assinalado pela seta verde), (foto no parque oficial de Campolide).

- Após libertar o freio de estacionamento (Figura 58) foi iniciado o ensaio “tração contra freio”, em ambos os sentidos de marcha.

O ensaio “tração contra freio” consiste em manter o freio pneumático da automotora e avançar o manípulo da tração para a frente aplicando uma força de 20 a 30kN em toda a cadeia de tração.

4.5.2.2. Resultados

Durante a inspeção visual e de verificação da polaridade dos componentes foi detetado um díodo com a polaridade invertida. O erro foi registado e emendado na *eurocard* protótipo em laboratório, o díodo foi dessoldado e ressoldado na posição correta. Foi detetada uma incoerência na *footprint* das fichas X2 e X3, utilizada no desenho do circuito da PCB. O erro foi reportado à empresa de edição de *footprints* que rapidamente corrigiu e atualizou o ficheiro na internet. Em laboratório foi efetuado a correção, cortando as pistas e soldando fio condutor na face inferior da PCB. Os valores óhmicos das resistências R13 e R14 foram então confirmados com o multímetro.

No ensaio aos conversores 5V/15V verificou-se em ambas as saídas a tensão desejada. Os conversores 5V/60V não funcionaram devidamente, comprometendo a restante fase de ensaio, inclusive no comboio. O problema pode dever-se ao facto de os conversores seleccionados, para funcionamento em série, absorverem mais corrente ao serem alimentados na fase inicial – talvez por serem mais do que um conversor para perfazer a tensão de 60V, face ao conversor original que é só um. Com isso, o pico de corrente inicial é muito superior ao da fonte de alimentação, o que faz com que um dos conversores nem sempre arranque para funcionamento. O mais grave desta situação é que o conversor tende a ficar com o seu transístor interno sempre ligado e a curto-circuitar a fonte de alimentação externa. Pelo que se concluiu que não seria um sistema seguro nem tão pouco fiável. O problema seguiu para análise e estudo que não se inclui neste relatório.

No entanto, para se poder ensaiar a *eurocard* 6FH8163 no comboio foi implementada uma solução temporária. Foi ensaiado em *breadboard* a associação de um relé à série de conversores 5V/60V, de forma que um conversor ligue após o outro e assim a corrente de pico inicial seja inferior. Após validação na *breadboard* foi soldado o relé na *eurocard*, entre

a saída e a entrada da série dos conversores 5V/60V e testado. A *eurocard* 6FH8163 foi validada em laboratório e seguiu para ensaio no comboio.

No ensaio de “tração contra freio” no parque oficial de Campolide, verificou-se que a nova *eurocard* teve o funcionamento desejado, ao primeiro teste. Ao ligar o comboio e este ter efetuado o autodiagnóstico da integridade das cartas eletrónicas físicas inseridas no rack do SIBAS 16 e após concluídas as comunicações entre a UCC e UCT's, o sistema não identificou nenhum erro, conforme indicação na Figura 61.

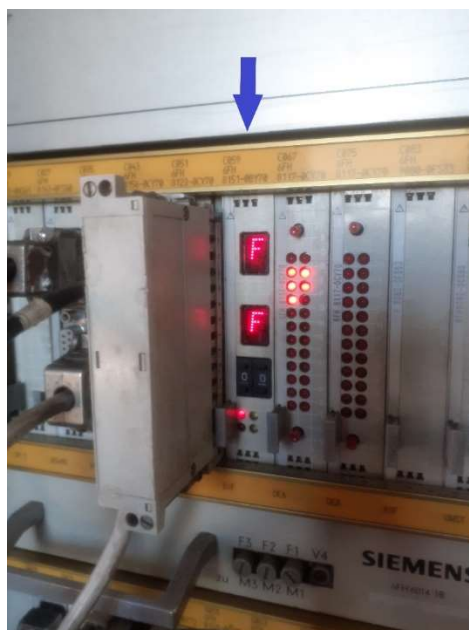


Figura 61 – Outra *eurocard*, referência 6FH8151 (assinalada pela seta azul), também inserida na *rack* da UCC na UQE 2403/63, com indicação de código de mensagem de ausência de erros no sistema (código hexadecimal “FF”), após autodiagnóstico do SIBAS. Caso existisse qualquer outro erro no sistema seria visualizada um outro código de mensagem de erro diferente de “FF”, naquela *eurocard* (foto no parque oficial de Campolide).

Foi acionada a tração do comboio com sucesso, cerca de 30 kN, conforme o mostrador analógico do dinamómetro (Figura 62), o que indica que existe um correto funcionamento de todo o sistema, com a *eurocard* 6FH8163 nova, nele incluída. Esta *eurocard* é um circuito-chave de comunicações entre UCC e UCT's que sem ela o sistema não comunica e não permite o acionamento da cadeia de tração.



Figura 62 – Mostrador analógico do dinamómetro da UQE 2403/63, com uma tração aplicada de cerca de 30kN (foto no parque oficial de Campolide).

5. Conclusão

O transporte ferroviário é particularmente relevante para o futuro da mobilidade, e são referidos alguns aspetos da sua importância no programa de mobilidade europeia, em UIC (2019), dos quais se destacam:

- Permite transportar grandes volumes, grandes massas de pessoas, a grande velocidade e de forma muito segura;
- É um dos meios de transporte mais sustentáveis e ecológico;
- O transporte ferroviário é ainda mais eficiente energeticamente, através da energia elétrica, mas têm vindo a ser testadas ativamente outras fontes de energia neutras ao nível da emissão de carbono, como o hidrogénio e outros conceitos de propulsão (como é o exemplo do recurso a ímanes permanentes, para fazer deslocar uma carruagem de passageiros por levitação magnética, sem necessidade absoluta de energia elétrica de sustentação durante todo o percurso).
- A rede ferroviária tende para uma conectividade quase perfeita, aproximando regiões. Tem um potencial de complementaridade que contribui para a mobilidade sustentável, descongestionando as cidades;
- A comunidade ferroviária possui a experiência, competência e conhecimento facilitador da era da nova mobilidade. A realização desta inovadora mudança na mobilidade social depende do modo de colaboração com outros setores.

Em Portugal, a CP pretende manter a sua visão como líder nacional de mobilidade integrada, e nesse processo pretende proceder à revitalização do serviço de transportes ferroviário de passageiros. Assim, este projeto de estágio contribui para esse objetivo com a atualização de cartas eletrónicas da UCC, tendo sido realizado um novo projeto da *eurocard* 6FH8163 pertencente à UCC da UQE 2300/2400 da Linha de Sintra, e que corresponde ao módulo de acoplamento com o *bus* do comboio RS 485.

Foram aplicados os conhecimentos obtidos no estudo sobre a engenharia inversa aplicada a PCB, em contexto real. Este estudo permitiu obter uma visão mais aprofundada sobre o assunto, embora seja um tema bastante vasto.

A tecnologia dos sistemas eletrónicos evolui e melhora diariamente, e esse desenvolvimento dá origem a uma grande quantidade de itens obsoletos. Os principais problemas estão relacionados com peças, módulos ou CI que já não são fabricados e por isso

torna-se muito difícil adquiri-los; ou por informações técnicas incompletas ou não disponíveis. Pode ainda acontecer ter ocorrido modificações ou atualizações num determinado sistema e a sua informação técnica não ter acompanhado essa atualização, e assim o sistema não estar de acordo com o que vem na sua informação técnica. No presente caso, tratou-se de um sistema eletrónico obsoleto e cuja documentação seria pouca ou quase nenhuma, e com alguns erros.

A escolha de novos componentes, mais pequenos e avançados (SMD) foi uma das etapas mais exaustivas do trabalho, porque as funções e as características elétricas de funcionamento originais tinham de ser mantidas. Esta etapa foi dificultada pelo problema de falta de *stock* de componentes eletrónicos a nível mundial (crise temporária alheia ao projeto).

Adquiriram-se novos conhecimentos de projeto assistido por computador de PCB ao nível da utilização do *software* KiCad. Foi um processo simples uma vez que o programa se revelou bastante intuitivo e com boa qualidade, tratando-se de uma *open source*. Deste modo, foram desenhados os respetivos esquemáticos e circuito da PCB, verificados e aperfeiçoados antes de seguir para o fabricante, juntamente com a BOM e os ficheiros Gerber gerados.

Neste processo de EI foi tido em consideração alguns aspetos pesquisados durante o Estado da Arte, acerca da EI de sistemas eletrónicos, nomeadamente os passos a seguir na análise do sistema: documentar, testar, analisar e relatar o estudo da função da *eurocard* 6FH8163, dando origem ao seu diagrama de blocos (Figura 52) e aos esquemas dos circuitos.

A verificação do protótipo foi realizada em laboratório e no comboio com sucesso. Primeiro houve uma inspeção visual para detetar qualquer falha no seu fabrico, tendo sido necessário proceder a algumas alterações. Depois foram realizados testes em laboratório e após validação seguiu para o ensaio no comboio, no parque oficial de Campolide.

Foram anotados aspetos para melhoramento, quer do protótipo quer do processo de EI, a aplicar nas próximas cartas eletrónicas. Sugere-se a inclusão de fusíveis de segurança (SMD), em alguns circuitos, nomeadamente nos que incluam conversores, por exemplo. A inclusão de leds para identificação de falhas, em pontos-chave nas próximas cartas eletrónicas, e que sejam visíveis no painel frontal, pode facilitar o diagnóstico imediato de uma avaria e facilitar a sua reparação. O processo de substituição de componentes obsoletos faz com que por vezes não se obtenha exatamente um substituto modernizado para o

componente obsoleto em causa. Pode acontecer ter de se substituir um componente por um conjunto de componentes, como aconteceu no presente caso em que se substituiu um conversor por uma série deles, de forma a manter as características elétricas (tensão e corrente de saída desejadas). Assim, em trabalhos futuros, é conveniente experimentar e validar essa associação em *breadboard* antes de a incluir no projeto da nova *eurocard*. O mesmo se sugere que se faça, quando é necessário incluir circuitos auxiliares que possam ser aconselhados pelos fabricantes dos novos componentes.

A engenharia inversa (EI) é um processo útil e necessário na revitalização de sistemas eletrónicos com componentes obsoletos, como no presente caso, a modernização da uma *eurocard*. Além de se economizar tempo e dinheiro, foi obtido conhecimento (onde se inclui a informação gerada sobre a PCB, circuitos e ficheiros relacionados) e todo o *know-how* que ficará na empresa CP. Neste projeto foram desenvolvidas várias etapas de trabalho num processo de EI, que se encontram esquematizadas sob a forma de fluxograma na Figura 18, e que podem ser aplicadas na modernização de futuras cartas eletrónicas.

Este projeto de engenharia inversa assistido por computador descreve uma metodologia comprovada, que pelo sucesso obtido na concretização do seu objetivo – a renovação da *eurocard* 6FH8163 mantendo a sua funcionalidade e características elétricas originais –, poderá ditar os passos essenciais a seguir para a modernização de todas as outras cartas eletrónicas das UCC's e das UCT's não só das UQE 2300/2400, como de outro tipo de material circulante, em que se pretenda vir a modernizar outros circuitos eletrónicos por obsolescência dos seus componentes. Este modelo pode ainda ser aplicado de uma forma genérica na indústria.

Referências bibliográficas

- AEAMESP - Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Metrô. (31 de dezembro de 2021). *Sistemas de controle e monitoração de trens*. Obtido de Web site de AEAMESP: <https://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/10SMTF040924T12.pdf>
- Ai, B., Molisch, F. A., Rupp, M., & Zhong, Z.-d. (junho de 2020). 5G Key Technologies for Smart Railways DOI:10.1109/JPROC.2020.2988595. *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 6, pp. 856-893.
- Arema, A. A. (31 de dezembro de 2021). *Reverse Engineering Research* DOI:10.13140/RG.2.2.28030.51520. Obtido de Web site de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/356784389_Reverse_Engineering_Research
- Armistead, J. (23 de janeiro de 2022). *PCB Reverse Engineering*. Obtido de Web site de Scribd Inc.: <https://pt.scribd.com/document/200223473/PCB-Reverse-Engineering>
- Barai, G. D., Shete, S. S., & Raut, L. P. (maio de 2015). Design and development of a component by reverse engineering. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 539-546.
- CP E.P.E. (21 de fevereiro de 2022). *CP - Comboios de Portugal*. Obtido de Website de CP - Comboios de Portugal: <https://www.cp.pt/>
- Georg, G., Karl, K., & Wolfram, L. (março de 1989). SIBAS 16 traction control takes to the rails. *Energy&Automation Vol11*, pp. 22-23.
- Grand, J. (agosto de 2014). Printed Circuit Board Deconstruction Techniques. *WOOT 19*.
- Infraestruturas de Portugal. (6 de setembro de 2022). *Léxico*. Obtido de Web site de Infraestruturas de Portugal, SA : <http://81-90-53-65.addr.refertelecom.pt/negocios-e-servicos/lexico/b>

- International Electrotechnical Commission. (2019). *IEC 62402: Obsolescence management*.
- KiCad. (2 de dezembro de 2021). *KiCad EDA - A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*. Obtido de Web site de KiCad: <https://www.kicad.org>
- Koizumi, S. (dezembro de 2013). Advance in Railway Vehicle Technology and Future Prospects Mainly in Relation to Bogie. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report n. 105*, pp. 11-18.
- Koutsougeras, C., Bourbakis, N., & Gallardo, V. J. (2002). Reverse engineering of real PCB level design using VERILOG HDL. *International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications* · June 2002.
- Leso, M. (2017). Its on Railway. *Acta Polytechnica CTU Proceedings 11, Czech Technical University in Prague*, pp. 39-42.
- Mat, R. C., Azmi, S., Daud, R., Zulkifli, A. N., & Ahmad, F. K. (2006). Reverse Engineering for Obsolete Single Layer Printed Circuit Board (PCB) DOI: 10.1109/ICOCI.2006.5276552. *International Conference on Computing & Informatics, 2006*, (pp. 1-7).
- Mat, R. C., Yusof, S. A., Daud, R., Zulkifli, A. N., & Ahmad, F. K. (2006). Reverse engineering for obsolete single layer printed circuit board (PCB) DOI: 10.1109/ICOCI.2006.5276552. *2006 IEEE International Conference on Computing & Informatics (ICOCI 06)*. Kuala Lumpur, MALAYSIA: INFORMS.
- Moreira, P. (3 de agosto de 2022). CP e o investimento em mobilidade sustentável. *MOB Magazine*.
- Multi-cb. (21 de janeiro de 2022). *Circuit board glossary*. Obtido de Web site de Multi-cb: <https://www.multi-circuit-boards.eu/en/glossary/Eurocard.html>

- Olist Serviços Digitais. (14 de dezembro de 2021). *Part number: o que é, para que serve, como funciona, onde usar?* Obtido de Web site de Olist Serviços Digitais: <https://olist.com/blog/pt/gestao-empresarial/operacao-e-logistica/part-number-o-que-e/>
- Popova, I., Evsyukov, V., Danilov, I., Marusin, A., Marusin, A., & Boryaev, A. (2021). Application of digital technologies in railway transport. *International conference of Arctic transport accessibility: networks and systems* (pp. 463-469). ELSEVIER B.V.
- RailSystem. (16 de dezembro de 2021). *Rolling Stock Components*. Obtido de Web site de RailSystem: <http://railsystem.net/>
- Raja, V., & Fernandes, K. J. (2008). *Reverse Engineering: an Industrial Perspective*. London: Springer-Verlag London.
- Rematska, G., & Bourbakis, N. G. (2016). A Survey on Reverse Engineering of Technical Diagrams DOI:10.1109/IISA.2016.7785372. *2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)*, (pp. 1-8).
- RS Components Ltd. (07 de janeiro de 2022). *A Complete Guide to Eurocards*. Obtido de Web site de RS Components Ltd.: <https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/eurocards-pcb-guide>
- SamacSys Ltd. (21 de dezembro de 2021). *Library Loader*. Obtido de Web site de SamacSys Ltd: <https://www.samacsys.com>
- Smith, R. A. (junho de 2001). Railway Technology - The Last 50 Years and Future Prospects. *Japan Railway & Transport Review* 27, pp. 16-24.
- Tech-FAQ. (21 de janeiro de 2022). *MTBF (Mean Time Between Failures)*. Obtido de Web site de Tech-FAQ: <https://www.tech-faq.com/mtbf.html>

- Torrance, R., & James, D. (2007). Reverse Engineering in the Semiconductor Industry DOI: 10.1109/CICC.2007.4405767. *IEEE 2007 Custom Intergrated Circuits Conference (CICC)*, (pp. 429-436).
- Torrance, R., & James, D. (2009). The State-of-the-Art in IC Reverse Engineering DOI: 10.1007/978-3-642-04138-9_26. Em C. Clavier, & K. Gaj, *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2009* (pp. 363-381). Heidelberg: Springer, Berlin.
- Trainlogistic. (5 de setembro de 2022). *Série 2300 - Ficha Técnica*. Obtido de Web site de Trainslogistic:
https://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Gabinete/fich_atm2300.htm
- TSF - Rádio Notícias. (3 de setembro de 2021). *Indústria Automóvel*. Obtido de Web site de TSF - Rádio Notícias: <https://www.tsf.pt/mundo/pode-durar-ate-2023-falta-de-componentes-eletronicos-deixa-industria-automovel-muito-preocupada-14086814.html>
- UIC - International Union of Railways. (2019). *Railway Technical Strategy Europe 2019*. Paris: UIC.
- Younis, B. M., & Tutunji, T. (2012). Reverse engineering course at Philadelphia University in Jordan DOI:10.1080/03043797.2012.658508. *European Journal of Engineering Education*, 37:1, 83-95.

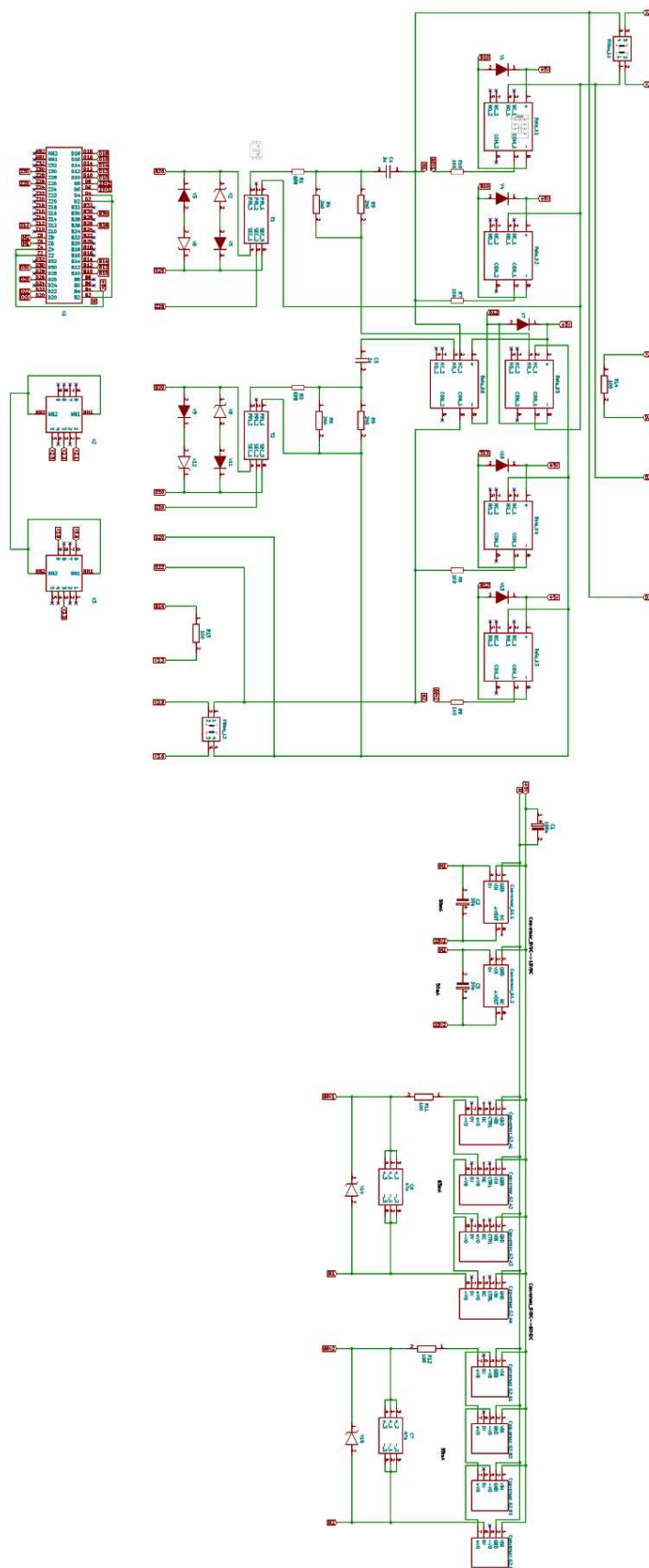
ANEXOS

Anexo A – Listagem de componentes da *eurocard* 6FH8163

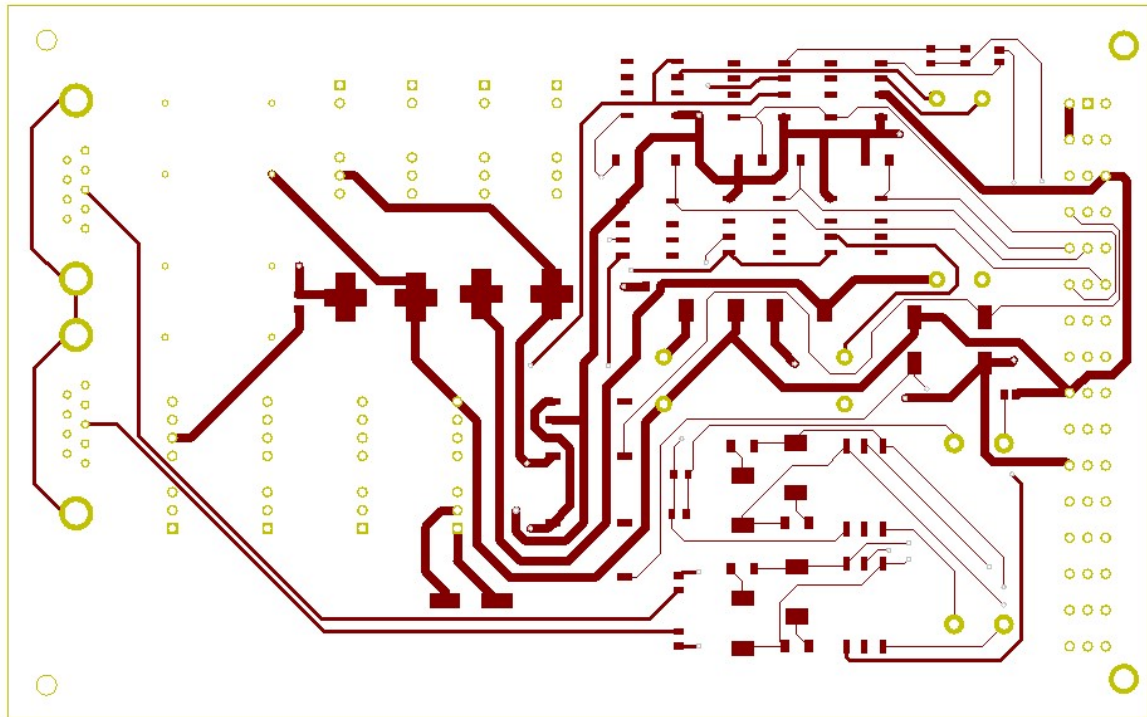
	A	B	C	D	E	F
			Componentes existentes		Componentes propostos	
	Designação	Quant	Referência	Descrição	Referência	Descrição
1						
2						
3	L1,L2	2	B82791-G12-A13	bobina de filtragem		Common-mode chokes, ring core
4	T1,T2	2	UT19158 UMEC	transformador		Surface Mount General Purpose F
5	G2,AX	4	FCU 7-6060-6	conversor DC-DC (G2)		Isolated DC/DC Converters 3W 4.5
6	G2,BX	4				Isolated DC/DC Converters 1W 5V
7	G1,X	2	5 IWR 1-15-15-S IBEX	conversor DC-DC		Isolated Surface Mount DC/DC Co
8	K1,K2,K3,K4,K5,K6	6	RS 5V N96	relé (K1 a 6)		Surface Mounting Relay - Low Sigi
9	V1,V2,V5,V6	4	BZX55C6V8	diodo zener MSC GMP -5 6.8V		ESD Suppressors / TVS Diodes TVS
10	V3,V4,V7,V8,V9,V10,V11,V12	9	1N4148	diodo (5V)		Diodes - General Purpose, Power
11	R1,R2	2		resistencia 6R8J SOBREELEVADA		Metal Film Resistors - Through HC
12	C4,C5	2		condensador (azuis, C4 e C5)		Multilayer Ceramic Capacitors ML
13	R11,R12,R13,R14	4		resistência 100 (1/2W)		Thick Film Resistors - SMD 100 OH
14	R7,R8,R9,R10	4		resistência 1k SOBREELEVADA		Metal Film Resistors - Through HC
15	R3, R4, R5, R6	4		resistência 240 (0,25w)		Thick Film Resistors - SMD 1/4W 2
16	C1	1		condensador 100u 35V		Aluminium Electrolytic Capacitors
17	C2,C3	2		condensador 10u 50V		Aluminium Electrolytic Capacitors
18	C6, C7	2		condensador 47u 100V		Aluminium Electrolytic Capacitors
19	V14,V15	2		diodo zener 75V		ESD Suppressors / TVS Diodes TVS
20	X1	1	9061482901	ficha DIN 41612 F macho F male		DIN 41612 Connectors F male
21	X2,X3	2	1-106505-2	ficha DB 10		D-Sub High Density Connectors 9F

Nota: as referências dos componentes propostos foram omitidas (a cinza) por dever de sigilo e confidencialidade.

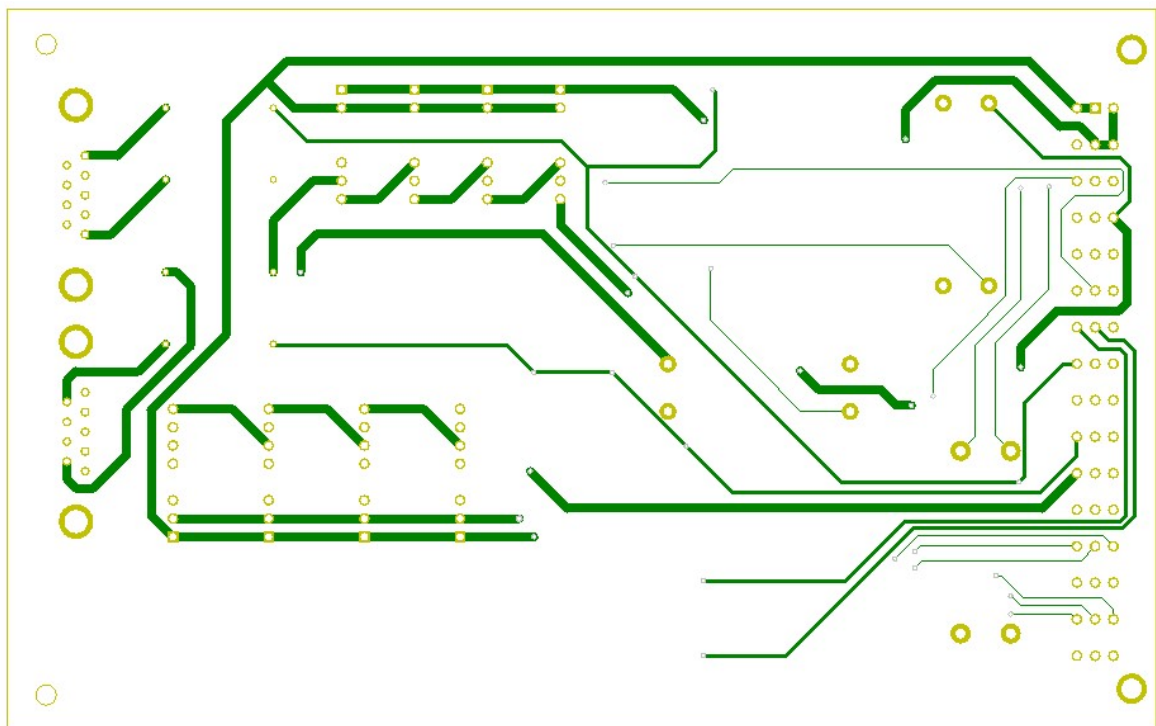
Anexo B – Esquemático da *eurocard* 6FH8163



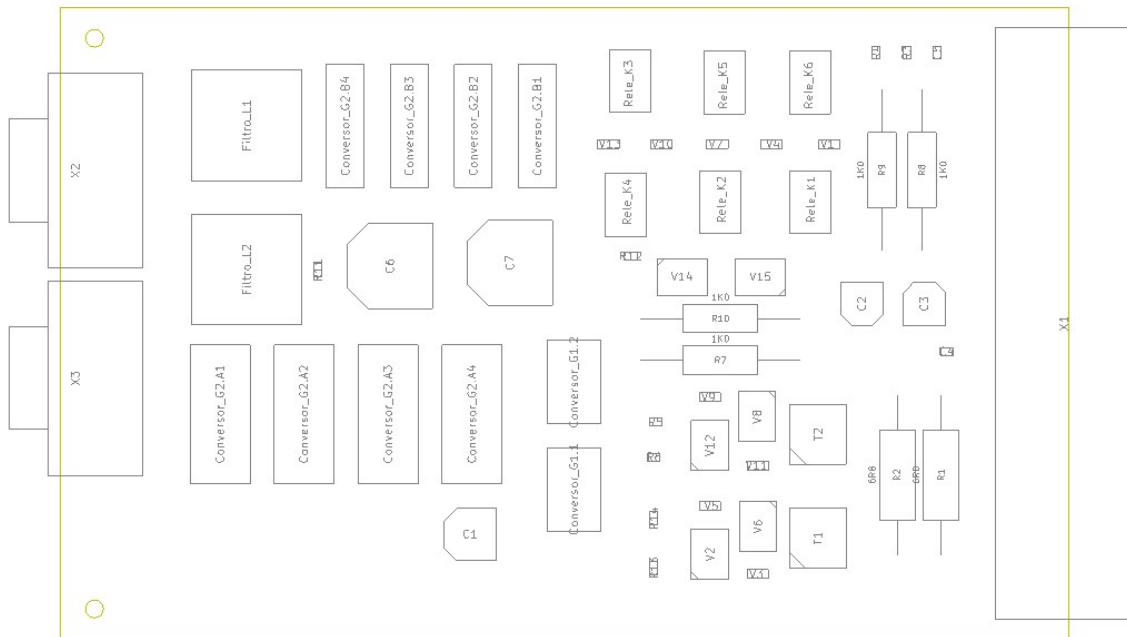
Anexo C – Circuito da *eurocard* 6FH8163



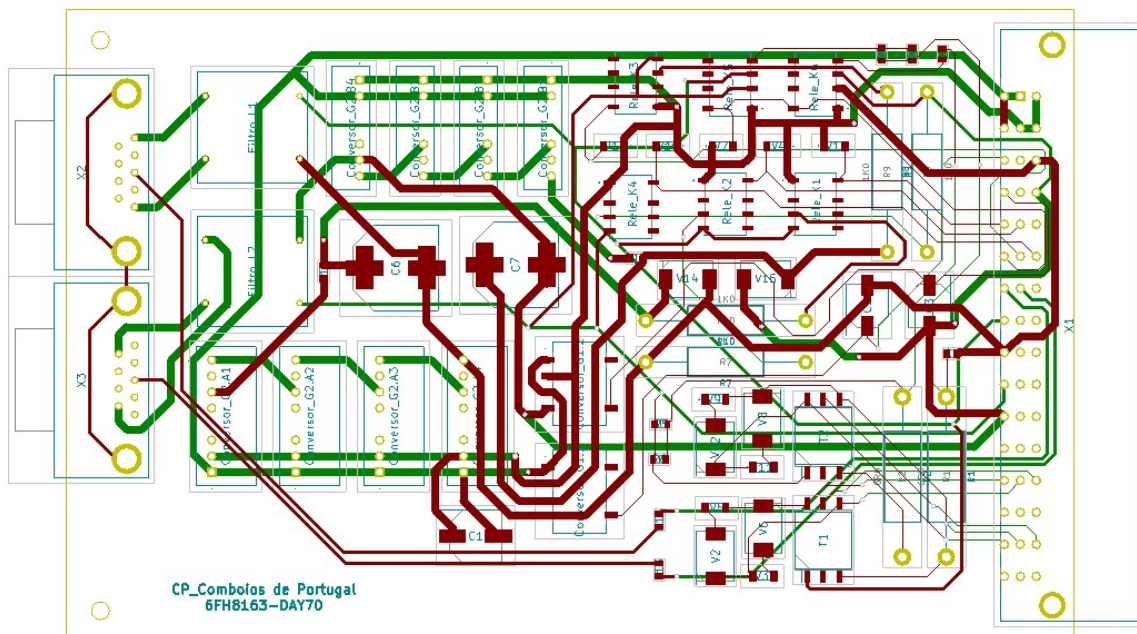
Camada superior



Camada inferior



Disposição dos componentes



Circuito final com as várias camadas