



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Luís Filipe Alves Teixeira

**PROJETO DE NOVA LINHA DE MONTAGEM
AUTOMÁTICA DE INTERRUPTORES DA SÉRIE 21**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na área de Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica no âmbito de Dissertação da Tese de Mestrado

Julho de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Projeto de nova linha de montagem automática de interruptores da série 21

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

New automatic assembly line of series 21 switches project

Autor

Luís Filipe Alves Teixeira

Orientadores

Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes

Engenheiro Luís Carlos Simões Nunes

Júri

Presidente Professor Doutor José António Martins Ferreira
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Orientador Engenheiro Luís Carlos Simões Nunes
Responsável de Automação na empresa EFAPEL S.A.

Vogal Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Professor Associado com Agregação da Universidade de
Coimbra

Colaboração Institucional



**EFAPEL – Empresa Fabril de Produtos
Eléctricos, S.A.**

Coimbra, julho, 2022

“O que é Simples é Genial.”

[Eng. Américo Duarte, Administrador da EFAPEL S.A.]

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Fernando Antunes por toda a disponibilidade e interesse pelo trabalho, bem como todos os conselhos no sentido de o melhorar.

Ao Engenheiro Luís Nunes, pela oportunidade de integrar este projeto que permitiu realizar este trabalho.

Ao Engenheiro João Lima, Diretor do Departamento IDI Processo, por permitir a realização desta dissertação sobre a sua alçada.

A toda a gestão de pessoas da EFAPEL S.A., que me deram a oportunidade deste estágio curricular, em especial à Doutora Teresa Cordeiro que me tratou com imenso carinho e preocupação.

A toda a equipa do IDI Processo, por me auxiliarem no processo de integração e aprendizagem, em especial ao Engenheiro e amigo Tiago Lopes, por todo o apoio prestado e me ensinar tanto num período de tempo tão curto.

A toda a equipa de Manutenção, especialmente ao amigo Rúben Ferreira por todo o companheirismo e ensinamento.

Ao Sr. Carlos do bar do DEM por toda a gentileza demonstrada e tornar todos os dias mais risonhos.

Ao meu grupo de amigos “*Oh Boy*” por terem sido a minha família durante 5 anos e terem tornado Coimbra tão bela.

À minha namorada Madalena Henriques por todo o suporte e inspiração.

Aos meus pais a quem devo tudo.

Resumo

Esta dissertação foi elaborada em ambiente industrial na Unidade de Produção de Serpins, pertencente à EFAPEL - Empresa Fabril de Produtos Elétricos S.A.

Devido às constantes mudanças do mercado e a rapidez que tomam, as empresas enfrentam continuamente novos desafios no que toca a desenvolver ou otimizar processos que maximizem o valor do seu produto ou serviço, ampliem a flexibilidade dos processos, aumentem a capacidade de resposta às necessidades do cliente e conseqüentemente incrementem a competitividade da empresa.

Com uma enorme presença no mercado nacional e internacional e uma dominante quota de mercado, a empresa adota uma filosofia de melhoria contínua dos seus processos e dedica esforços ininterruptos para conservar a qualidade e valor dos seus produtos.

É neste contexto que nasce a motivação para o projeto desta dissertação e se encontra a razão para o investimento da gestão da empresa na otimização dos seus processos.

Esta dissertação está intimamente relacionada com as linhas de montagem de Interruptores Série 21, sendo este produto um grande símbolo da marca EFAPEL e importante para a estratégia atual e futura da empresa. Este projeto inovador tem como objetivo aumentar a cadência de produção e controlo sobre o processo, introduzindo tecnologia automática, segundo um *design* ágil e configurável de forma a aumentar a capacidade de resposta a encomendas e flexibilidade de produção.

Primeiramente foi abordado o processo atual de montagem, de forma a contextualizar a base para todo o trabalho desenvolvido. De seguida é apresentado o *design* do novo processo de montagem automática, desde a estrutura e sequência de produção, ao *layout* e todos os equipamentos concessionados. Neste capítulo são evidenciadas todas as características e medidas tomadas com o objetivo de aumentar a flexibilidade e configurabilidade do processo, e o impacto que têm sobre este. Além disso foi exposto o balanceamento de todas as fases de produção e medidas tomadas para otimizar o processo, inclusive foi feita uma conjectura de tempos dos equipamentos automáticos e uma análise *MTM* de tempos e métodos.

Numa disciplina de automação industrial, são apresentadas as soluções implementadas de automação deste novo processo, nomeadamente todo o sistema de comunicação entre o

controlador e todos os equipamentos que tornam este processo automático. São estas soluções que no futuro vão permitir a ligação entre todos os componentes e garantir a autonomia do processo. Estas soluções vieram resolver várias dificuldades que o processo enfrentava e possibilitar futuros ganhos.

Por fim é demonstrado o trabalho relacionado com a segurança em volta deste processo. Inicialmente foi feita uma identificação de perigos inerentes a todos os equipamentos e uma avaliação de todos os riscos associados, segundo uma metodologia adotada pela empresa, em conformidade com a norma ISO 13849-1:2015. Esta avaliação teve como objetivo dimensionar o nível de função de segurança necessária para combater o respetivo risco. Após isto foram implementadas medidas e dispositivos cuja função de segurança cumprem os mínimos de *performance* de segurança calculados. Esta tarefa além de claramente aumentar a segurança do processo também confere a conformidade com as normas de segurança aplicáveis, necessária para aprovação CE e início de operação.

Palavras-chave: Processo, Otimização, Linha de montagem, Automação, Segurança.

Abstract

This dissertation was carried out in an industrial environment at the Unidade de Produção de Serpins, belonging to EFAPEL - Empresa Fabril de Produtos Elétricos S.A.

Due to the constant changes in the market and the speed they take, companies continually face new challenges when it comes to developing or optimizing processes that maximize the value of their product or service, increase the flexibility of processes, increase the capacity to respond to the needs of the customer and consequently increase the company's competitiveness.

With a huge presence in the national and international market and a dominant market share, the company adopts a philosophy of continuous improvement of its processes and dedicates uninterrupted efforts to preserve the quality and value of its products.

It is in this context that the motivation for the project of this dissertation is born and the reason for the investment of the company's management in the optimization of its processes.

This dissertation is closely related to the assembly lines of Series 21 switches, this product being a great symbol of the EFAPEL brand and important for the company's current and future strategy. This innovative project aims to increase the rate of production and control over the process, introducing automatic technology, according to an agile and configurable design in order to increase the capacity to respond to orders and production flexibility.

The objective of this dissertation was to present the work developed during the curricular internship integrated in this project.

First, the current assembly process was approached, in order to contextualize the basis for all the work developed. Next, the design of the new automatic assembly process is presented, from the structure and production sequence, to the layout and all the equipment under concession. This chapter highlights all the characteristics and measures taken with the aim of increasing the flexibility and configurability of the process, and the impact they have on it. In addition, the balance of all stages of production and measures taken to optimize the process were exposed, including a conjecture of times of automatic equipments and an MTM analysis of times and methods.

In an industrial automation discipline, the implemented automation solutions for this new process are presented, namely the entire communication system between the controller and all the equipment that makes this process automatic. It is these solutions that in the future will allow the connection between all components and guarantee the autonomy of the process. These solutions came to solve several difficulties that the process faced, resulting in several gains, later mentioned, for the company.

Finally, the work related to security around this process is demonstrated. Initially, an identification of hazards inherent to all equipment and an assessment of all associated risks was carried out, according to a methodology adopted by the company, in accordance with the ISO 13849-1:2015 standard. This assessment aimed to measure the level of security function necessary to combat the respective risk. After that, measures and devices were implemented whose safety function meets the calculated safety performance minimums. This task, in addition to clearly increasing the safety of the process, also confers compliance with the applicable safety standards, necessary for CE approval and start-up.

Keywords: Process, Optimization, Assembly line, Automation, Safety.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Siglas e Acrónimos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Importância do tema	1
1.2. Linha de montagem	1
1.3. Automação	2
1.4. Motivação da dissertação	4
1.5. Estrutura da dissertação	4
2. EFAPEL – EMPRESA FABRIL DE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A.	7
2.1. Apresentação da empresa	7
3. Revisão de literatura e estado de arte	9
3.1. Processos produtivos	10
3.1.1. <i>Reconfigurable Manufacturing System</i>	10
3.1.2. <i>Layout</i> e configurações de <i>Layout</i>	11
3.1.2.1. Tipos de configurações	12
3.1.2.1.1. “Layout” por ponto fixo	12
3.1.2.1.2. “Layout” funcional	12
3.1.2.1.3. “Layout” de produto	13
3.1.2.2. Combinação de configurações	13
3.1.2.2.1. Tecnologia de grupo	14
3.1.2.2.1.1. Codificação e classificação	14
3.1.2.2.1.2. <i>Layout</i> celular	15
3.1.3. Linhas de montagem segundo diversidade de produtos	16
3.1.3.1. Linha de montagem simples	17
3.1.3.2. Linha de montagem “ <i>mix</i> -modelos”	17
3.1.3.3. Linha de montagem “multi-modelo”	17
3.1.4. Restrições na instalação de uma linha de montagem	18
3.1.4.1. Rebalanceamento da linha de montagem	18
3.1.4.2. Identidade das estações de trabalho	18
3.1.4.3. Equilíbrio de carga nas estações de trabalho	18
3.1.4.4. Número de operadores	18
3.1.4.5. Restrições ergonómicas	19
3.1.4.6. Restrições de manutenção	19
3.1.4.7. Limitação de espaço físico	20

3.1.5.	<i>Design</i> de equipamentos.....	20
3.2.	Análise de riscos.....	21
3.2.1.	ISO 13849-1 – “ <i>Safety of machinery</i> ”	22
3.2.1.1.	Metodologia <i>Performance Levels (PL)</i>	22
3.2.1.1.1.	Avaliação de riscos	22
3.2.1.1.2.	Determinação do “Performance Level” necessário do “SRP/CS” ...	23
3.2.1.1.3.	Seleção de “SRP/CS” apropriado segundo a categoria	23
3.2.1.1.4.	Avaliação do “Performance Level” do “SRP/CS” selecionado	24
3.2.1.1.4.1.	Categoria.....	24
3.2.1.1.4.2.	<i>Mean Time to Failure (MTTF_d)</i>	25
3.2.1.1.4.3.	<i>Diagnostic Coverage (DC)</i>	25
3.2.1.1.4.4.	Método simplificado de estimativa do <i>PL</i>	25
3.2.1.1.5.	Verificação do “PL” do “SRP/CS”: “PL” ≥ “PL _r ”?	26
3.2.1.1.6.	Representação esquemática	26
3.3.	Automação	27
3.3.1.	Automatismo	28
3.3.1.1.	Entradas.....	29
3.3.1.1.1.	Sensores	29
3.3.1.1.2.	Comando.....	30
3.3.1.2.	Lógica.....	31
3.3.1.2.1.	Autômato	31
3.3.1.2.1.1.	CPU	31
3.3.1.2.1.2.	Memória.....	31
3.3.1.3.	Saídas	32
3.3.1.3.1.	Atuadores.....	32
3.3.1.3.1.1.	Cilindro.....	32
3.3.2.	Protocolo de comunicação	33
3.3.2.1.	PROFINET™.....	33
4.	Introdução ao problema inicial.....	37
4.1.	Descrição dos Produtos e Processo Produtivo	37
4.1.1.	Os Produtos	37
4.1.1.1.	21011 – Interruptor Unipolar	38
4.1.1.2.	21061 – Comutador de Lustre.....	39
4.1.1.3.	21071 – Comutador de Escada.....	39
4.1.1.4.	Componentes.....	40
4.1.1.5.	Sequência de montagem.....	42
4.1.2.	Processo de montagem	43
4.1.2.1.	<i>Layout</i>	43

4.1.2.2.	Tarefas	44
4.1.2.3.	Análise dos tempos	48
5.	Novo Processo	49
5.1.	Objetivos.....	49
5.2.	Automação do Processo	50
5.3.	<i>Layout</i>	52
5.3.1.	Módulo I – Montagem semiautomática das bases.....	53
5.3.2.	Módulo II – Restante montagem automática.....	53
5.3.3.	Módulo III – Embalamento	55
5.3.4.	<i>Layout</i> final.....	56
5.4.	Balanceamento da linha.....	57
5.4.1.	Módulo I – Montagem semiautomática das bases.....	57
5.4.2.	Módulo II – Restante montagem automática.....	58
5.4.3.	Módulo III – Embalamento	64
6.	Automação.....	65
6.1.	Determinação do número de entradas e saídas	65
6.2.	Restrições	65
6.3.	Solução encontrada.....	66
6.3.1.	Series EX 500	66
6.4.	Vantagens	68
7.	Análise de riscos.....	69
7.1.	Metodologia <i>Performance Level</i>	69
7.1.1.	Definição dos limites da máquina	69
7.1.2.	Identificação e Avaliação dos riscos	69
7.1.3.	Seleção de <i>SRP/CS</i> adequado	71
7.1.3.1.	Proteções fixas.....	71
7.1.3.1.	Sensores magnéticos de segurança	71
7.1.3.2.	Relé de segurança	73
7.1.3.1.	Válvula anti-retorno pilotado.....	74
7.1.4.	Verificação final	75
8.	Conclusões.....	77
8.1.	Trabalho futuro	79
8.2.	Última nota	79
	Referências Bibliográficas.....	81
	Anexo A.....	85
	Anexo B.....	87
	Anexo C.....	93
	Apêndice I.....	95
	Apêndice II.....	97
	Apêndice III.....	99
	Apêndice IV.....	103

Apêndice V..... 105
Apêndice VI 107
Apêndice VII..... 109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Certificações de Qualidade, SST e Ambientais	8
Figura 3.1. Combinação de sistema dedicado e flexível	11
Figura 3.2. Capacidade vs. variedade dos diferentes sistemas produtivos	11
Figura 3.3. Esquema de determinação de PL_r para a função de segurança, (ISO, 2015), <i>Figure A.1)</i>	23
Figura 3.4. Gráfico de determinação de PL de <i>SRP/CS</i> , (ISO, 2015), <i>Figure 5</i>	26
Figura 3.5. Metodologia PL : (a) Identificação e avaliação de risco (<i>Figure 1</i>); (b) Processo iterativo de <i>design</i> de <i>SRP/CS</i> (<i>Figure 3</i>). (ISO, 2015).....	27
Figura 3.6. Indústria 4.0	28
Figura 3.7. Estrutura simplificada de um automatismo.....	29
Figura 3.8. Estrutura base de um automatismo	29
Figura 3.9. Conceito simplificado de funcionamento de sensor	30
Figura 3.10. Princípio de funcionamento de um <i>PLC</i>	32
Figura 3.11. Estrutura de comunicação <i>PROFINET™</i> , (<i>Profinet Technology</i>).....	34
Figura 3.12. Exemplo de comunicação segundo <i>PROFINET™</i> , (<i>The Difference between PROFIBUS and PROFINET, 2010</i>).....	34
Figura 4.1. Distribuição da produção anual de séries.....	37
Figura 4.2. Análise ABC de produtos da série 21	38
Figura 4.3. Interruptor Unipolar 21011 e seu funcionamento (<i>EFAPEL S.A., 2022</i>).....	39
Figura 4.4. Comutador de Lustre 21061 e seu funcionamento (<i>EFAPEL S.A., 2022</i>).....	39
Figura 4.5. Comutador de Escada 21071 e seu funcionamento (<i>EFAPEL S.A., 2022</i>).....	40
Figura 4.6. a) <i>CAD</i> de Interruptor Unipolar; b) Vista explodida.....	40
Figura 4.7. <i>Layout</i> da linha de montagem atual de Interruptores da Série 21	44
Figura 4.8. Fase 1 da montagem.....	45
Figura 4.9. Fase 2 da montagem.....	46
Figura 4.10. Fase 3 da montagem.....	46
Figura 4.11. Embalamento e etiquetagem	47
Figura 5.1. Objetivos deste projeto.....	49
Figura 5.2 Novo esquema de montagem	50
Figura 5.3. Sequência de montagem e automatização de tarefas	51
Figura 5.4. Montagem semiautomática de bases.....	53

Figura 5.5. Módulo de montagem automática.....	54
Figura 5.6. Módulo de montagem automática 3D.....	55
Figura 5.7. Posto de embalagem	56
Figura 5.8. <i>Layout</i> final	56
Figura 5.9. Balanceamento do Módulo I – Montagem semiautomática das bases	58
Figura 5.10. Gráfico de distribuição de tempo do Módulo II	63
Figura 5.11. Gráfico de análise de tempos – Módulo II.....	63
Figura 5.12. Balanceamento do Módulo III – Embalamento	64
Figura 6.1. Restrições de ligação entre equipamentos automáticos.....	66
Figura 6.2. Descrição de interface <i>I/O</i> , (<i>SMC</i>).....	67
Figura 6.3. Diagrama da rede de comunicação	68
Figura 7.1. Proteção fixa (gaiola).....	72
Figura 7.2. Sensor magnético (<i>PSEN 1.1p-22/ 8 mm</i>), (<i>PILZ</i>).....	72
Figura 7.3. Esquema elétrico redundante (<i>PSEN 1.1p-22/ 8 mm</i>), (<i>PILZ</i>).....	73
Figura 7.4. <i>Relé de segurança (PNOZ X2.8P)</i> , (<i>PILZ</i>)	73
Figura 7.5. Válvula anti-retorno pilotado	74
Figura 7.6. Esquema e funcionamento de Válvula anti-retorno pilotado a) Recuo do atuador; b) Avanço do atuador; c) Função de <i>stop</i> em caso de paragem de fornecimento de ar comprimido	75
Figura A. 1. Robot não colaborativo, (<i>EPSON</i>).....	85
Figura A. 2. Mesa rotativa indexada, (<i>WEISS</i>)	86
Figura B. 1. <i>Series EX500 - Fieldbus Gateway Decentralised System 2 (128 Points)</i> , (<i>SMC</i>)	87
Figura B. 2. <i>Gateway Unit (EX500-GPN2)</i> , (<i>SMC</i>)	88
Figura B. 3. <i>Input Unit (EX500-DXPA)</i> , (<i>SMC</i>)	89
Figura B. 4. <i>Power Supply Cable (PCA-1416000)</i> , (<i>SMC</i>).....	90
Figura B. 5. <i>Branch Cable (EX500-AC030-SAPA)</i> , (<i>SMC</i>).....	90
Figura B. 6. Cable with connector (<i>PCA-1446566</i>).....	91
Figura B. 7. <i>Field wireable connector (PCA-1446553)</i> , (<i>SMC</i>)	91
Figura B. 8. <i>Cable M12-RJ45 connector (EX9-AC050EN-PSR)</i> , (<i>SMC</i>)	91
Figura II. 1 Alimentação automática de bases	97
Figura II. 2. Robot colaborativo – (<i>DOBOT MG400, s.d.</i>)	97
Figura II. 3. Ninho de posicionamento de bases montadas.....	98
Figura II. 4. Calcador de molas de condutor	98
Figura III. 1. Posicionador.....	99

Figura III. 2. Mesa rotativa indexada com prato rotativo montado.....	99
Figura III. 3. <i>Robot</i> não colaborativo, (<i>EPSON</i>)	99
Figura III. 4. Alimentação de massa.....	100
Figura III. 5. Doseador de massa.....	100
Figura III. 6. Alimentador de tampas	101
Figura III. 7. Alimentador de garras por vibradores.....	101
Figura III. 9. Suporte da Aparafusadora e alimentação de parafusos por vibradores.....	102
Figura III. 8. Máquina de porta tecla e respetiva alimentação	102
Figura IV. 1 Posto de embalagem	103
Figura IV. 2. Posto de embalagem	103
Figura IV. 3. Dispensador de etiquetas.....	104
Figura V. 1. Cabo de ligação <i>PROFINET</i> TM	105
Figura V. 2. Esquema de comunicação contextualizado	106
Figura VI. 1. Sensores magnéticos (<i>PSEN 1.1p-22/ 8 mm</i>) aplicados, (<i>PILZ</i>).....	107
Figura VI. 2. Relé de segurança (<i>PNOZ X2.8P</i>) aplicado, (<i>PILZ</i>).....	108
Figura VII. 1. Esquema de operações.....	109
Figura VII. 2. Operações de Pegar (<i>MTM Association, 2019</i>)	110
Figura VII. 3. Operações de Mover (<i>MTM Association, 2019</i>).....	110
Figura VII. 4. Operações de Soltar (<i>MTM Association, 2019</i>).....	110
Figura VII. 5. Operações de Alcançar (<i>MTM Association, 2019</i>).....	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Tipos de configuração de <i>layout</i> , (<i>Plant Layout, 2013</i>)	16
Tabela 3.2. Tipos de diversidade de produção	17
Tabela 3.3. Tabela de determinação de PL_r para a função de segurança	23
Tabela 3.4. Relação entre <i>PL</i> e Categoria de <i>SRP/CS</i>	24
Tabela 3.5. Tipos de Categoria de <i>SRP/CS</i> , (<i>ISO, 2015</i>).....	24
Tabela 3.6. Classificação de $MTTF_d$, (<i>ISO, 2015</i>), <i>Table 5</i>	25
Tabela 3.7. Classificação de <i>DC</i> , (<i>ISO, 2015</i>), <i>Table 6</i>	25
Tabela 3.8. Tipos de configuração da rede de comunicação, (<i>The Difference between PROFIBUS and PROFINET, 2010</i>).....	35
Tabela 4.1. Materiais e componentes de montagem de Interruptor Unipolar	41
Tabela 4.2. Sequência de montagem de Interruptor Unipolar	42
Tabela 4.3. Tarefas da sequência de montagem	44
Tabela 5.1. Levantamento de equipamentos – Módulo II	59
Tabela 6.1. Comparação de protocolos, (<i>SMC</i>).....	67
Tabela 7.1. Avaliação de riscos	70
Tabela 7.2. Ficha técnica <i>PNOZ X2.8P</i> , (<i>PILZ</i>)	73
Tabela I. 1. Listagem de componentes dos diferentes produtos.....	95
Tabela I. 2. Análise de tempos de montagem do Interruptor Unipolar - 21011	95
Tabela I. 3. Análise de tempos de montagem do Comutador de Lustre - 21061	96
Tabela I. 4. Análise de tempos de montagem do Comutador de Escada - 21071	96
Tabela VI. 1. Normas harmonizadas aplicáveis na avaliação de risco	107
Tabela VII. 1. Análise <i>MTM</i> – Análise de Tempos (<i>MTM Association, 2019</i>).....	109
Tabela VII. 2. Relação entre <i>TMU</i> e tempo real (<i>MTM Association, 2019</i>)	111

Siglas e Acrónimos

RMS – *Reconfigurable Manufacturing System*

DMS – *Dedicated Manufacturing System*

FMS – *Flexible Manufacturing System*

PL – *Performance Level*

SRP/CS – *Safety-related Parts of Control System*

MTTF – *Mean Time to Failure*

DC – *Diagnostic Coverage*

PLC – *Programmable Logic Controller*

CPU – *Central Processing Unit*

SST – *Segurança e Saúde no Trabalho*

TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

UDP/IP – *User Datagram Protocol/ Internet Protocol*

NRT – *Non Real Time*

RT – *Real Time*

IRT – *Isochronous Real Time*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

I/O – *Inputs/Outputs*

MTM – *Methods-time measurement*

TMU – *Time Measuring Unit*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do tema

Num mercado cada vez mais competitivo, as empresas devem maximizar a sua eficiência e fornecer soluções inovadoras, individuais e complexas de alta qualidade a baixos custos para acompanhar a concorrência de mercado atual (Becker & Scholl, 2003).

O mercado mundial atual é resultado de uma constante evolução em termos de exigência e flexibilidade, propulsionado por progressos tecnológicos, filosóficos e preocupação pela segurança.

Com o passar do tempo, o cliente evoluiu em termos de exigência devido a vários fatores como o aumento do poder de compra, a competitividade das empresas e os meios de acesso como a *Internet*. Essa exigência levou a uma necessidade de capacidade de customização de produtos que vão de encontro às exigências de qualidade, sem comprometer a capacidade de produção desses produtos. Isto lançou um novo desafio às empresas de expandir a sua flexibilidade e adaptabilidade de forma a serem capazes de reagir rapidamente e economicamente às constantes mudanças no mercado (Putzer & Onken, 2003) .

1.2. Linha de montagem

Linhas de montagem são sistemas de produção orientados para o fluxo originalmente desenvolvidas para a produção industrial de grandes quantidades de produtos padronizados e que vêm ganhando importância crescente para a produção de pequenos volumes de produtos customizados (Otto & Li, 2020), na medida em que o mercado exige maior variedade de produtos. Zhang, et al. (2018) descrevem este sistema como uma série de postos de trabalho, cada um associado a uma ou várias tarefas pré-especificadas, de montagem manual, tecnologicamente auxiliada ou automatizada, pelas quais um ou mais produtos são montados sequencialmente.

Este tipo de sistema produtivo foi popularizado por Henry Ford, quando desenvolveu uma linha de montagem de produção de grande volume com muito pouca flexibilidade, caracterizada por produzir apenas um produto em grande quantidade, com um planeamento

de montagem sequencial, dividido em tarefas relativamente simples sem necessidade de especialização.

No entanto, devido a vários fatores socioeconómicos, como poder de compra, globalização, meios de comunicação, marketing, tecnologias, e culturais como moda e religião, o cliente evoluiu, bem como as suas exigências, gostos e preferências. Isto levou à necessidade de as empresas introduzirem flexibilidade nos seus processos, de forma a satisfazer os seus clientes em termos de qualidade, variedade e rapidez, sem perder a competitividade com os custos associados. Paralelamente cresceu o facto do tremendo aumento de competitividade industrial de modo transversal, o que forçou as empresas a tomar medidas de inovação e desenvolvimento de processos como a linha de montagem, de modo a obter alguma vantagem preciosa sobre os rivais. McMullen & Frazier (1997) enaltecem claramente a necessidade das empresas oferecerem produtos com maior valor agregado pelo menor custo e tempo de resposta no sentido de permanecerem competitivas.

Devido a esta necessidade das empresas em expandir os limites dos seus produtos com alto grau de customização, mantendo os níveis de qualidade a um baixo custo, empresas como a EFAPEL S.A. reúnem esforços de melhoria dos seus processos, especialmente as linhas de montagem de variados produtos, com o intuito de eliminar o máximo de desperdícios e assim diminuir custos de produção e agregar valor aos seus produtos.

Esta abordagem é justificada pelos resultados do estudo feito por Nof, Wilhelm, & Warnecke (1997), concluindo que, quando se encaram operações industriais de uma forma global, as operações de montagem representam mais de 50% do tempo total gasto na produção, cerca de 20% dos custos totais de produção e envolvem uma grande quantidade da mão de obra.

Torna-se assim do interesse da EFAPEL S.A. apostar na otimização das suas linhas de montagem visto serem uma boa oportunidade de valorizar a sua marca.

1.3. Automação

Surge agora uma tendência paralela relacionada com a estratégia de otimização de processos, eliminação de ineficiências e diminuição de custos.

A globalização da indústria em conjunto com avanços tecnológicos levou a uma partilha de informação e técnicas, e consequente aplicação de tecnologia inovadora em processos como linhas de montagem.

O trabalho manual e processos sequenciados têm progressivamente sido sujeitos a introdução de sistemas automáticos com capacidade de exponenciar a quantidade de produtos fabricados, baixando em geral os custos associados. Em paralelo a digitalização tem acompanhado a introdução destes sistemas, com processos equipados com sensores e outros equipamentos de controlo, capazes de gerar uma base de dados, e métodos de simulação de modelos de linhas de montagem (Michalos, Makris, Papakostas, Mourtzis, & Chryssolouris, 2010).

O conceito de Automação consiste então num conjunto de técnicas de controlo, das quais é criado um sistema ativo, capaz de fornecer uma resposta adequada em função das informações que recebe do próprio processo que está a controlar. Reunindo todos os parâmetros, o sistema é capaz de executar a melhor ação a ser tomada.

Estes sistemas foram desenvolvidos de forma a maximizar a produção e minimizar custos, além de eliminar possíveis riscos envolvidos na produção, sendo capaz de realizar tarefas de alto risco para o utilizador com grande precisão (Battaia, Delorme, Dolgui, & Grimaud, 2013).

A EFAPEL S.A. é um grande exemplo de aplicação de tecnologia automática, já com vários processos muito avançados no prisma de automação e a colher atualmente vários frutos resultantes desse investimento. Para mais, a tendência do mercado e a introdução da Indústria 4.0, brevemente explicada como fábricas inteligentes com sistemas automáticos de produção e redes de digitalização de processos, motiva ainda mais estes esforços de automação e otimização de processos.

Além da óbvia redução de custos, esta introdução de tecnologia pode trazer inúmeras vantagens tais como:

- Aumento da flexibilidade do processo;
- Customização de processos;
- Melhor planeamento de produção;
- Melhor planeamento de manutenção;
- Maior controlo sobre o processo;
- Base de dados;
- Melhor capacidade de resposta a encomendas;
- Melhor controlo de *stocks*.

1.4. Motivação da dissertação

Num mercado cada vez mais global e competitivo, a EFAPEL S.A. necessita de otimizar a eficiência com que utiliza os seus processos produtivos, especialmente as linhas de montagem, de forma a diminuir os custos de produção e ganhar assim uma vantagem competitiva em relação aos concorrentes.

Em paralelo, a crescente evolução tecnológica que assistimos permite cada vez mais a automação industrial dos processos e assim atingir os objetivos estratégicos da empresa.

A combinação dos dois primeiros parágrafos resulta numa motivação para estudar melhorias da linha de montagem de interruptores da série 21, aplicando tecnologias e mecanismos que visam tornar o processo o mais autónomo possível, diminuir tempos de ciclos e custos associados e aumentar a configurabilidade e flexibilidade da célula de produção.

1.5. Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo é dedicado à introdução da dissertação, explicando a motivação e a base para a realização deste trabalho.

No capítulo seguinte é apresentada a empresa na qual foi realizado o estágio curricular e proporcionou a oportunidade de integrar o projeto onde se insere esta dissertação.

No terceiro capítulo está presente toda a revisão de literatura feita de modo a criar e preparar bases para a realização do trabalho. Este capítulo foi importante para assimilar novos conceitos e aprender novas temáticas que enriqueceram o conhecimento industrial do autor e o prepararam para enfrentar o desafio.

No quarto capítulo é introduzido o processo atual de montagem, objeto de estudo desta dissertação, de forma a contextualizar e criar uma plataforma para a realização das tarefas.

No quinto capítulo é apresentado o novo processo de montagem de interruptores série 21, resultado de vários esforços de conceção e *design* de equipamento e fruto de decisões tomadas que proporcionaram características vantajosas ao processo, tendo em conta os objetivos definidos.

No sexto capítulo é abordado o trabalho de pesquisa e escolha de soluções industriais de automação, mais propriamente o sistema de comunicação de todos os componentes, dando autonomia ao processo.

No sétimo capítulo é mostrado todo o trabalho no âmbito de segurança no trabalho, no contexto deste novo processo. Aqui é explicada a metodologia usada para a avaliação de riscos e as medidas de função de segurança adotadas em resposta a essa avaliação.

No oitavo capítulo está presente a conclusão deste trabalho, onde é resumido e descrito todo o trabalho feito, conclusões tiradas deste e as dificuldades encontradas ao longo do estágio. Além disso são identificadas algumas tarefas de complementação do que foi feito, no sentido de completar este mesmo projeto.

2. EFAPEL – EMPRESA FABRIL DE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A.

2.1. Apresentação da empresa

Fundada em 1978, a EFAPEL- Empresa Fabril de Componentes Elétricos S.A. dedica-se à investigação, desenvolvimento e produção de componentes elétricos com grande presença no mercado e ótima competitividade. A sua gama de produtos vai desde calhas, opções de aparelhagem e acessórios para instalações elétricas.

A empresa tem uma localização privilegiada no centro de Portugal, no distrito de Coimbra, com uma equipa de cerca de 500 colaboradores, distribuídos por 5 modernas unidades industriais com uma área de superfície total de 36.000 m².

Uma filosofia de domínio completo de processos, um grau elevado de requisitos de qualidade, uma mentalidade de constante inovação e procura incessante de satisfação das necessidades e exigências dos clientes permitem a esta empresa ser uma referência no mercado, como símbolo de excelência no domínio das soluções elétricas.

A EFAPEL S.A. orgulha-se dos seus valores de ética com enorme honestidade e seriedade, rigor com cumprimento dos compromissos assumidos com todas as partes interessadas, dinamismo com uma forte orientação para mudança e aprendizagem e criatividade na procura constante por ideias inovadoras.

O sucesso desta empresa deve-se em grande parte ao seu regime de políticas como a priorização do cliente, otimização de processos, respeito e dever para com os fornecedores, cumprimento de legislação e outros requisitos aplicáveis e uma filosofia de melhoria contínua do desempenho da organização.

Esta empresa compromete-se constantemente a agregar e garantir o máximo de valor ao cliente, de forma a ir de encontro às suas exigências, tentando otimizar e desenvolver diariamente os seus produtos e processos com eficiência e eficácia, eliminando o máximo de desperdício possível, de forma a obter a melhor relação Qualidade/Preço.

O compromisso desta empresa com as normas de segurança e bem-estar de todos os trabalhadores garante locais de trabalhos seguros, saudáveis e a participação dos colaboradores nestas matérias. Além disso leva a cabo medidas de sensibilização e cuidado

ambiental. Isto aliado a uma formação de colaboradores cuidada e pensada promove um bom ambiente de trabalho, cultivando motivação e criatividade entre todos os envolvidos.

Como prova da sua excelência, a EFAPEL S.A. é reconhecida e certificada relativamente à sua Gestão de Qualidade, Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho e Gestão Ambiental pela Associação Portuguesa de Certificação.



Figura 2.1. Certificações de Qualidade, SST e Ambientais

É também importante de salientar que a EFAPEL S.A. participou num projeto de investimento denominado “Compete 2020” com financiamento da União Europeia com o Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, com o objetivo de incentivar à investigação, inovação e desenvolvimento tecnológico e produtivo. Este projeto abrangeu a obtenção recursos tecnológicos, físicos e humanos com o objetivo de inovar e melhorar produtos de qualidade a preços competitivos. Além disso usou o dinheiro para construir um novo edifício e em esforços de marketing para aumentar o valor da marca EFAPEL.

3. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DE ARTE

Este trabalho centra-se no projeto de conceção e implementação de uma nova linha de montagem automática de interruptores série 21, levado a cabo pelo Departamento IDI Processo da empresa EFAPEL – Empresa Fabril de Produtos Elétricos, S.A.

De todas as tarefas envolvidas e necessárias para o sucesso deste projeto, o objetivo desta dissertação é dar a conhecer o trabalho desenvolvido, mais especificamente na fase de *design* de todo o processo, desde o tipo de produção e *layout* da linha até ao *design* de equipamentos pertencentes ao novo processo. Foi também feita uma abordagem ao balanceamento da linha usando várias ferramentas de medição de tempo e métodos. Além disso, será abordado o sistema de comunicação de toda a linha, responsável por dar autonomia ao processo, diagnosticar falhas e fornecer maior controlo sobre o processo. Por fim serão expostos alguns temas relacionados com a segurança do processo, como a análise de riscos da linha e todas as medidas aplicadas em conformidade com as necessidades de função de segurança.

Primeiramente deve ser feita uma revisão de literatura sobre a temática de processo produtivos, de forma a entender melhor que tipo de processos existem, a previsão futura do mercado e como esta afeta o *design* de processos, de forma a reunir as características que permitam atingir os objetivos do processo.

De seguida aprofunda-se o conhecimento sobre a tecnologia de automação, responsável por tornar o processo anteriormente mencionado quase autónomo, com mínima intervenção humana. São abordados os automatismos, sistemas estruturados de comunicação entre vários dispositivos e mecanismos, que permitem uma ligação e sequência de sinais e movimentos que tornam o processo automático e passível de customização. Adicionalmente é abordada a temática de protocolo de comunicação entre todos estes dispositivos.

Por fim é explicada a metodologia de análise de riscos utilizada para identificar os perigos ao longo da linha, avaliar esses riscos e assim tomar medidas adequadas de implementação de funções de segurança. Estas medidas vão ao encontro de normas internacionais aplicáveis, de forma a tornar o processo seguro e certificado para operação e produção.

3.1. Processos produtivos

No atual mercado altamente competitivo, para uma empresa ser relevante, o seu sistema de produção deve ser simultaneamente eficiente a nível de custo e tempo e capaz de ser flexível.

Apesar de a capacidade de resposta ainda não ser considerada com a mesma importância do custo e qualidade, o seu impacto é cada vez mais evidente e imperativo, pois pode ser uma vantagem competitiva chave num mercado turbulento. Um sistema de produção ágil é aquele que tem a capacidade de se ajustar consoante as flutuações da procura de produto e cuja funcionalidade pode abranger novos produtos.

Em 1998 um estudo efetuado nos Estados Unidos da América denominado “*Manufacturing Challenges 2020*” concluiu que a tendência acima mencionada se irá manter, e um dos seis maiores desafios do futuro é a habilidade de reconfigurar sistemas de produção de forma rápida em resposta às oportunidades e necessidades em constante mudança (Benderbal & Benyoucef, 2019).

3.1.1. *Reconfigurable Manufacturing System*

Desta necessidade nasce um novo conceito chamado *RMS (Reconfigurable Manufacturing System)*, onde equipamentos, componentes, ferramentas ou dispositivos de *software* podem ser removidos, adicionados, modificados ou trocados em resposta à necessidade de reagir rapidamente e eficientemente aos requisitos permutáveis.

Este sistema de produção altamente configurável é fruto de desenvolvimento lógico de duas filosofias de produção já existentes e polarizadas (Figura 3.1):

- O *DMS (Dedicated Manufacturing System)* caracterizado por produzir uma pequena gama de produtos em grande volume, com um processo especializado para esse propósito, normalmente com equipamentos e ferramentas fixas;
- O *FMS (Flexible Manufacturing System)* pelo contrário é capaz de produzir uma variada gama de produtos em volumes ajustáveis, com processos configuráveis e passíveis de diferentes *setups*.

Como podemos observar na Figura 3.2, o *Reconfigurable Manufacturing System (RMS)* é uma combinação de sistemas dedicados e sistemas flexíveis, procurando agrupar as vantagens da capacidade produtiva do primeiro e a flexibilidade do segundo.

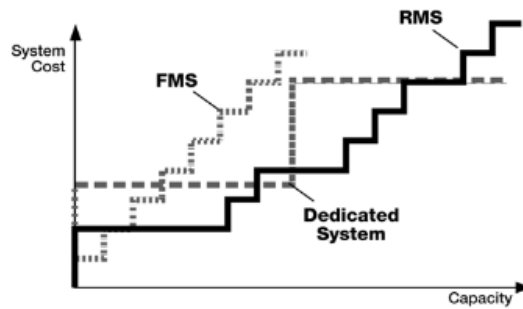


Figura 3.1. Combinação de sistema dedicado e flexível

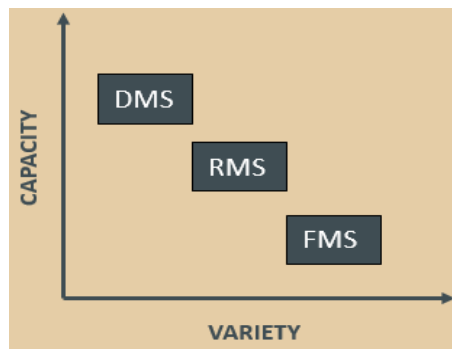


Figura 3.2. Capacidade vs. variedade dos diferentes sistemas produtivos

3.1.2. *Layout e configurações de Layout*

O *layout* define-se como um arranjo ou rearranjo da localização física de várias máquinas e equipamentos existentes num determinado local de forma a contribuir para a redução de desperdícios de movimentos e tarefas, com o objetivo de otimizar o processo (Francis, McGinnis, & Jr., 1992). Diferentes configurações de *layout* (Tabela 3.1) permitem que este apresente certas características desejáveis relacionadas com vários parâmetros como a capacidade necessária, a flexibilidade pretendida, o tipo de produto, filosofia de produção e complexidade de processos. Com a correta configuração de *layout* é possível alcançar alguns ganhos como:

- Minimização do investimento em equipamentos;
- Minimização do tempo de produção;
- Minimização do tempo de *setup*;
- Otimização do espaço disponível;
- Melhores condições de trabalho e higiene;
- Flexibilidade de processo;
- Menor carga de trabalho e melhor ergonomia de operações dos colaboradores

3.1.2.1. Tipos de configurações

3.1.2.1.1. “Layout” por ponto fixo

Caracteriza-se por o produto permanecer estacionário enquanto os materiais, componentes, ferramentas, equipamentos e mão de obra necessários à sua fabricação se movimentam à sua volta.

É utilizado essencialmente para o fabrico de produtos singulares de grandes dimensões e elevados custos (ex.: navio), visto que o produto está centrado no plano de trabalho e a sequência e detalhe da operação é premeditada pelo operador. Posto isto, este modelo pode ter algumas desvantagens como a necessidade de *setup* e o controlo e planeamento da produção.

Apresenta como principais vantagens:

- Minimização do movimento de material;
- Minimização do capital necessário;
- Continuidade de operações devido ao paralelismo e independência destas;
- O planeamento de cada unidade de produto é independente (ex.: cada navio tem a sua localização);
- Flexibilidade e mudança de *design* e volume.

Por outro lado, apresenta algumas desvantagens:

- Necessidade de especialização da mão de obra;
- O movimento dos equipamentos e *setups* destes pode ser consumidor de tempo;

3.1.2.1.2. “Layout” funcional

O *layout* funcional consiste em organizar em células equipamentos com natureza ou tipo de operação semelhantes, como maquinação, pintura ou soldadura, independentemente dos produtos associados a cada posto. Este *layout* é adaptado para baixo volume e produção pouco repetitiva de produtos standardizados.

Os principais pontos fortes são:

- Menor investimento em equipamentos que podem exercer função em vários produtos diferentes;
- Supervisão mais eficiente com especialização num tipo de máquinas;
- Maior flexibilidade de distribuição de carga pelos postos;

- Maior controlo sobre tarefas complexas ou de precisão devido à especialização de cada célula;
- Avarias podem ser lidadas mais facilmente.

As suas desvantagens são:

- Maior tempo de ciclo devido a transferência e espera entre células;
- Maior probabilidade de haver tarefas garrafão;
- Maior área ocupada;

3.1.2.1.3. “Layout” de produto

Este *layout* agrupa diferentes postos de trabalho de acordo com a sequência dos produtos a estes associados. É adaptado para produção repetitiva estandardizada de grande volume. A matéria-prima é fornecida no início da linha e movimenta-se entre os postos de trabalho de acordo com a sequência de tarefas, da maneira mais eficiente possível, até atingir o estado de produto final no fim da linha.

As suas vantagens são:

- Menor custo de manuseamento de material;
- Menos carga nos processos;
- Menos área ocupada devido ao movimento do material e ausência de inventário intermédio;
- Controlo de processo mais simples;
- Tempo total de produção minimizado.

No outro extremo do espetro:

- Dificuldade em aplicar flexibilidade de processos;
- Variações de volume de produção têm grande impacto no custo de produção;
- Suscetibilidade a paragem indefinida devido a qualquer avaria;

3.1.2.2. Combinação de configurações

A grande maioria das pequenas e médias empresas enfrentam o desafio de produzir uma variada gama de produtos, em volume considerável. Posto isto, optam por uma

combinação de *layout*, reunindo características e benefícios associados a cada uma (Kiran, 2022).

3.1.2.2.1. Tecnologia de grupo

Face à necessidade de produção de vários produtos em grande quantidade e todos os seus desafios adjacentes surgiu o conceito de “Tecnologia de Grupo”, descrito como uma filosofia produtiva de agrupar vários produtos com semelhanças em geometria, processos de produção, natureza de produção e aplicações, num mesmo processo produtivo, de forma a aumentar a flexibilidade, estandardização e conseqüentemente a produtividade geral da empresa (Nancy & Wemmerlöv, 1984).

Por outras palavras, este conceito envolve a produção de vários modelos diferentes de vários produtos, com semelhanças em algum aspeto crítico que os relacione intimamente, num processo capaz de compreender todos estes. Isto resulta numa unidade de produção a manufaturar vários modelos dos quais vários componentes variam ligeiramente em certos parâmetros, sendo apenas necessário executar um *setup* mínimo para cada modelo ou mesmo fazer calibração de algumas ferramentas em equipamentos comuns (Mitrofanov, 1966).

3.1.2.2.1.1. Codificação e classificação

De forma a identificar atributos e características similares, várias empresas optaram por um sistema de codificação de todos os materiais relacionados com os processos de produção, particularmente as matérias-primas, equipamentos e a sua natureza de funcionamento e produtos finais acabados.

Vários tipos de códigos já foram implementados e há um constante estudo de criação de novas metodologias. A chave de eficiência da codificação está na capacidade de abranger todos os atributos relacionados com a produção como a forma dos produtos, as suas dimensões e detalhes geométricos, o tipo de material, acabamentos superficiais e de *performance*, tolerâncias, etc. Logicamente, cada empresa usa apenas as características significantes no seu código (Nancy & Wemmerlöv, 1984).

Após a codificação de todos os produtos, os códigos podem ser organizados e classificados em famílias, de forma a realçar a intimidade entre eles, e a sua capacidade de serem reunidos nos mesmos processos produtivos. Isto é observável posteriormente na introdução aos produtos relacionados com este projeto.

3.1.2.2.1.2. *Layout* celular

Uma aplicação de “Tecnologia de Grupo” contextualizada pode ser identificada num *layout* celular entendido como um método *lean* de produzir vários produtos usando células, entendidas como uma coleção de ferramentas e equipamentos intimamente relacionados à produção dos produtos associados (Flanders, 1925). Cada célula é maior que apenas um equipamento, mas menor que um departamento inteiro, podendo ser projetadas para um processo específico, componente ou um produto completo.

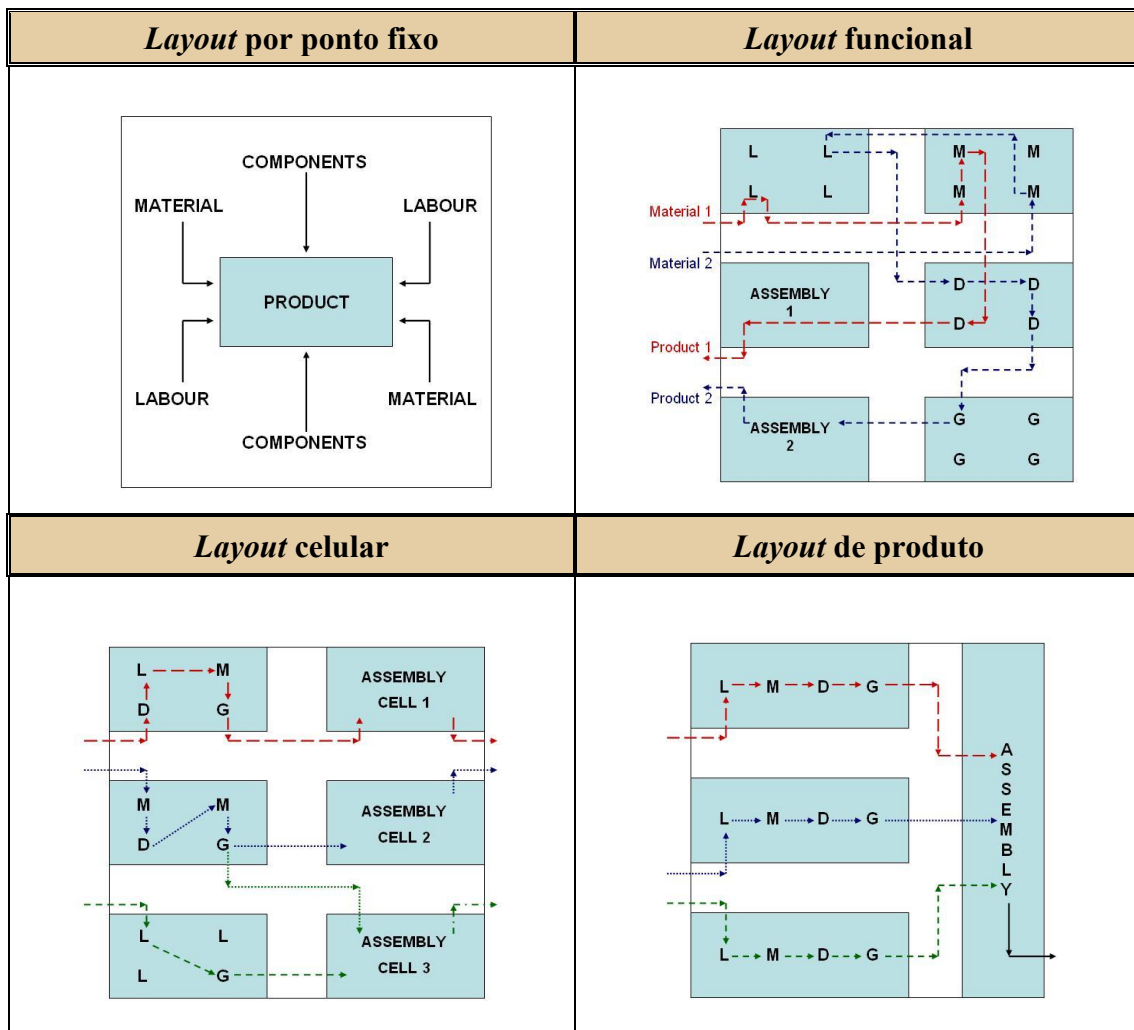
De modo semelhante às vantagens anteriormente mencionados temos:

- Redução de manuseamento e trânsito de materiais;
- Redução do tempo de *setup*;
- Redução de inventário intermédio;
- Otimização do uso de Recursos Humanos;
- Células multidisciplinares e multifuncionais;
- Facilidade em automatizar e controlar processos.

Em contraste:

- Componentes classificados em famílias pouco apropriadas;
- Custos de multi-especialização de colaboradores;
- Mais capital investido.

Tabela 3.1. Tipos de configuração de layout, (*Plant Layout, 2013*)



3.1.3. Linhas de montagem segundo diversidade de produtos

As linhas de montagem agrupam-se em 3 categorias gerais (Tabela 3.2) quando se trata da gama de produtos e respetivo número de modelos produzidos por esse processo. O conceito mais arcaico é a produção repetitiva do mesmo produto ao longo da linha, que foi muito utilizado na fase inicial da revolução industrial caracterizadas por um mercado estático e pouco complexo. Por outro lado, devido à evolução do mercado, competitividade das empresas e detalhe da vontade dos clientes foi introduzida uma filosofia de produção de vários produtos na mesma linha de montagem. Dependendo da especificidade do processo e *performance* desejada isto pode ser feito com um processo capaz de produzir diferentes produtos.

3.1.3.1. Linha de montagem simples

A linha de montagem simples é caracterizada como processo de fabrico de um único produto em grande escala, de forma repetitiva e constante com o objetivo singular de volume de unidade (Groover, 2019). Isto resulta numa diminuição de custos devido ao grande volume de produção e maior rapidez de cumprimento de encomendas. No entanto, no mercado atual, este processo não é viável em maior parte das indústrias, devido à necessidade de flexibilidade nos sistemas produtivos.




3.1.3.2. Linha de montagem “mix-modelos”

A linha de montagem “mix-modelos” tem a capacidade de agrupar uma pluralidade de modelos no seu processo produtivo, podendo assim satisfazer as crescentes necessidades de clientes já constatadas e responder mais eficazmente à complexidade e números das encomendas. No entanto, de forma a sequenciar tarefas apropriadas para cada produto, existem pausas e interrupções do processo produtivo inerentes à customização das operações e planeamento destas, o que se traduz numa perda de eficiência.

3.1.3.3. Linha de montagem “multi-modelo”

A linha de montagem “multi-modelo” tem o mesmo princípio do modelo anterior, no entanto este necessita de *setup* do processo de forma a adaptar a condição deste para a fabricação de cada produto. Este *setup* é melhor explicado como uma definição de parâmetros do processo entre ordens de produção diferentes, de forma a preparar o processo para cada produto (Becker & Scholl, 2003). No entanto este procedimento pode tomar algum tempo e criar quebras de produção consideráveis.

Tabela 3.2. Tipos de diversidade de produção

Simple	Mix-modelos	Multimodelo
		

3.1.4. Restrições na instalação de uma linha de montagem

Durante o projeto de instalação de uma linha de montagem encontram-se vários desafios relacionados com a realidade do tipo de indústria e os produtos associados.

3.1.4.1. Rebalanceamento da linha de montagem

Em grande parte das indústrias já existe algum tipo de sistema produtivo, sendo todas as alterações e reconfigurações uma tentativa de melhoria. Sendo assim, é necessário fazer uma nova parametrização e balanceamento do processo consoante o nível de objetivos, muitas vezes causada pela introdução de novos produtos ou variações no volume de produção (Falkenauer, 2013). Boysen, Schulze, & Scholl (2022) definem balanceamento como um exercício de otimização, que divide toda a carga de um processo produtivo, de acordo com tarefas sobre limitação procedimental. O problema mais básico de cada divisão é maximizar o *output* de acordo com os recursos disponíveis. Por outro lado, após definido e fixo o valor de *output* do processo, é possível minimizar os custos dos recursos necessários.

3.1.4.2. Identidade das estações de trabalho

Esta restrição está relacionada com a identidade e características de cada estação de trabalho. Falkenauer (2013) descreve característica de estação de trabalho como a sua configuração e elevada especificidade para um processo, tornando difícil a sua adaptação a outros métodos produtivos. O maior exemplo trata-se de um posto de trabalho com equipamentos especializados e muito especificados para uma tarefa (ex.: fresadora).

3.1.4.3. Equilíbrio de carga nas estações de trabalho

De forma a aumentar a eficiência de todos os postos de trabalho e correspondentes tarefas ao longo da linha, a carga de trabalho deve ser distribuída o mais uniforme possível por todas as estações, evitando assim sobrecarga de postos, tempos de espera intermédios e aumentar o rendimento geral do processo. Este aspeto é exponencialmente importante com o número de produtos ou modelos diferentes associados ao processo e o número de operadores nos diferentes postos, visto que as especificações diferentes de cada produto se podem traduzir em balanceamentos díspares.

3.1.4.4. Número de operadores

Em muitas indústrias, principalmente as de maior dimensão e expressivas globalmente (ex.: indústria automóvel), há uma necessidade de criar postos de trabalhos com

múltiplos operadores. Isto deve-se a vários fatores como o elevado volume de produção necessário, a complexidade das operações, seja devido ao pormenor da tarefa ou uso de equipamento pesado, uma gestão de qualidade mais exigente e maior capacidade de resolução de problemas. No entanto, podem surgir vários constrangimentos nas interações de vários operadores, como por exemplo a dependência de tarefas de diferentes operadores, em que um atraso de um operador pode colocar toda a linha em *standby*, a sincronização dos operadores em tarefas que assim o exijam, a partilha de ferramentas e a divisão do espaço de trabalho.

Tendo em conta todos os aspetos mencionados, o balanceamento e otimização do *layout* da linha tornam-se chaves para um funcionamento correto, eficiente, suave e controlado.

3.1.4.5. Restrições ergonómicas

Ergonomia é a ciência que estuda a interação entre o Homem e o seu envolvimento existencial (Rebelo, 2004), com o objetivo de otimizar esta promovendo segurança, bem-estar e a eficácia do processo que engloba estas tarefas. A qualidade destas interações está relacionada com a relação do Homem (necessidades, características, capacidades, competências e limitações) com as exigências das tarefas que tem de realizar.

No meio industrial Rebelo (2004) refere três aspetos fundamentais segundo a ótica ergonómica. O homem e as suas características físicas, cognitivas, sociais, idade e a influência da idade, sexo, competência e motivação. Por outro lado, o envolvimento físico do seu posto de trabalho com dimensões de espaço e *layout*. Em consequência de tarefas com fracas interações ergonómicas surgem a fadiga, problemas físicos e psicológicos ou sociais.

Estas ciências têm aplicação em toda a gama de trabalhos, desde trabalho de secretária ao computador à manipulação de produtos enormes com maquinaria pesada e exigente ou postos de difícil e constrangedor acesso.

3.1.4.6. Restrições de manutenção

Durante toda a fase de conceção e implementação da linha de montagem, devem ser consideradas todas as ações relacionadas com a área de Manutenção de Equipamentos, desde medidas de manutenção preventiva a trabalhos de manutenção corretiva.

Os problemas mais correntes desta falha de julgamento na implementação da linha são as restrições de acesso a equipamentos, falta de standardização de componentes e métodos e falta de condições de medição de propriedades. Estes percalços resultam muitas vezes em tempos elevados de paragem que prejudicam a disponibilidade da linha, menores tempos de vida de componentes e menor segurança de processos. Tudo isto converge num aumento de custos e de detrimento de processos que podem pôr em causa a fiabilidade do projeto e a estratégia da empresa.

3.1.4.7. Limitação de espaço físico

Uma das maiores, se não a maior, restrição aquando da instalação da linha de montagem é a limitação de espaço físico disponível. Dependendo das características do processo, o espaço físico pode ser um fator decisivo na *performance* deste. O espaço influencia fatores como o *layout* da linha, a sequência de movimentos e tarefas, o posicionamento dos operadores, condicionamento da manutenção e balanceamento da linha.

Relativamente ao armazenamento e alimentação de componentes, é usual encontrar-se carros de estantes com caixas destinadas a diferentes componentes relativos ao respetivo posto de trabalho, lembrando uma espécie de supermercado disponibilizado ao operador (Phillips, 1997).

Em muitas indústrias, é comum encontrar-se grandes parques de máquinas de produção, na maior parte das vezes com um *layout* eficiente de espaço, com máquinas paralelas e orientadas no mesmo sentido, de forma a não restringir o movimento do operador, facilidade de identificação das máquinas e facilitar a sua operação e manutenção.

3.1.5. Design de equipamentos

Segundo Leonesio et al. (2013) equipamentos devem resultar de um processo de configuração proximamente relacionada com a análise de famílias de produtos, referenciada já anteriormente no subcapítulo “Codificação e classificação”, requisitos de qualidade do processo e identificação do número mínimo de requerimentos do equipamento que completam todas as restrições do processo. Isto faz com que o *design* de equipamentos e planeamento do processo andem de mãos dadas, onde os atributos geométricos e cinemáticos do equipamento influenciam a acessibilidade e operabilidade dos diferentes postos de trabalho em conjunto com a configuração do sistema geral e os impactos das dinâmicas entre equipamentos na qualidade da peça e nos custos totais.

Esta relação entre os equipamentos e o processo a que pertencem deve ser abordada segundo vários tópicos como a avaliação das capacidades dos equipamentos para realizar estatisticamente o processo (Newman, Nassehi, Imani-Asrai, & Dhokia, 2012), a execução das tarefas dos equipamentos com vários recursos (Wang, Feng, & Cai, 2003), o planeamento energético eficiente (Ippolito, De Filippi, & Micheletti, 1980) e o impacto do comportamento dinâmico entre equipamentos na definição do plano de processo (Wang, Keshavarzmanesh, Feng, & Buchal, 2008).

Leonesio et al. (2013) dividiram o processo de balanceamento entre *design* de equipamento e planeamento de processo em quatro passos:

O primeiro passo foca-se na análise da peça a ser trabalhada, com a definição das operações do equipamento, a identificação da característica relacionada com a operação do equipamento (ex.: uma junta soldada está relacionada com a operação de soldadura) e a relação entre estes dois pontos.

O segundo passo utiliza a informação geométrica e tecnológica relacionada com uma família de produtos em conjunto com a previsão de procura e evolução de produto para criar um domínio de equipamentos com operações gerais que respeitem os requisitos produtivos dinâmicos e estáticos destes dois primeiros passos. No entanto, em casos de *design* de equipamentos para venda, nenhum produto em específico é considerado, havendo independência entre os dois primeiros passos.

No terceiro passo é feita uma simulação dinâmica das soluções encontradas no passo anterior, tendo em conta os atributos relacionados com a operação do equipamento. O comportamento das várias soluções do equipamento é avaliado consoante vários aspetos chave, como o consumo energético, desgaste, rugosidade, esforço, rapidez, robustez, etc.

Por fim, são filtrados apenas os atributos vantajosos ao equipamento e processo e é definida o *setup* da peça a ser trabalhada, principalmente a sua orientação durante a sequência de processo, e conseqüentemente o planeamento de tarefas respeitando esse *setup*.

3.2. Análise de riscos

Uma das tarefas abordadas neste trabalho e realizada durante o estágio curricular foi a análise de riscos de toda a nova linha de montagem automática, numa fase final de *design*, com vários elementos da linha já definidos como os equipamentos, os transportes e os *robots*.

A metodologia utilizada neste projeto, e uniforme a todos os processos da EFAPEL S.A., foi a referenciada pela norma ISO 13849-1 - “*Safety of machinery – Safety related parts of control systems – General principles for design*”.

3.2.1. ISO 13849-1 – “Safety of machinery”

Esta norma fornece requerimentos de segurança e orientação para o *design* e integração de dispositivos ou medidas de controlo de sistema relacionados com a segurança (*SRP/CS*).

Este documento oferece um método de relacionar riscos de segurança com o nível de performance necessário dos *SRP/CS* para o correto e seguro funcionamento do processo. Este procedimento é independente do tipo de tecnologia e energia utilizados e não especifica nenhum exemplo, cabendo ao utilizador utilizar corretamente esta metodologia. É de notar que esta norma está preparada para dispositivos controlados por sistemas eletrónicos programáveis.

3.2.1.1. Metodologia Performance Levels (PL)

O âmbito do seguimento deste procedimento é identificar o nível de *performance* necessário do sistema de controlo, tendo em conta os riscos associados ao equipamento.

De um modo simples, um dispositivo ou medida de controlo *SRP/CS* executa as suas funções a um nível de *performance* específico e inerente, atingindo uma redução de risco mensurável e fixa. Esta metodologia serve então para selecionar o nível de *performance* do *SRP/CS* necessário para diminuição de riscos.

Numa fase inicial devem ser especificados os limites da máquina, ou seja, a função do equipamento e o domínio da sua utilização.

De seguida devem ser identificados os perigos da utilização da máquina e com esta informação analisar e avaliar os riscos associados.

3.2.1.1.1. Avaliação de riscos

Na fase de avaliação de riscos devem ser considerados três fatores principais: A severidade de possível lesão (S); a frequência do perigo (F) e a probabilidade de evitar o perigo (P).

Neste método todos os fatores são binários, ou seja, o fator S divide-se em S1 (baixa severidade - Reversível) e S2 (alta severidade – Não reversível); F1 (baixa frequência -

Ocasional) e F2 (alta frequência - Frequente) e por fim P1 (alta probabilidade de evitar o perigo - Possível) e P2 (baixa probabilidade de evitar o perigo - Improvável).

3.2.1.1.2. Determinação do “Performance Level” necessário do “SRP/CS”

A combinação destes fatores é utilizada para avaliar e determinar o nível de performance necessária (PL_r) do sistema de controlo (SRP/CS) (Figura 3.3 & Tabela 3.3).

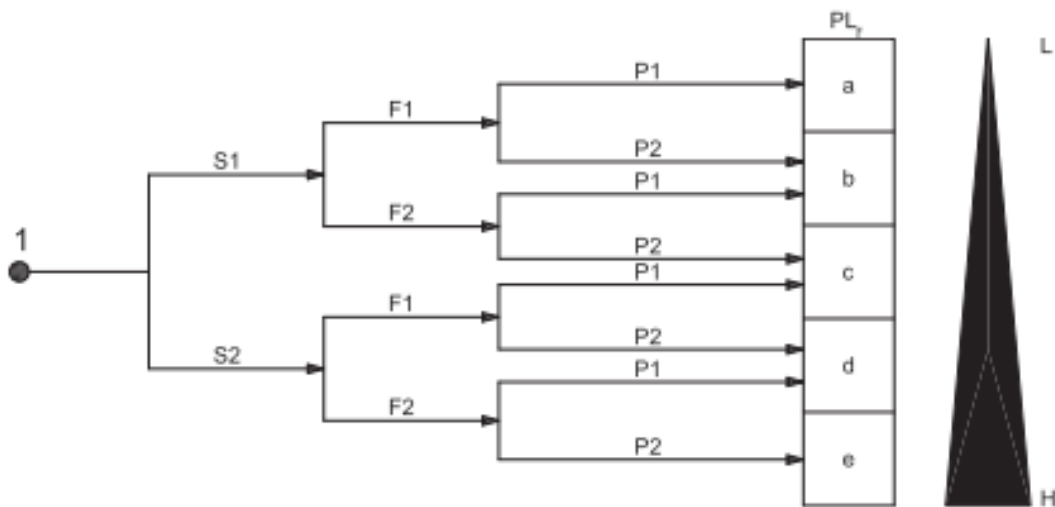


Figura 3.3. Esquema de determinação de PL_r para a função de segurança, (ISO, 2015), Figure A.1)

Tabela 3.3. Tabela de determinação de PL_r para a função de segurança

Tabela para determinação da probabilidade de falhas exigida por hora do SRP/CS (PL_r)							
Gravidade da lesão (S)	Frequência de exposição ao perigo (F)	Possibilidade de evitar o perigo (P)	PL_r				
			a	b	c	d	e
Reversível (1)	Ocasional (1)	Possível (1)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
		Improvável (2)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Frequente (2)	Possível (1)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
		Improvável (2)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Irreversível (2)	Ocasional (1)	Possível (1)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
		Improvável (2)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Frequente (2)	Possível (1)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
		Improvável (2)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Verde - Probabilidade de falha exigida;
Azul - Probabilidade de falha a cima do exigido.

3.2.1.1.3. Seleção de “SRP/CS” apropriado segundo a categoria

Após a avaliação do risco e a determinação do Performance Level do SRP/CS necessário pela Tabela 3.4, devem ser implementadas as medidas ou dispositivos que correspondam às necessidades de categoria necessária:

Tabela 3.4. Relação entre *PL* e Categoria de *SRP/CS*

Relação entre <i>PL</i> e a Categoria do <i>SRP/CS</i>	
<i>PL</i>	Categoria do <i>SRP/CS</i>
a	Categoria B
b	Categoria B
c	Categoria 2
d	Categoria 3
e	Categoria 4

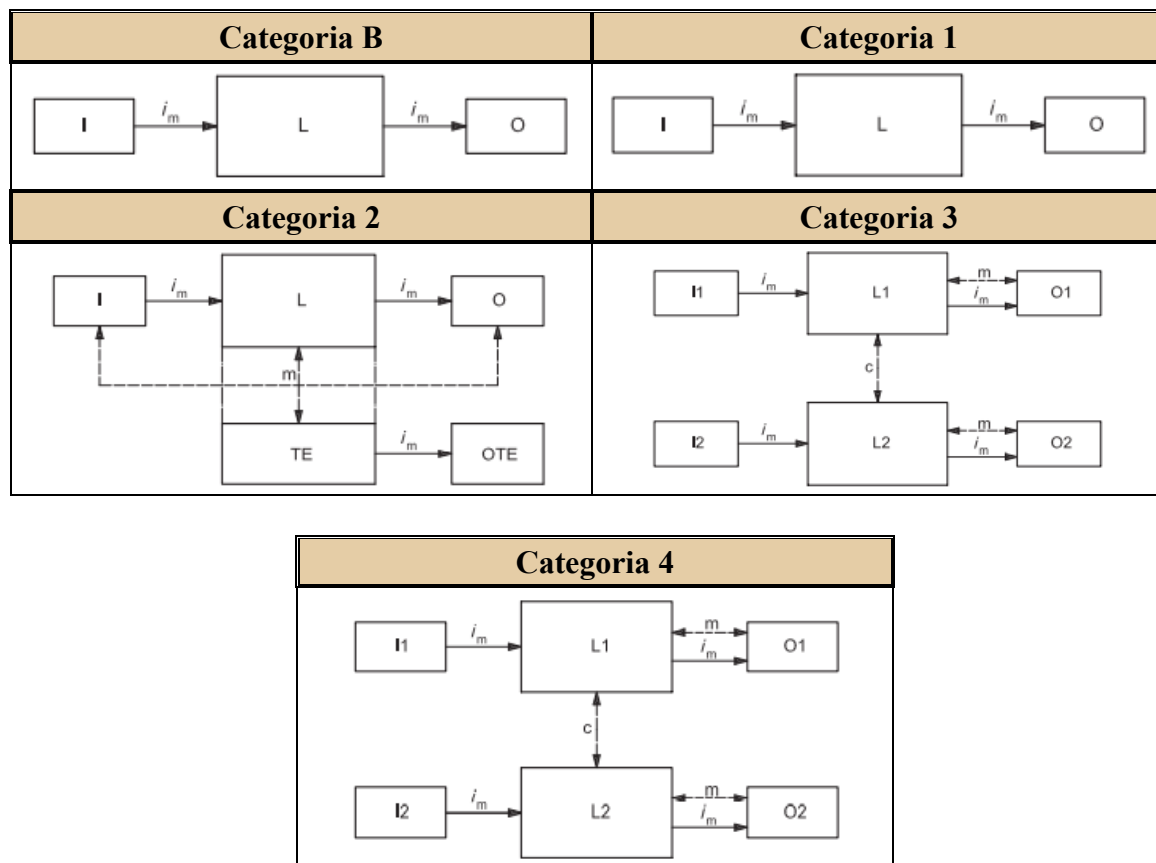
3.2.1.1.4. Avaliação do “Performance Level” do “SRP/CS” selecionado

Seguidamente à escolha do *SRP/CS* apropriado, é necessário verificar o *PL* tendo em conta vários fatores: Categoria; *Mean Time to Failure (MTTF_d)* e *Diagnostic Coverage (DC)*.

3.2.1.1.4.1. Categoria

Categoria de um *SRP/CS* é definida como a classificação relativamente à sua resistência a falhas e o seu comportamento em condição de falha, alcançados pelo arranjo estrutural (Tabela 3.5), deteção de falha e fiabilidade do *SRP/CS*.

Tabela 3.5. Tipos de Categoria de *SRP/CS*, (ISO, 2015)



Resumindo, a categoria pode ser interpretada como o nível de fiabilidade de um *SRP/CS* em cumprir a sua função de redução de risco. A maior fiabilidade é alcançada com redundância, definida como repetição de componentes e vias lógicas em paralelo de forma a assegurar a função de segurança.

3.2.1.1.4.2. Mean Time to Failure (MTTF_d)

Nesta norma, o tempo médio entre falhas (“MTTF_d”) é dado em três níveis (Tabela 3.6) e deve ser considerado para cada canal de redundância individualmente.

Tabela 3.6. Classificação de *MTTF_d*, (ISO, 2015), Table 5

MTTF _d	
Denotation of each channel	Range of each channel
Low	3 years ≤ MTTF _d < 10 years
Medium	10 years ≤ MTTF _d < 30 years
High	30 years ≤ MTTF _d ≤ 100 years

3.2.1.1.4.3. Diagnostic Coverage (DC)

O *Diagnostic Coverage (DC)* quantifica a eficácia do diagnóstico implementado no sistema. Pode também ser considerada como a razão matemática entre o número de falhas detetadas/controladas por um mecanismo de Segurança e o número total de falhas.

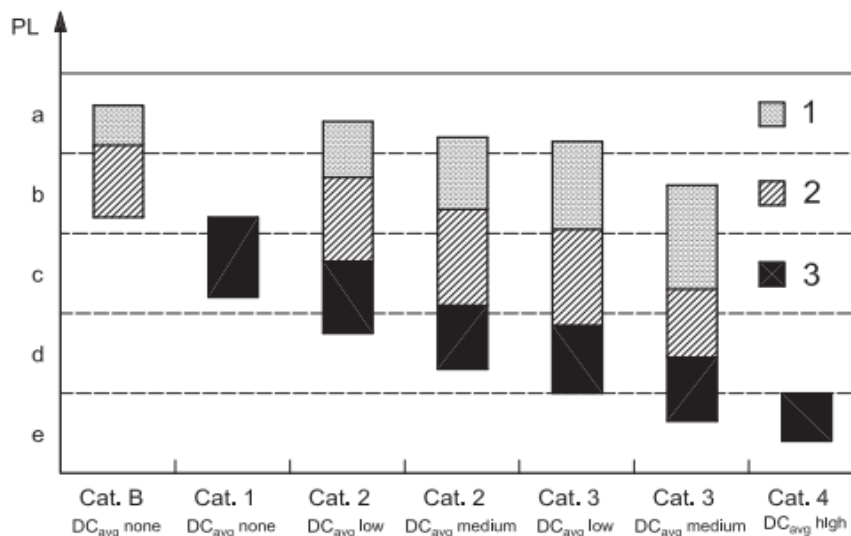
Este fator divide-se em 4 classes (Tabela 3.7):

Tabela 3.7. Classificação de *DC*, (ISO, 2015), Table 6

DC	
Denotation	Range
None	DC < 60 %
Low	60 % ≤ DC < 90 %
Medium	90 % ≤ DC < 99 %
High	99 % ≤ DC

3.2.1.1.4.4. Método simplificado de estimativa do *PL*

Combinando os fatores anteriores é possível estimar o *Performance Level* do *SRP/CS* usando ferramentas já testadas presentes na norma ISO 13849-1 (Figura 3.4):



Key
 PL performance level
 1 MTTF_d of each channel = low
 2 MTTF_d of each channel = medium
 3 MTTF_d of each channel = high

Figura 3.4. Gráfico de determinação de PL de SRP/CS, (ISO, 2015), Figure 5

3.2.1.1.5. Verificação do “PL” do “SRP/CS”: “PL” ≥ “PL_r”?

Se a condição deste subcapítulo se confirmar, então o SRP/CS é fiável o suficiente para cumprir a sua função de segurança, tendo em conta os riscos associados.

Em contraste, se o cenário for contrário, o processo deve ser repetido de novo, dando a esta metodologia uma natureza iterativa.

3.2.1.1.6. Representação esquemática

Pelos seguintes diagramas (Figura 3.5) é possível analisar todos os passos descritos anteriormente. Como já referido este processo tem uma natureza iterativa e relaciona diretamente a fase inicial de identificação e avaliação de risco, e a posterior tradução deste em Performance Level necessário pelo SRP/CS para cumprir a função de segurança.

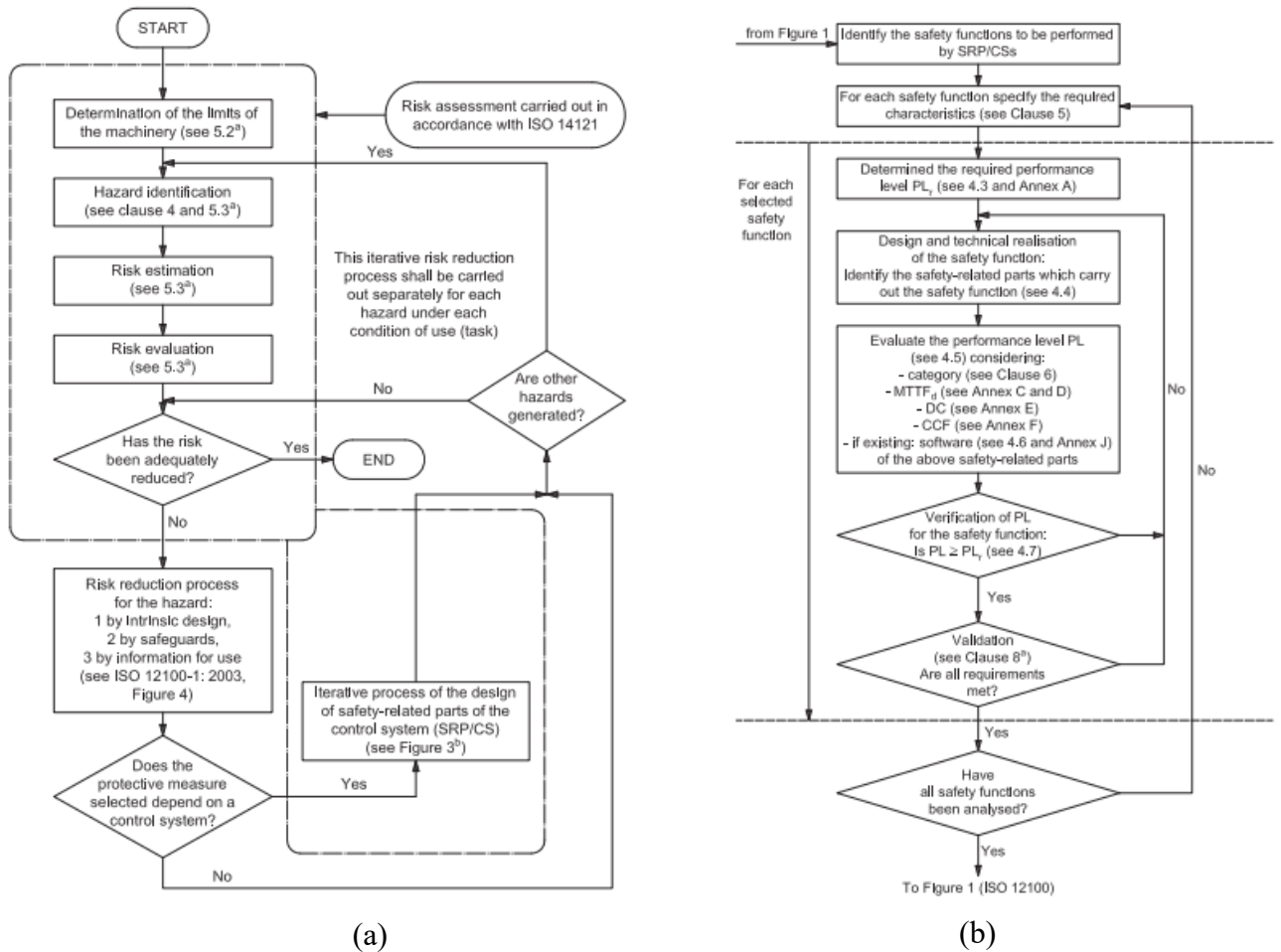


Figura 3.5. Metodologia PL: (a) Identificação e avaliação de risco (Figure 1); (b) Processo iterativo de design de SRP/CS (Figure 3). (ISO, 2015)

3.3. Automação

A manufatura moderna enfrenta atualmente três principais desafios: maior qualidade a custos mais baixos, melhoria de produtividade e flexibilidade e agilidade dos seus processos, visto que as empresas precisam de responder a um mercado muito dinâmico com ciclos de vida de produtos cada vez menores devido à evolução do cliente e competitividade entre empresas.

De forma a garantir a concorrência dos seus produtos, as empresas necessitam de processos eficientes e controlados de produção, com foco em automação, digitalização, e computadorização com *softwares* dedicados. Posto isto, o objetivo é utilizar sistemas semiautónomos com necessidade mínima de intervenção humana.

Atualmente a maior parte os sistemas de produção são compostos por vários subsistemas que operam sequencialmente desde a matéria-prima ao produto acabado. Se bem projetados, estes sistemas necessitam apenas de uma simples parametrização de forma a executar as suas tarefas (Figura 3.6). Se essa parametrização for possível de ser comandada remotamente por meios automáticos, o sistema torna-se quase autónomo e independente de operadores exceto em caso de falhas e manutenção preventiva. Isto resulta num aumento significativo de eficiência e agilidade (Pires, 2005).



Figura 3.6. Indústria 4.0

3.3.1. Automatismo

Um automatismo é um mecanismo que permite ao sistema funcionar de forma quase autónoma, sendo a intervenção do operador reduzida ao nível de mínima.

Para tal é necessário ter dispositivos capazes de avaliar um parâmetro de condição de estado do sistema, sendo este parâmetro relevante ao funcionamento e à falha deste, e comparar com o valor estabelecido com o normal, e em caso de discordância comunicar ao dispositivo de lógica. Num automatismo, estes dispositivos são considerados como entradas, pois é o sinal destes que vai desencadear um comando por parte do dispositivo de lógica ao sistema de atuação afeto ao parâmetro específico dos dados de entrada (Pires, 2000).

O dispositivo de lógica é responsável por receber sinais de entrada caracterizados por definir a conformidade ou não de um parâmetro de condição de estado do processo, e consoante o sinal recebido deve enviar comandos às saídas afetas à atuação relacionada com os parâmetros característicos do sinal de entrada. Numa linguagem mais leve, o dispositivo de lógica é um bloco programável que define as características de funcionamento de todo o sistema automático, permitindo atuar as saídas em função dos dados recebidos na entrada. Este dispositivo é muitas vezes programável pois cada processo tem características de deteção das entradas diferentes, bem como sistemas atuadores de intervenção destas. Assim é possível programar a lógica de funcionamento deste sistema automático, desde a sequência

de ações aos tempos pretendidos entre cada fase, tornando assim um sistema autónomo customizado.

As saídas são responsáveis por atuar ou sinalizar sobre as características relativas aos dados de entrada, sendo possível corrigi-las ou apenas avisar operadores sobre a não conformidade do processo.

Este módulo é melhor assimilado pelas figuras Figura 3.7 e Figura 3.8 que ilustram o conceito e a estrutura de funcionamento de um automatismo.



Figura 3.7. Estrutura simplificada de um automatismo

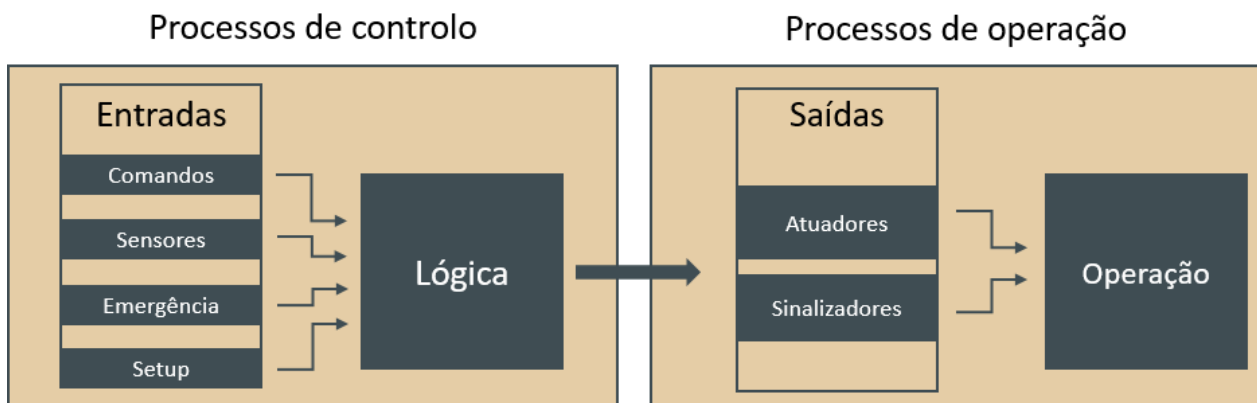


Figura 3.8. Estrutura base de um automatismo

3.3.1.1. Entradas

Como já estabelecido, as entradas enviam sinais ao dispositivo de lógica que desencadeiam uma reação nos atuadores consoante a programação da lógica do sistema.

3.3.1.1.1. Sensores

O caso mais berrante na aplicação industrial de entradas é o sensor. O sensor é um dispositivo que recebe ou deteta um estímulo ou a falta deste, e responde com um sinal elétrico correlacionado com esse estímulo (Figura 3.9). Ou seja, baseia-se num princípio ativo para converter uma determinada quantidade, propriedade ou estado numa outra passível de tratamento elétrico (Pires, Material de Apoio, 2021).

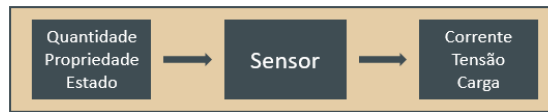


Figura 3.9. Conceito simplificado de funcionamento de sensor

Os sensores têm um papel muito importante em sistemas automáticos pois são os elementos ativos do sistema, no sentido em que eles fazem a monitorização das características consideradas relevantes ao sistema, e enviam informação ao controlador lógico programável (PLC), que atuará consoante o sinal recebido.

Normalmente os sensores são associados a uso de deteção de anomalias e posterior comunicação ao PLC, no entanto a sua utilidade em meios industriais automáticos é vasta, pois em muitos casos os sensores são responsáveis por detetar o início e o fim de uma tarefa, como por exemplo um equipamento com vários cilindros de movimento linear com uma sequência de movimentos obrigatória, permitindo a correta sequência de ações e fluidez do processo, ou simplesmente a presença do produto para posteriormente sofrer as devidas operações (ambas estas soluções são bastante comuns neste projeto em concreto).

É importante salientar que os sensores também têm uma função crítica de assegurar o funcionamento do processo sem pôr em risco a segurança das pessoas, usando como exemplo a existência de sensores em barreiras físicas.

3.3.1.1.2. Comando

Enquanto os dispositivos anteriores têm a função de avaliar ativamente uma propriedade e informar qualquer tipo de alteração ou falta desta, de forma a ser feita uma atuação, estes dispositivos servem para dar ordens ao dispositivo de lógica que por sua vez emite sinais às saídas de forma a cumprir essas mesmas.

O maior exemplo disto são os comandos “*START/STOP*”, que servem para dar ordem ao dispositivo de lógica de emitir sinais aos atuadores acerca do início do processo ou a sua interrupção. De modo semelhante, é muito recorrente a existência de botões de segurança ou emergência, que em situações de perigo, acidente, ou simulacros podem ser pressionados transmitindo um sinal de *shutdown* que se sobrepõe a qualquer outra ordem, parando todo o processo, se possível em segurança.

Os dispositivos mais comuns de comandos de sistemas automáticos são as botoneiras que mecanicamente enviam os sinais ao controlador. No entanto o formato digital tem crescido tremendamente devido à evolução da tecnologia e maior interação Homem/Máquina, com o aparecimento das consolas tácteis totalmente personalizadas e capazes de executar todo o tipo de operações.

3.3.1.2. Lógica

Como já referido, o dispositivo de lógica é responsável por receber os sinais de entrada e responder com sinais de comando às saídas por uma lógica de funcionamento programável. De forma a compreender o funcionamento de um *PLC* recomenda-se a análise da Figura 3.10.

3.3.1.2.1. Autómato

Um autómato é composto por uma Unidade Central de Processamento (*CPU*) que executa ciclicamente um programa armazenado na memória de programas através de uma consola de programação que desenvolve e transfere o programa para o autómato. Cada ciclo começa com um estímulo das entradas e termina com comandos às saídas, seguindo a lógica programada do equipamento. Durante a execução do programa, a *CPU* utiliza a memória para armazenar e transferir dados.

3.3.1.2.1.1.CPU

A unidade Central de Processamento é responsável por executar o programa, controlando todas as operações com instruções armazenadas na memória de programa. Esta faculdade está sempre em contacto com a memória e o circuito entradas/saídas, habitualmente composta por microprocessadores que permitem realizar as funções de controlo e cálculo necessárias (Sousa, 2005).

3.3.1.2.1.2.Memória

A memória tem como função armazenar o programa de controlo lógico e transferir dados. A capacidade desta é proporcional ao número de instruções necessárias, ou seja, a complexidade dos processos. Processos mais compostos podem utilizar autómatos modulares para expansão de memória.

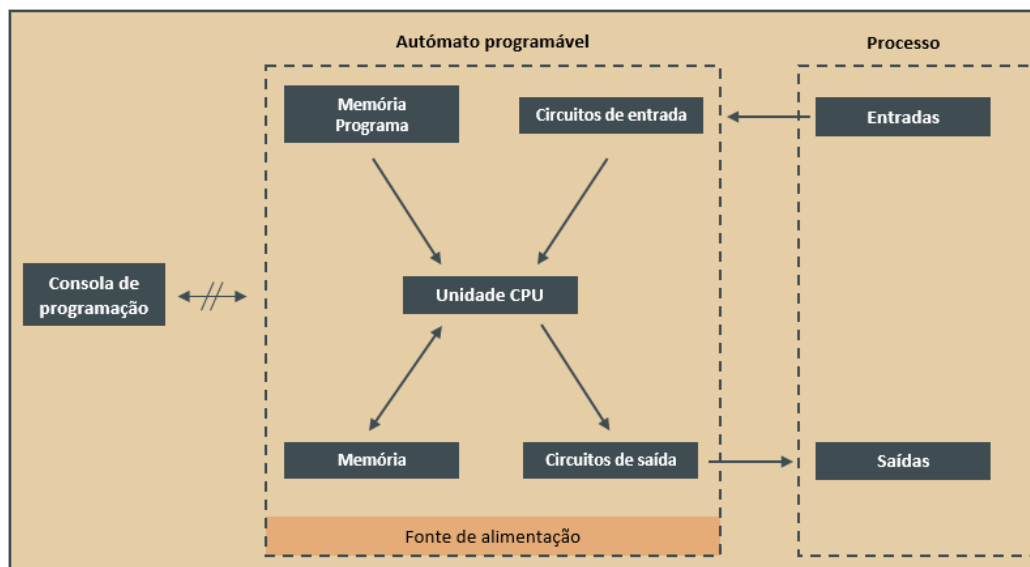


Figura 3.10. Princípio de funcionamento de um PLC

Os autômatos programáveis apresentam várias vantagens como:

- Poupança de espaço físico;
- Maior flexibilidade de processo com programação personalizada e comutável;
- *Interfaces* de comunicação com outros dispositivos de controlo ou monitorização;
- Menos mecanismos necessários (relés, temporizadores, relógios, cabos de ligação), e consequentemente menos modos de falha;
- Facilidade de operar com entradas e saídas bem distinguidas e de acesso fácil;
- Fiabilidade do dispositivo;
- Capacidade de programar em paralelo com a montagem.

3.3.1.3. Saídas

Neste sistema são consideradas saídas os dispositivos que recebem instruções do controlador programável em resposta aos sinais enviados pelas entradas.

3.3.1.3.1. Atuadores

Atuadores são dispositivos capazes produzir movimento, convertendo qualquer energia em energia mecânica. A fonte de energia pode ter natureza elétrica, pneumática ou hidráulica. O atuador mais usado em ambiente industrial é o cilindro.

3.3.1.3.1.1. Cilindro

O cilindro por sua vez transforma a energia do fluido em energia mecânica por expansão do fluido contra o pistão do cilindro numa câmara. A estes cilindros está associado

movimento linear ou rotativo. Estes dispositivos conseguem alcançar velocidades de funcionamento consideráveis, com forças razoáveis no contexto industrial e precisão suficiente para a maioria das aplicações.

3.3.2. Protocolo de comunicação

A ligação entre todos os elementos anteriormente mencionados está sempre condicionada por um protocolo de comunicação entre eles. Este protocolo é um conjunto de especificações, regras, objetivas que caracterizam o formato, a sincronização, a sequência, e transmissão de informação entre sistemas. Ou seja, é uma linguagem comum aos dois computadores. Para garantir este protocolo de comunicação é necessário existir um canal, emissor, recetor e capacidade de usar a linguagem específica (Porto Editora, 2022).

3.3.2.1. PROFINET™

No início do século XXI a empresa *PI (PROFIBUS™ & PROFINET™ International)* desenvolveu o protocolo de comunicação *PROFINET™*. Esta mesma empresa criou em 1989 o protocolo *PROFIBUS* caracterizados pelo clássico *Fieldbus* em série, ou seja, equipamentos de *inputs* e *outputs* ligados em série, sem necessidade de ligar cada um diretamente ao controlador. Ambos os protocolos vão de encontro das normas aplicáveis da *IEC (International Electrotechnical Commission)*.

O *PROFINET™* é um protocolo de comunicação desenhado para estabelecer a troca de informação entre controladores e dispositivos, usando *Ethernet* como meio de comunicação, normalmente utilizado em redes de escritório. No entanto *Ethernet* de escritório não tem capacidade de resposta para aplicações industriais. De forma a combater isto, o protocolo *PROFINET™* utiliza três canais de comunicação: canal *TCP/IP* e *UDP/IP* ou (*NRT*) para tarefas não críticas como configuração e parametrização; o canal *RT (Real Time)* endereçado a tarefas críticas pois pula várias camadas de *TCP/IP* e assim pode ser usado em 90% de aplicações industriais e normalmente é o canal mais usado; por fim o canal *IRT (Isochronous Real Time)* usado para casos muito especiais de alta velocidade e precisão. Todo este parágrafo pode ser interpretado pela Figura 3.11:

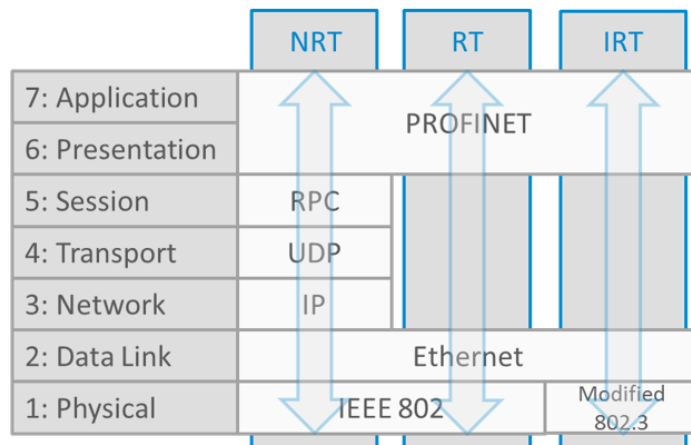


Figura 3.11. Estrutura de comunicação PROFINET™, (Profinet Technology)

De modo semelhante ao protocolo PROFIBUS™, o tratamento I/O (Inputs/Outputs) é feito por um controlador que comunica com os dispositivos de entrada e saída (Figura 3.12). Nesta rede ambos os controladores e dispositivos podem assumir o papel de fornecedor e consumidor de informação. Além disso, com o avanço de tecnologia, é possível integrar mecanismos de distribuição de I/O, como switches, que permitem poupar dinheiro e esforço em ligações e equipamentos do sistema.

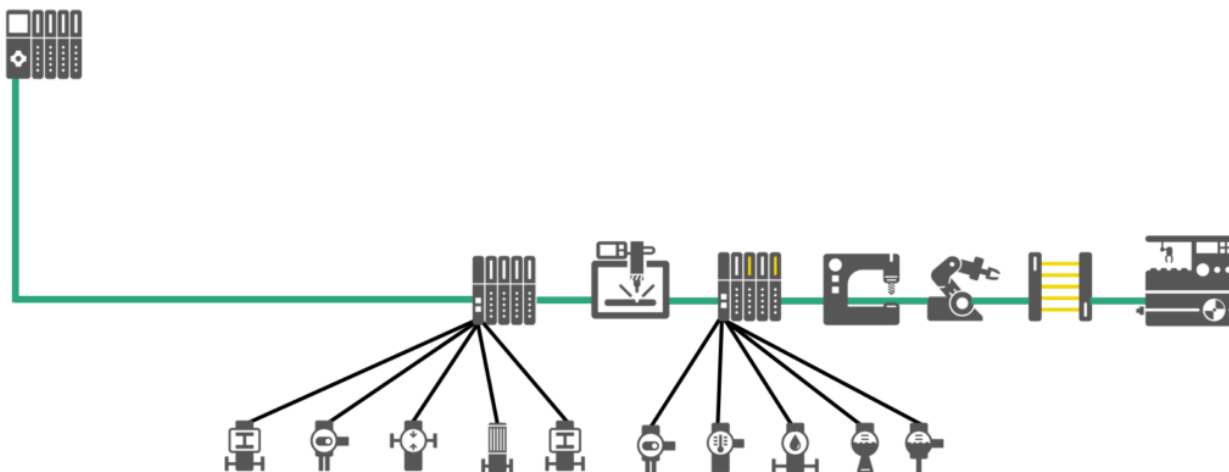
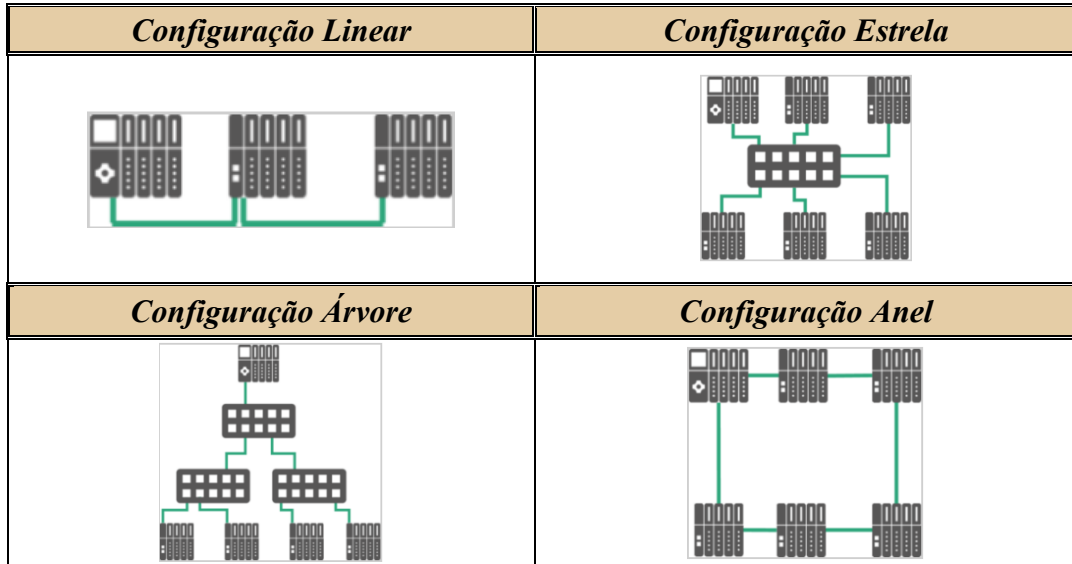


Figura 3.12. Exemplo de comunicação segundo PROFINET™, (The Difference between PROFIBUS and PROFINET, 2010)

Posto isto, PROFINET™ oferece liberdade no design da rede, com vários tipos de configurações possíveis (Tabela 3.8):

Tabela 3.8. Tipos de configuração da rede de comunicação, (*The Difference between PROFIBUS and PROFINET, 2010*)



4. INTRODUÇÃO AO PROBLEMA INICIAL

4.1. Descrição dos Produtos e Processo Produtivo

Antes de qualquer tentativa ou sugestão de implementação, é importante ter o melhor conhecimento possível do produto e o seu processo produtivo, atacando os desafios mais importantes de forma eficaz.

4.1.1. Os Produtos

A EFAPEL S.A. destaca-se por uma enorme gama de soluções de aparelhagens, calhas e acessórios para aplicações elétricas, todos eles divididos em famílias de séries, algumas com vários modelos com especificações ligeiramente diferentes, fruto da análise da voz do cliente de forma a compreender o seu desejo e exigência. Os produtos em questão deste projeto pertencem à família da série 21, mais precisamente o Interruptor Unipolar (21011), o Comutador de Lustre (21061) e o Comutador de Escada (21071). Estes pertencem à mesma família e são passíveis de serem agrupados no mesmo processo de montagem devido a muitas semelhanças entre eles, tornando o processo mais flexível e capaz.

De forma a posicionar estes produtos na realidade da empresa foi feito um estudo da produção anual de todas as séries de produto da empresa, representado pela Figura 4.1:

Distribuição da produção anual - Séries

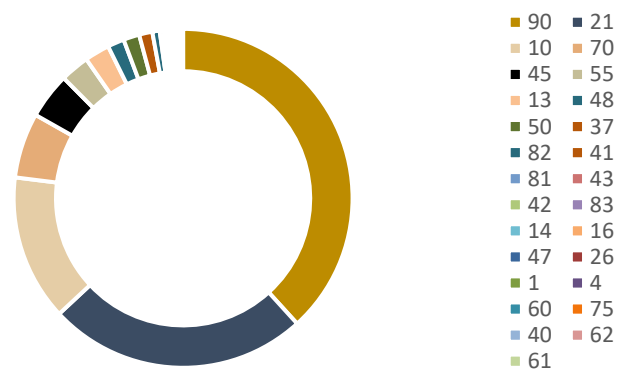


Figura 4.1. Distribuição da produção anual de séries

A partir do gráfico é possível concluir que a família de produtos da série 21 tem uma enorme importância para a empresa, sendo das séries com maior volume de produção, perfazendo cerca de um quarto (25%) da produção anual total da empresa.

Tendo em conta o contexto desta série, torna-se interessante analisar mais profundamente os produtos pertencentes e o seu impacto no relevo geral (Figura 4.2):

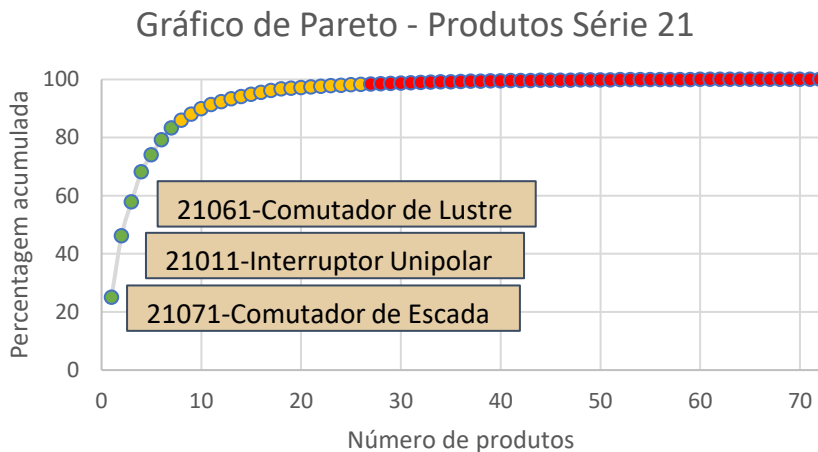


Figura 4.2. Análise ABC de produtos da série 21

Como podemos observar no gráfico, os produtos seriados 21011/21061/21071, comuns à família de série 21, apresentam maior produção anual, podendo ser considerados então produtos A+ da empresa. Como o gráfico realça, estes três produtos perfazem cerca de 55% da produção total anual desta série.

Devido à importância que estes produtos têm para a empresa, um projeto de desenvolvimento dos seus processos torna-se muito atrativo devido ao potencial de melhoria e eliminação de desperdícios aliado ao elevado volume de produção anual.

Em acréscimo, devido à natureza destes produtos, as suas semelhanças e possibilidade de utilizar um só processo flexível (Tecnologia de grupo) tornam este projeto extremamente importante e deve ser considerado pela gestão da empresa como uma estratégia de otimização de processos e aumento de competitividade.

4.1.1.1. 21011 – Interruptor Unipolar

O interruptor unipolar 21011 tem o funcionamento mais simples de todos os exemplos, com apenas uma ligação direta entre contactos que ligam a fase ao atuador

(lâmpada neste caso). A ligação de contactos é da responsabilidade da tecla, com posições binárias de “Ligado” e “Desligado”. Este funcionamento está representado na Figura 4.3.

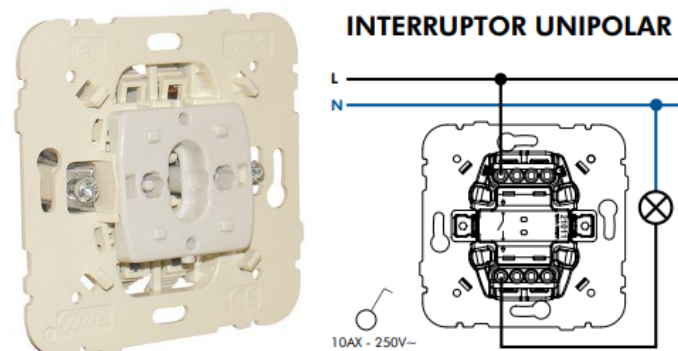


Figura 4.3. Interruptor Unipolar 21011 e seu funcionamento (EFAPEL S.A., 2022)

4.1.1.2. 21061 – Comutador de Lustre

O comutador de lustre 21061 distingue-se à primeira vista por apresentar 2 teclas, ao invés de apenas uma como o exemplo anterior. De modo simplificado, o funcionamento é semelhante ao interruptor unipolar, em que a posição de cada tecla dita a ligação da fase a cada lâmpada (Figura 4.4). De uma perspectiva lógica, este interruptor é o equivalente a dois interruptores unipolares, unidos no mesmo equipamento.

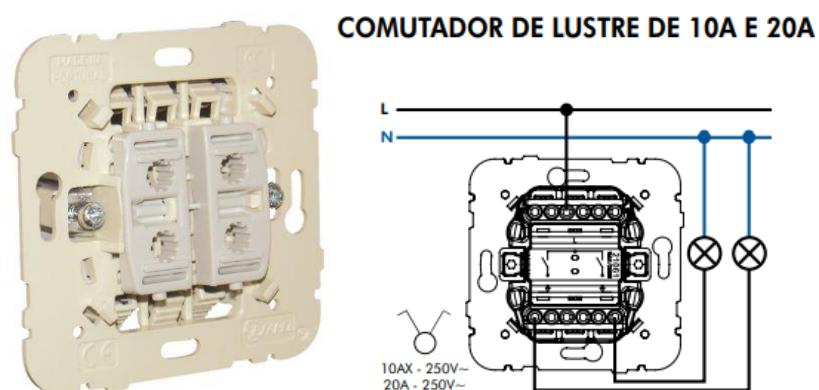


Figura 4.4. Comutador de Lustre 21061 e seu funcionamento (EFAPEL S.A., 2022)

4.1.1.3. 21071 – Comutador de Escada

O comutador de escada 21071 tem o mecanismo de funcionamento mais complexo dos três produtos, no sentido em que o seu correto uso implica dois interruptores iguais

ligados entre si e o estado do circuito depende apenas das posições relativas entre estes. O nome “escada” está diretamente relacionado com um exemplo recorrente da aplicação deste produto. Este exemplo é referente à situação de escadarias, com a necessidade de efetuar e quebrar a ligação em postos diferentes. Como podemos observar na Figura 4.5, se os dois comutadores de escada estiverem corretamente ligados, é possível abrir e fechar um circuito em duas localizações diferentes.

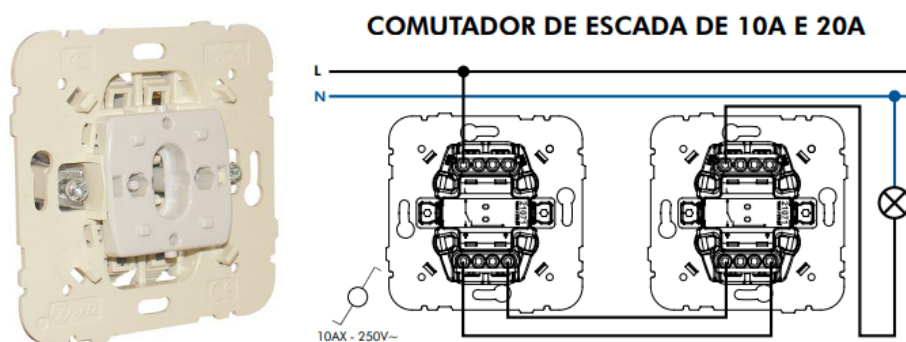


Figura 4.5. Comutador de Escada 21071 e seu funcionamento (EFAPEL S.A., 2022)

4.1.1.4. Componentes

Usando como exemplo o produto 21011 – Interruptor Unipolar para demonstrar os componentes associados temos a Figura 4.6:

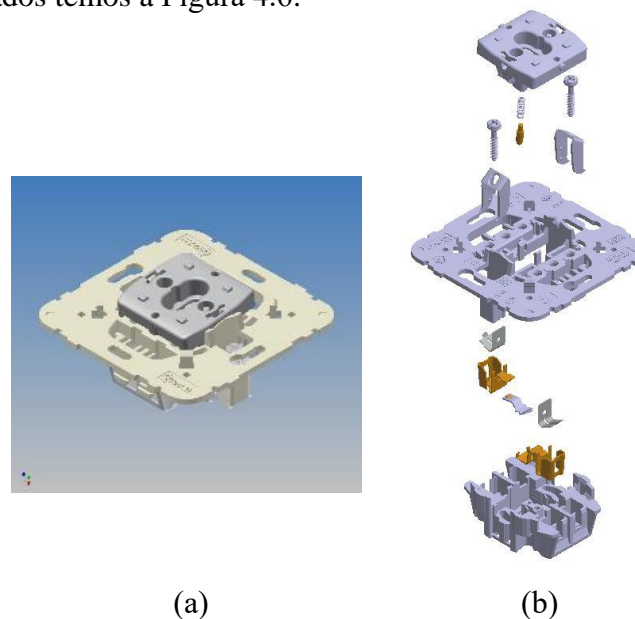
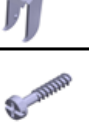
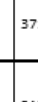




Figura 4.6. a) CAD de Interruptor Unipolar; b) Vista explodida

Tabela 4.1. Materiais e componentes de montagem de Interruptor Unipolar

Código - Designação		Imagem	PICTURE (JPEG)	FILE (STEP)
Plásticos	311079 – Base Porta Contactos Int 4 Ligadores		311079	311079
	311080 – Tampa Base Int 4 Ligadores		311080	311080
	311083 – Porta Tecla de Int 4 Ligadores		311083	311083
	315001 - Cursor		315001	315001
Metálicos	321017 – Apoio de Contacto Móvel		321017	321017
	330003 – Contacto Móvel e Rebite		330003	330003
	330004 – Contacto Móvel e Rebite Maciço		330004	330004
	321053 – Contacto Fixo Int e Contacto Elétrico		321053	321053
	321055 – Contacto Fixo Cont Escada e 1 Cont Elect		321055	321055
	321016 – Mola de Condutor		321016	321016
	371009 – Garra Metálica		371009	371009
Parafusos e Molas	217003 – Parafuso de Garra		217003	217003
	261003 – Mola de Cursor		261003	261003
	261007 – Mola de Botão de Pressão		261007	261007

Como seria de esperar, estes produtos são constituídos por componentes elétricos dentro da base devido à sua capacidade de conduzir eletricidade e estabelecer ligação entre as posições do interruptor e o sistema elétrico. Por outro lado, o corpo destes produtos é de plástico, devido à sua capacidade de isolamento elétrico de forma a proteger o utilizador de cargas elétricas, e baixa densidade, e conseqüente peso. Todos estes estão identificados na Tabela 4.1.

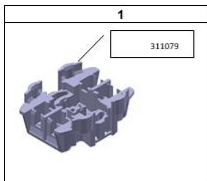
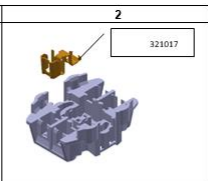
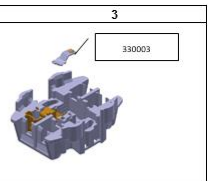
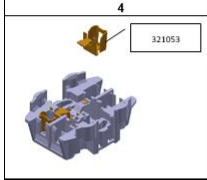
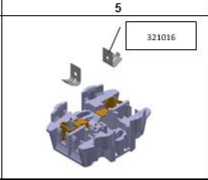
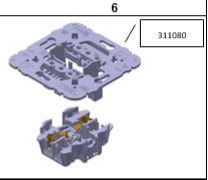
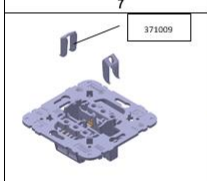
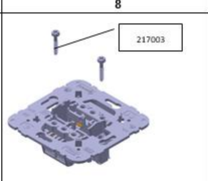
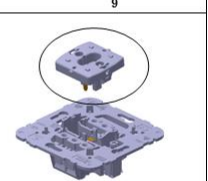
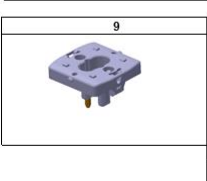
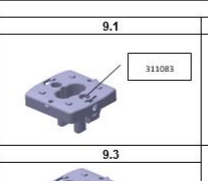
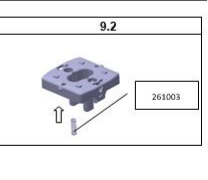
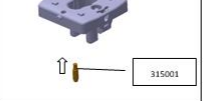
Relativamente aos outros dois produtos (21061/21071), as suas composições estão especificadas na Tabela I. 1, apresentado no Apêndice I.

Como seria de esperar a composição dos produtos é muito semelhante, sendo notáveis as maiores diferenças nas quantidades de componentes, e alguns componentes customizados devido a diferentes especificações e complexidade de cada produto.

4.1.1.5. Sequência de montagem

Usando novamente o mesmo exemplo é possível esquematizar a sequência de montagem do produto (Tabela 4.2) e perceber melhor as necessidades de características do processo :

Tabela 4.2. Sequência de montagem de Interruptor Unipolar

1	2	3
		
4	5	6
		
7	8	9
		
9	9.1	9.2
		
	9.3	
		

Analisando a sequência de montagem dos diferentes componentes podemos dividir claramente esta montagem em três sub-montagens: a base, a tampa da base e o porta teclas.

A primeira passa por aplicar as metalizações na base, mais precisamente o apoio e contacto móvel, o contacto fixo e as molas de condutor, e seguidamente aplicar massa.

Posteriormente a tampa da base é calcada e são colocadas e aparafusadas as garras.

Por fim, o conjunto de porta teclas com mola e cursor é alimentado a partir de outra máquina responsável por fazer esta sub-montagem (Figura III. 8), e colocado na tampa.

Como forma de controlo de qualidade, é feito um ensaio mecânico e elétrico para testar o funcionamento do produto, que ditará a embalagem ou não do produto.

4.1.2. Processo de montagem

De forma a delinear a melhor estratégia de sugestão de melhoria é imperativo dominar o processo atual e reconhecer fragilidades que possam existir, ou aspetos claros de melhoria. Estes melhoramentos podem ter razões muito variadas, desde a maximização da produtividade, a ergonomia das tarefas, ações de manutenção, balanceamento de linha, introdução de tecnologia, aumento de controlo sobre o processo e imperativamente o aumento das condições de segurança e higiene no trabalho. O grau destas melhorias é secundário, pois uma constante filosofia de melhoria continua e confronto dos desafios assegura ganhos a longo prazo e o sucesso da empresa.

4.1.2.1. Layout

Analisando o processo de montagem atual podemos observar que se enquadra no tipo de *layout* de produto (subcapítulo 3.1.2.1.3), ou seja, agrupa diferentes postos de trabalho fixos de acordo com a sequência dos produtos a estes associados. É adaptado para produção repetitiva estandardizada de grande volume. A matéria-prima é fornecida no início da linha e movimenta-se entre os postos de trabalho de acordo com a sequência de tarefas, da maneira mais eficiente possível, até atingir o estado de produto final no fim da linha. Além disso a produção deste processo é multimodelo, com produção de diferentes modelos consoante ordens de produção com tempos de *setup* intermédios.

Este envolve 4 operadores de montagem, 3 máquinas auxiliaadoras de tarefas e 4 alimentadores automáticos de componentes (Figura 4.7). No fim da linha está instalada a área de embalamento com um operador responsável por embalar, etiquetar e encaixotar os produtos.

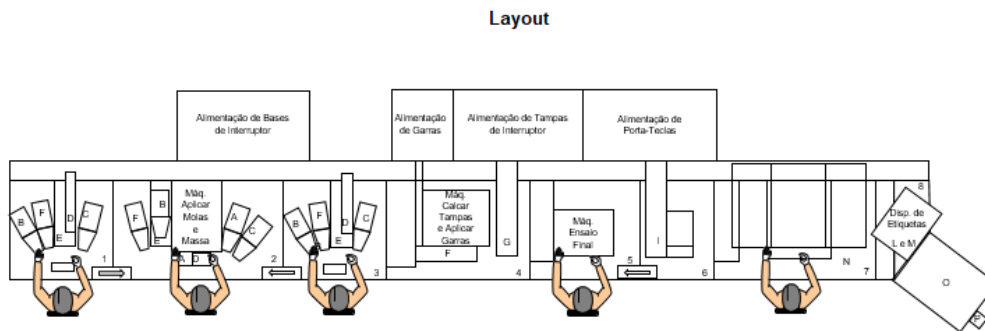


Figura 4.7. Layout da linha de montagem atual de Interruptores da Série 21

4.1.2.2. Tarefas

Recorrendo às folhas de normalização disponibilizadas pela EFAPEL S.A. é possível recolher de modo muito específico todas as tarefas relacionadas com este processo de montagem e daí tirar algumas conclusões (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Tarefas da sequência de montagem

Fase		Tarefa	
Fase 1 - Aplicar molas de condutor e massa	T1.1	Aplicar mola de condutor	
	T1.2	Colocar peça na máquina	
Fase 1 AUX - Aplicar metalizações	T1.3	Agarrar e verificar peça/colocar na calha	
	T1.4	Aplicar contacto móvel no apoio e aplicar conjunto na base	
	T1.5	Aplicar contacto fixo na base	
Fase 2 - Aplicar tampa da base e garras	T2.1	Aplicar tampa	
	T2.2	Aplicar garras	
Fase 3 - Aplicar porta tecla e ensaio final	T3.1	Aplicar porta tecla na base e realizar ensaio final	
Fase 4 - Embalagem	T4.1	Fazer caixote/Fechar caixote	
	T4.2	Montar embalagem e colocar divisórias	
	T4.3	Efetuar teste mecânico, colocar na embalagem	
	T4.4	Colocar rótulos na embalagem, fechar embalagem e colocar no caixote	
	T4.5	Colocar caixote na palete	
Tarefas Auxiliares	Preparação da Ordem de Produção	TA.1	Abastecimento da linha
		TA.2	Abrir ordem de produção
	Realimentação de Linha	TA.3	Realimentar bases
		TA.4	Realimentar tampas
		TA.5	Realimentar garras
		TA.6	Realimentar porta teclas
	Conclusão da Ordem de Produção	TA.7	Contar defeitos e arrumar material excedente
		TA.8	Fechar ordem de produção
		TA.9	Entregar peças ao armazém

Nesta tabela é possível observar claramente a divisão das tarefas de montagem em três fases, cada uma relacionada com uma sub-montagem diferente, como já referido anteriormente no Capítulo 4.1.1.5.

A primeira fase, como já referido, está relacionada com a colocação das metalizações na base (Figura 4.8).

Na primeira estação os colaboradores laterais colocam o conjunto apoio/contacto móvel e o contacto fixo nas bases, alimentadas automaticamente através de um tapete com guias, visível na Figura II. 1. Esta é transportada posteriormente para o posto central, com um operador responsável por colocar as molas de condutor e inserir a base na “Máquina de Aplicar Molas e Massa” que tem como função calcar as molas na sua correta posição e aplicar massa nos contactos móveis, como o nome indica, e de seguida empurrar a base para o tapete transversal que transporta o produto entre cada posto. Em funcionamento em pleno encontram-se dois colaboradores nas laterais, um de cada lado, a colocar os contactos, no entanto, consoante a necessidade e a Ordem de Produção, é possível operar apenas com um operador lateral. A flexibilidade do processo é alcançada com a disposição de vários dispensadores (A, B, C, D e E) que contêm todos os componentes necessários para os diferentes produtos. Além disso é feito *setup* específico da máquina consoante o produto a produzir.



Figura 4.8. Fase 1 da montagem

Após todas as operações relacionadas com as metalizações da base finalizadas, estas são transportadas até à área afeta às operações da tampa da base e as garras (Figura 4.9).

Todas as bases já montadas são direcionadas para um *buffer*, interpretado como um *stock* intermédio de forma a não causar estrangimentos na linha (em baixo de H). O componente tampa de base e garras são alimentadas automaticamente, também num pulmão (G e F respetivamente), sendo responsabilidade do operador colocar a tampa da base e as garras manualmente na base e posteriormente inserir na “Máquina de Calcar Tampas e Aplicar Garras”, que como o nome pressupõe calca a tampa para a fixar e aparafusa as garras, com alimentação de parafusos automática por parte de um vibrador (H). De seguida a sub-

montagem é de novo empurrada para o tapete que leva o produto até à fase final de montagem.

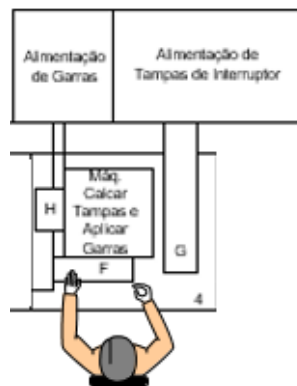


Figura 4.9. Fase 2 da montagem

Na terceira e última fase de montagem, a sub-montagem anterior é de novo direcionada para um *buffer*, do lado esquerdo, do último posto de aplicação do porta tecla e teste elétrico de funcionamento (Figura 4.10).

O operador tem duas tarefas principais, colocar a sub-montagem porta tecla no produto, sendo esta alimentada de forma semelhante aos outros alimentadores, com o detalhe que esta sub-montagem é feita por outra máquina projetada pela empresa, com única missão de produzir a sub-montagem porta tecla específica de cada produto integrado neste processo. Após aplicado o porta tecla, o operador deve colocar o produto na “Máquina Ensaio Final” que calca o porta tecla na sua correta posição e testa o funcionamento do produto, numa medida de gestão de qualidade.



Figura 4.10. Fase 3 da montagem

No fim da linha existe ainda um posto de embalagem e etiquetagem, com a alimentação de produtos finais pelo mesmo tapete e método de armazenamento intermédio (

Figura 4.11). O dispensador de etiquetas representado está ilustrado no Apêndice IV, mais especificamente na Figura IV. 3.

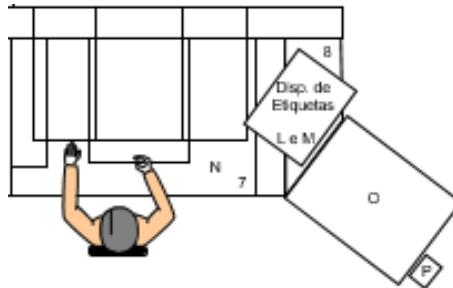


Figura 4.11. Embalamento e etiquetagem

Globalmente, o número de operadores desta linha de montagem pode variar consoante a necessidade e urgência das Ordens de Produção. É comum alguns operadores executarem tarefas de várias fases e resolverem possíveis desencravamentos que perturbem o fluxo da linha.

Além destas tarefas, há um conjunto de tarefas auxiliares que não estão diretamente relacionadas com o processo, tais como:

- Preparação da Ordem de Trabalho:
 - Abastecimento da linha;
 - Abrir Ordem de Produção.
- Realimentação da Linha:
 - Realimentar base;
 - Realimentar tampas;
 - Realimentar garras;
 - Realimentar porta teclas.
- Conclusão da Ordem de Produção:
 - Contar defeitos e arrumar material excedente;
 - Fechar Ordem de Produção;
 - Entregar palete ao armazém.

Apesar de estas tarefas auxiliares não ocuparem um tempo considerável relativamente ao tempo de ciclo, devido à sua periodicidade e inclusão de um grande número

de componentes, podem ter um impacto a longo prazo e podem ser caso de estudo para eliminação de desperdícios.

4.1.2.3. Análise dos tempos

Recorrendo às folhas de normalização da empresa, é possível analisar e compreender os tempos afetos a cada tarefa. Com isto pode contextualizar-se o processo, entender a dimensão dos tempos de ciclo e fazer uma projeção de melhoria e resultados após este projeto.

Os tempos relativos às tarefas do processo produtivo dos produtos 21011, 21061 e 21071 são apresentadas na Tabela I. 2, Tabela I. 3 & Tabela I. 4 respetivamente. De notar que este tempo de ciclo é considerado para apenas um colaborador. O tempo de ciclo de produto real é, na mesma ordem:

$$\frac{24,6}{5} = 4,92 \text{ s} \quad (1)$$

$$\frac{38,4}{5} = 7,68 \text{ s} \quad (2)$$

$$\frac{31,49}{5} = 6,3 \text{ s} \quad (3)$$

Da análise destas folhas de normalização é possível observar que a fase 1 relacionada com a base, mais especificamente a aplicação das metalizações na base é a tarefa mais demorada, perfazendo cerca de 50% do tempo total de ciclo. Este facto deve-se à especificação de vários aspetos relacionados com as metalizações na base, como a posição específica das metalizações, as dimensões pequenas e complexas destas e a orientação da base.

Além disso, podemos justificar a progressão crescente dos tempos de ciclo com as especificações, detalhes e complexidade de cada produto e seu processo, visíveis na Tabela I. 1.

5. NOVO PROCESSO

5.1. Objetivos

No planeamento deste enorme projeto foram definidos alguns objetivos (Figura 5.1) de forma a orientar a equipa e contextualizar o investimento feito por parte da empresa:

- Diminuir o tempo de ciclo da linha, de 5 segundos para a casa dos 2 segundos, no caso da referência mais simples, sendo expectável que as outras duas sofram o mesmo efeito com uma descida de 60% do tempo de ciclo;
- Aumentar a flexibilidade e configurabilidade do processo, com uma filosofia de *layout* celular (Capítulo 3.1.2.2.1.2), permitindo uma melhor resposta ao mercado e futura modificações de processo ou produto;
- Diminuir a carga de trabalho de operadores, seja diretamente trabalho produtivo ou ações de manutenção e desencravamento;
- Normalização do processo com o relevo de processos da empresa;
- Permitir um maior controlo estatístico sobre o processo, servindo de base de decisões para a gestão da empresa;
- Melhorar as condições de trabalho, nomeadamente a segurança e higiene, resultando num bom ambiente de trabalho;
- Por fim, o objetivo primário é diminuir os custos de produção e aumentar esta, de forma a exponenciar a competitividade da empresa.

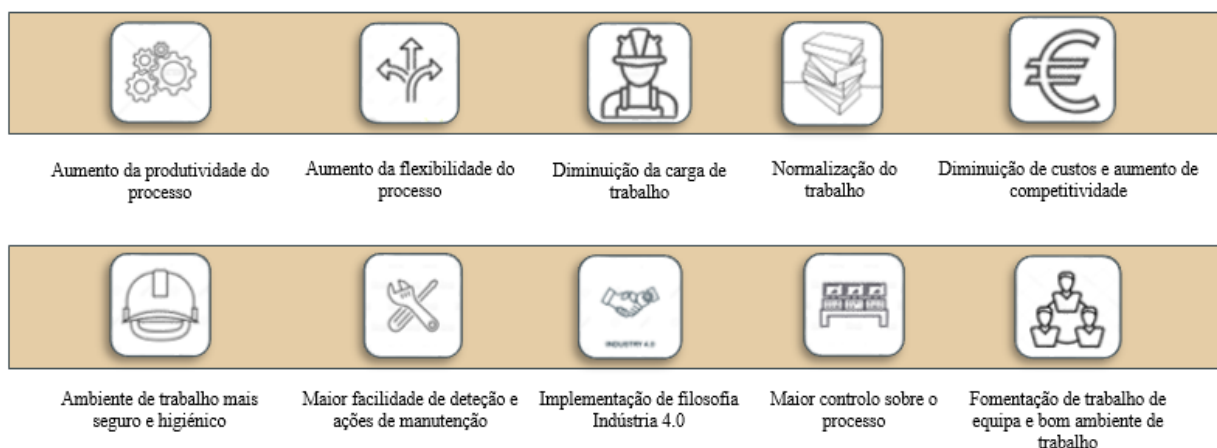


Figura 5.1. Objetivos deste projeto

5.2. Automação do Processo

Considerando todas as operações do processo atual já referidas no Capítulo 4.1.2.2, é possível analisar a especificação de cada tarefa e assim estabelecer o grau de complexidade de automatização de cada tarefa. Devido à enorme complexidade da geometria das metalizações e a especificidade da posição destas, esta fase inicial do processo torna-se difícil de automatizar pois implica um manuseamento muito preciso e consciente, característico da mão de obra humana. No entanto será introduzida tecnologia auxiliar nestas tarefas de forma a diminuir a carga dos colaboradores e assim diminuir o tempo de ciclo total.

Após esta fase inicial, o produto seguirá uma sequência de montagem com operações mecânicas já familiares e possíveis de introduzir num automatismo. As necessidades da montagem do produto implicam: a manipulação e calcamento de componentes, possível com recurso a atuadores; aparafusamento, com várias soluções no mercado e já usadas nesta empresa e também movimentos rápidos e de precisão, necessários por exemplos na aplicação da massa e colocação das garras, solucionados com atuadores bem calibrados. Além disso, toda a alimentação de componentes é feita de forma automática com vários alimentadores automáticos e vibradores familiares à empresa. O *know-how* teve um papel importante neste período pois várias das operações mencionadas e representadas na Figura 5.3 já foram exploradas pela equipa em outros projetos.

Num último estágio ocorre o embalamento do produto final, muito semelhante ao atual e muitos outros pertencentes a outros processos da empresa, ainda totalmente manual.

Como podemos observar na Figura 5.2, esta automatização de processo dividiu naturalmente este novo processo em três fases bem distintas: a montagem semiautomática de metalizações na base; restante montagem completamente automática e embalamento final.

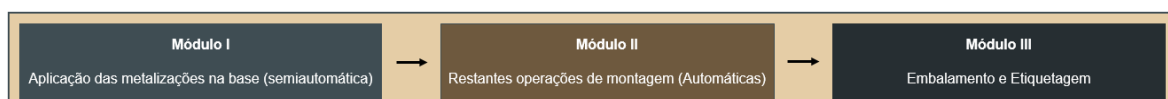


Figura 5.2 Novo esquema de montagem

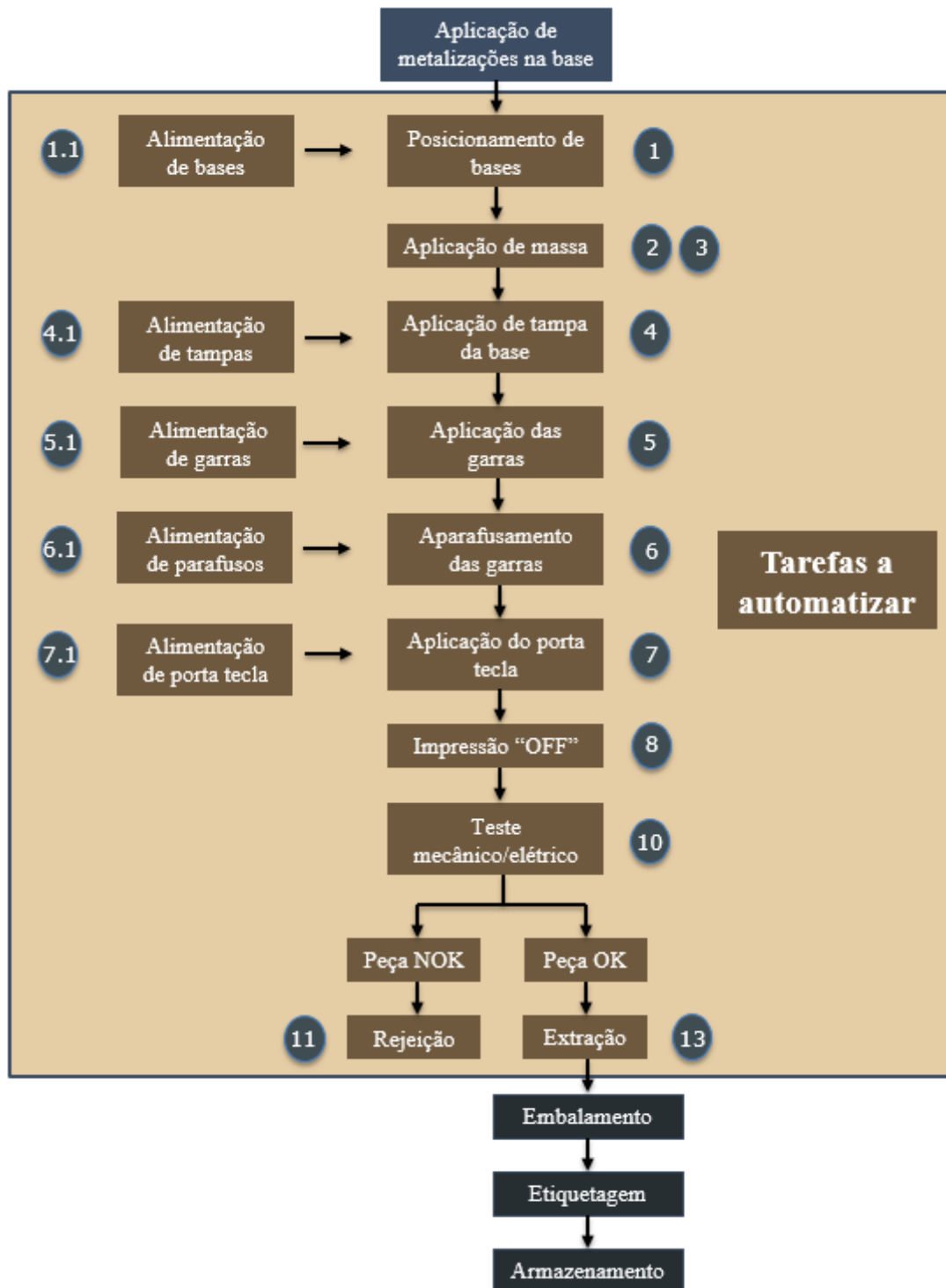


Figura 5.3. Sequência de montagem e automatização de tarefas

5.3. Layout

Uma das fases mais importantes deste projeto passa pela definição do *layout* desta nova linha de montagem, tendo em conta as alterações pretendidas e objetivos definidos.

Esta importância deve-se à enorme influência que este aspeto tem sobre os objetivos do projeto e o rendimento do mesmo. Na definição do *layout* vários fatores foram considerados, tais como:

- Produtividade do processo;
- Flexibilidade do processo;
- Ergonomia das operações;
- Ações de manutenção preventiva e corretiva;
- A segurança e higiene do processo;
- Interação Homem-Máquina;
- Custos de produção;
- Capacidade de resposta do processo.

Devido à constante necessidade de um processo flexível de encontro com as exigências de mercado, adotou-se a filosofia de *layout* celular (Capítulo 3.1.2.2.1.2), reunindo ferramentas, equipamentos e operações de um grupo de produtos com características semelhantes que os tornam íntimos e passíveis de agrupar no mesmo processo (Tecnologia de grupo), sendo esta intimidade evidente no sistema de codificação e classificação de produtos (Capítulo 3.1.2.2.1.1) utilizado pela empresa. Logicamente fez todo o sentido continuar a filosofia de produção multimodelo, com ordens de produção e tempos de *setup* intermédios, de forma ao processo ser flexível e produzir de forma customizada.

Um dos grandes objetivos, além da clara melhoria de produtividade e consequente aumento do valor do produto, foi moldar o processo numa filosofia de *Reconfigurable Manufacturing System*, onde equipamentos, componentes, ferramentas ou dispositivos de software podem ser removidos, adicionados, modificados ou trocados em resposta à necessidade de reagir rapidamente e eficientemente às necessidades (Capítulo 3.1.1).

Como descrito anteriormente, este novo processo é modulado em três fases diferentes, que se descrevem seguidamente:

5.3.1. Módulo I – Montagem semiautomática das bases

O *layout* da primeira fase tem semelhanças com a Figura 4.8. Fase 1 da montagem do processo atual, com a diferença de cada posto montar todas as metalizações e ter uma máquina de calcar as molas de condutor nas bases, destacada na Figura II. 4. Isto é, ao contrário de um gargalo nesta fase, todos os postos montam as bases. Estas são posteriormente processadas pela máquina aqui mencionada e de seguida colocadas no tapete principal por um *robot* colaborativo, fotografado na Figura III. 3 . Por fim as bases montadas são transportadas para a zona de transição para o Módulo II, no fim do tapete (Figura II. 3). A alimentação das bases não alterou em relação ao processo atual.

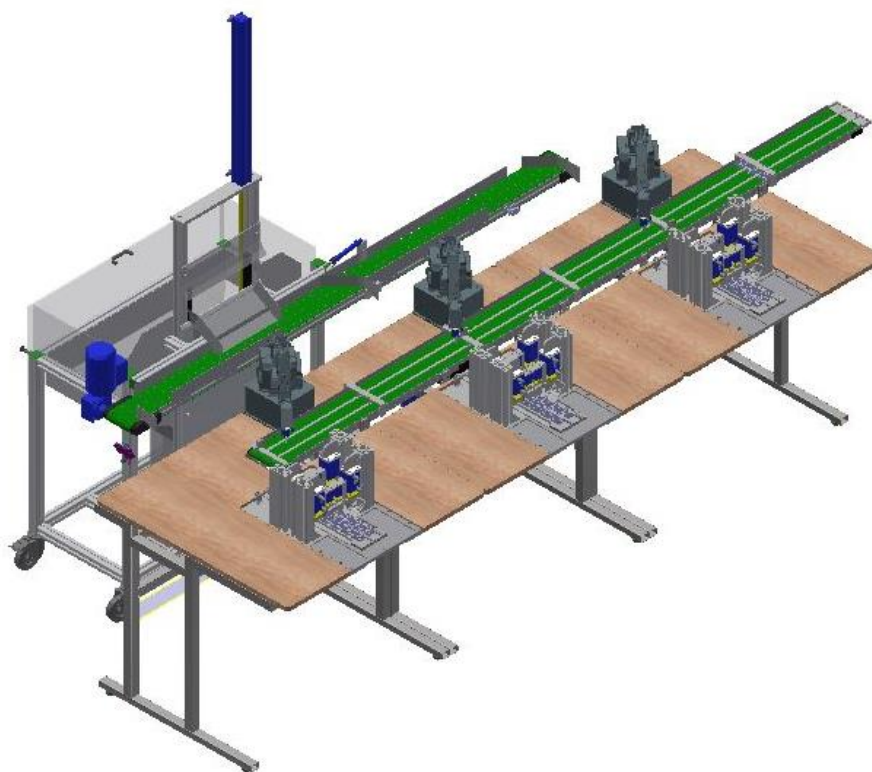


Figura 5.4. Montagem semiautomática de bases

5.3.2. Módulo II – Restante montagem automática

Relativamente ao módulo central, este concentra a maioria das operações, todas elas automáticas, tornando-se o mais complexo e necessário de atenção. Beneficiando do facto de os produtos terem pequenas dimensões e a maquinaria necessária ser razoavelmente leve, ficou estabelecido que o módulo automático seria circular com um prato, representado na Figura III. 2, indexado a uma mesa rotativa (Figura A. 2), que transporta o produto por todas as estações, cada uma munida de um equipamento responsável por uma tarefa, seguindo a

sequência de montagem (Figura 5.5). Além disso teve de ser conceptualizado um posicionador geometricamente capaz de fixar as diferentes referências (21011/21061/21071) a ser produzidas e ao mesmo tempo permitir todas as operações ao produto por parte dos equipamentos. Este posicionador está ilustrado na Figura III. 1.

A decisão de prato rotativo surgiu de um bom índice histórico por parte desta aplicação, especialmente na máquina de produção da sub-montagem porta tecla. Além disso é uma solução ao desafio de limitação de espaço físico (Capítulo 3.1.4.7).

Sendo assim, o prato rotativo contém 12 postos de trabalho, cada um associado a um equipamento e conseqüentemente uma tarefa, a trabalhar em simultâneo independentemente, sendo o tempo de ciclo deste módulo o mesmo do tempo da tarefa mais demorada. Como se pode observar na Figura 5.3, dois dos postos não têm destino nem fazem trabalho, ficando reservados para futuras alterações ou melhorias (mais uma vez referente a *RMS* [Capítulo 3.1.1]). A alimentação de componentes é também automática, sendo a única intervenção humana neste módulo de apenas abastecer os alimentadores periodicamente.

De forma a ilustrar o que foi dito, foi representado este módulo e a sequência de trabalho pela Figura 5.5, em concordância com a numeração da Figura 5.3.

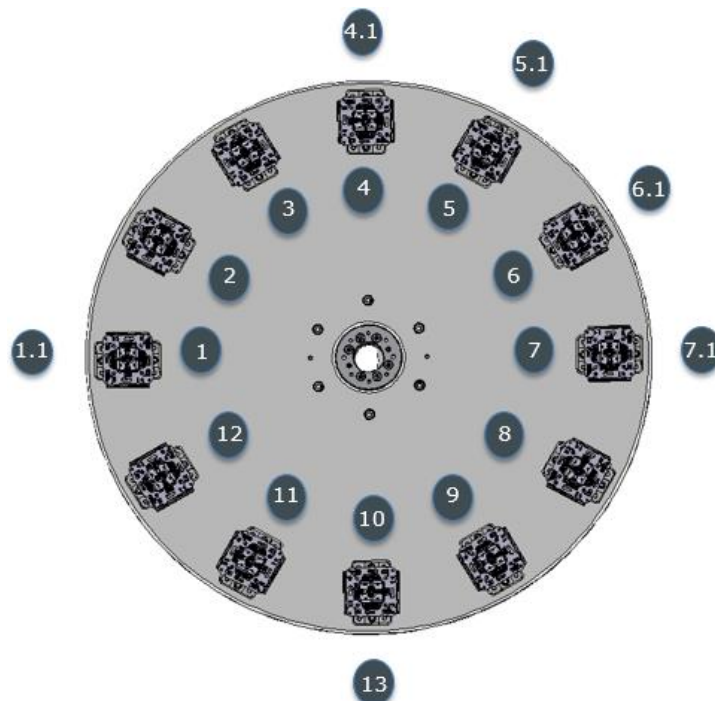


Figura 5.5. Módulo de montagem automática

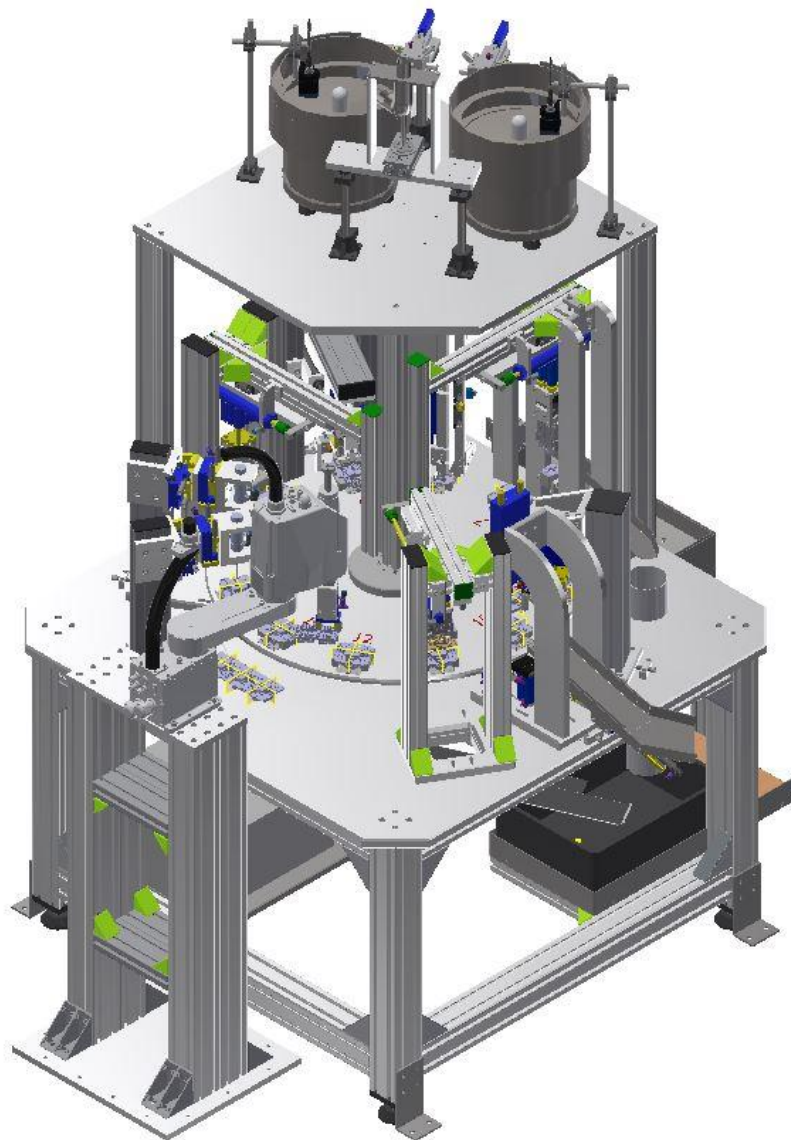


Figura 5.6. Módulo de montagem automática 3D

5.3.3. Módulo III – Embalamento

O último estágio de produção destes interruptores série 21 é o embalamento de produto final (Figura 5.7). Esta fase já existe noutros processos da empresa, como mostra a Figura IV. 1 e Figura IV. 2, pelo que a aplicação neste se tornou lógica e razoável.

Aqui os produtos extraídos do último posto do módulo anterior (teste mecânico/elétrico) são colocados no tapete rolante e transportados até ao pulmão de stock intermédio. Enquanto isso os operadores embalam, etiquetam e encaixotam o produto final (Capítulo 4.1.2.2).

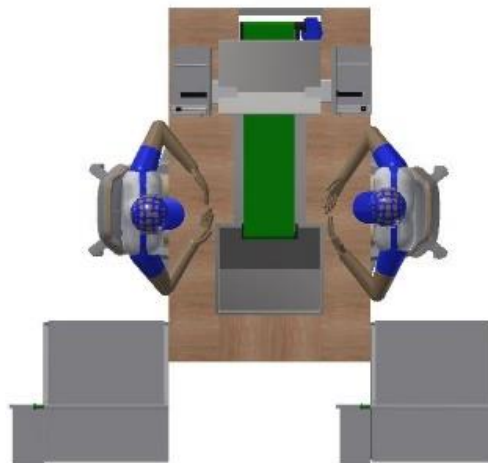


Figura 5.7. Posto de embalagem

5.3.4. *Layout final*

Agrupando toda a informação até agora, o layout de todo o processo, incluindo os alimentadores, ilustrados na Figura II. 1, Figura III. 6, Figura III. 7, Figura III. 9 & Figura III. 8, é ilustrado na Figura 5.8:

:

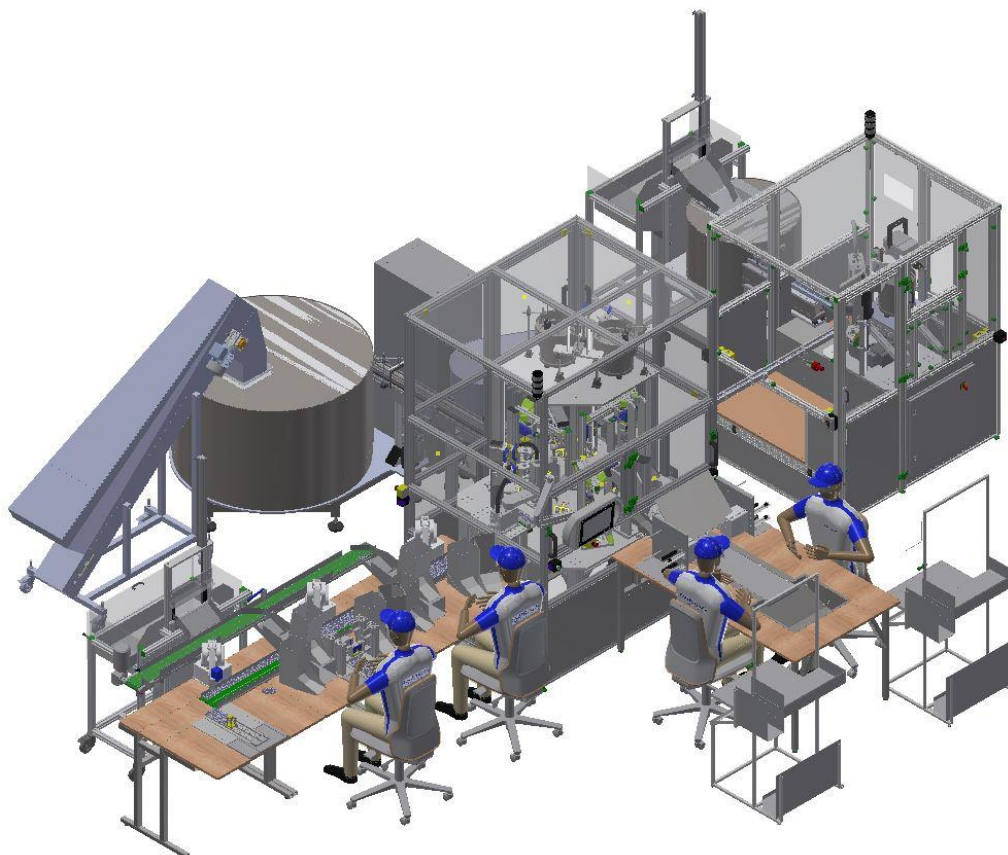


Figura 5.8. *Layout final*

5.4. Balanceamento da linha

A tarefa de balanceamento da linha tem extrema importância no desenvolvimento ou modificação de processos produtivos (Capítulo 3.1.4.1), onde se enquadra o nosso projeto. Um bom equilíbrio ao longo da linha muitas vezes resulta em ganhos consideráveis, especialmente a nível de custos, rendimento de equipamentos e colaboradores e cadência produtiva. O objetivo deste encargo é então estudar os tempos de cada tarefa significativa à produção, analisar a distribuição de carga de trabalho e otimizar este processo com medidas que permitam diminuir o tempo de ciclo e assim obter os ganhos já mencionados.

No entanto, esta tarefa enfrentou dificuldades que criam alguma ambiguidade nos resultados obtidos. Primeiramente, a fase de *design* ainda não estava completamente fechada, sendo que alguns parâmetros ainda não estavam definidos. Em segundo lugar, visto que os equipamentos estavam ainda em fase de conceção, é apenas possível fazer uma previsão de tempo, auxiliado pela experiência da equipa.

O procedimento adotado de cálculo de tempos foi um levantamento de todos os atuadores envolvidos e calcular o tempo de cada movimento, recorrendo às fichas técnicas do produto. Logicamente, estes tempos são pouco precisos devido a todas as ligações automáticas e restrições pneumáticas. Posto isto, foi considerada uma margem de incerteza no cálculo dos tempos para combater este problema e uma posição conservadora nos cálculos.

5.4.1. Módulo I – Montagem semiautomática das bases

Como podemos observar na Tabela I. 2, Tabela I. 3 & Tabela I. 4, as operações atuais de montagem das metalizações nas bases ocupam a maior parte do tempo, sendo este posto o gargalo do processo atual com 8 segundos de operações. A introdução de tecnologia e reformulação do módulo inicial de montagem de bases (explicada no Capítulo 5.3.1) permitiu poupar alguns movimentos por parte do operador, resultando então num ganho de 2 segundos, ou melhor, tempo de montagem de bases de 6 segundos. A metodologia adotada de medição de tempo foi a *Method-Time Measurement*, certificada pela *MTM Association for Standards and Research*, e está delineada no Apêndice VII.

No entanto, esta fase manual que inicia a montagem continua a ser o gargalo deste processo. Seguindo a sequência de transporte, a base montada acaba no ninho no final do tapete principal (Figura II. 3), pronta para ser manipulada pelo *robot* não colaborativo (Figura A. 1). Este *robot* já foi aplicado anteriormente na empresa, pelo que se estimou um tempo de 2 segundos para este agarrar na base montada e colocar na primeira estação do prato rotativo. De forma a aumentar a cadência de produção e balancear a linha, a montagem de metalizações na base será distribuída em 3 postos diferentes, de forma a igualar o tempo de ciclo do *robot* não colaborativo, tal como representado novamente na Figura 5.4. Todo este procedimento de balanceamento está representado na Figura 5.9.

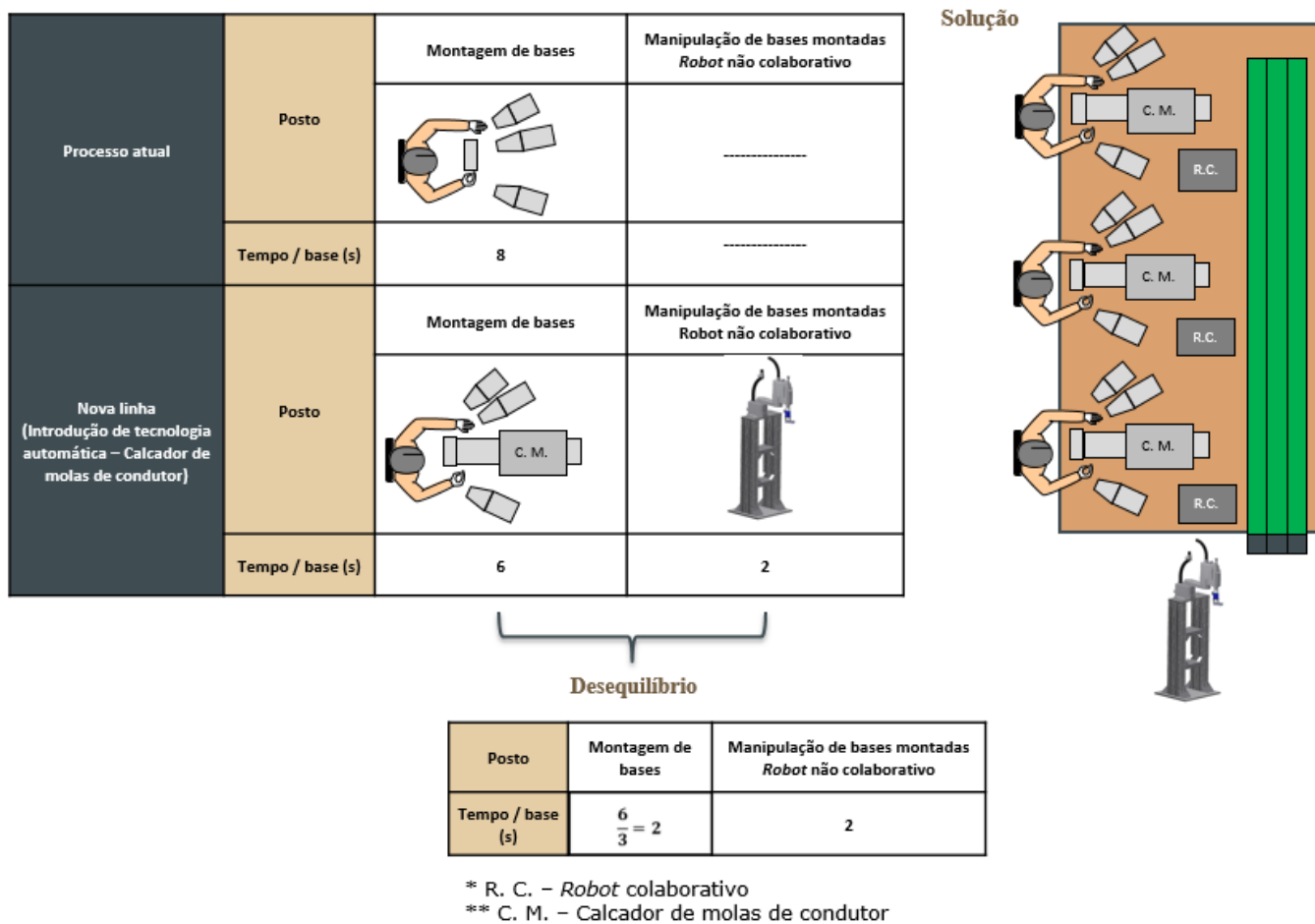


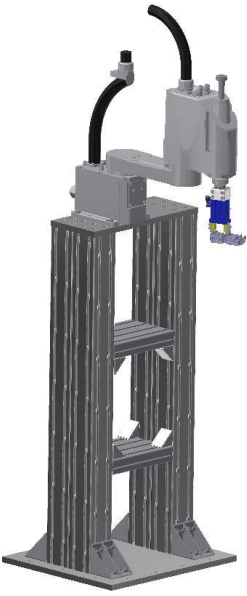
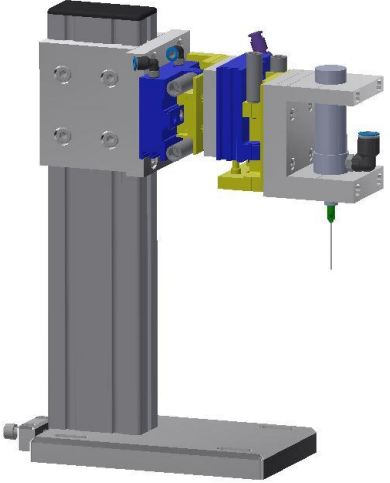
Figura 5.9. Balanceamento do Módulo I – Montagem semiautomática das bases

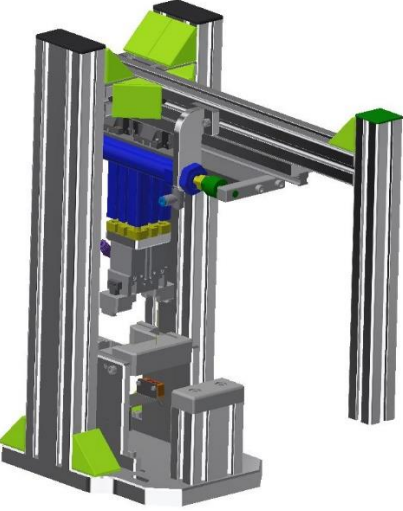
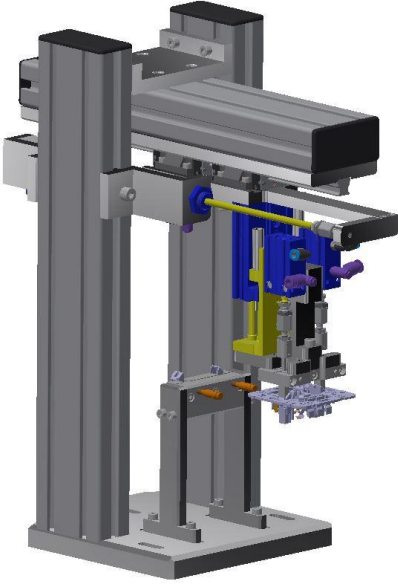
5.4.2. Módulo II – Restante montagem automática


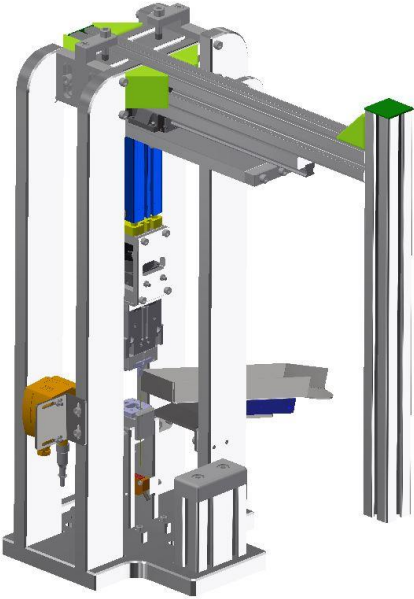
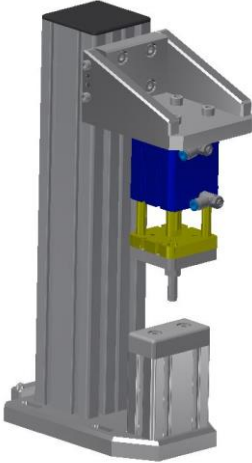
Todas as operações deste módulo intermédio são automáticas, recorrendo a automatismos com atuadores responsáveis por executar essas tarefas. Analisando as folhas técnicas foi possível estimar o tempo de cada operação de cada atuador. Como já referido,

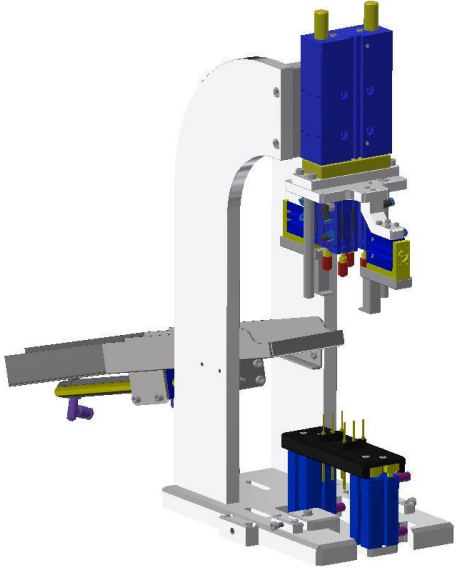
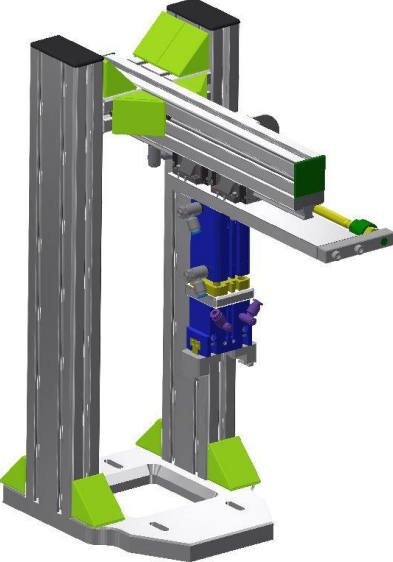
foi considerada uma margem de incerteza no cálculo dos tempos para combater este problema e uma posição conservadora nos cálculos.

Tabela 5.1. Levantamento de equipamentos – Módulo II

	Posto	Designação	Referência	Tempo (s)
	Robot não colaborativo	SCARA G3 x1	G3-351S	2
		Pinça x1	MHZ2-20D - M9PL	
	Massa	Injetor x1	DV-5325	0.41
		Cilindro x1	DGST-16-30-PA	

	Tampa	Cilindro x1	CD85N25-125C-B	0,87
		Cilindro x1	ADNGF-40-40-P-A	
		Pinça x1	HGPT-25-A-B-G2	
	Garras	Cilindro x2	DGST-12-40-PA	1,56
		Cilindro x2	DPDP-16-10-PA	
		Cilindro x1	DSNU-16-150-PA	

	Aparafusamento	Aparafusadora x2	LUM 12 PR3	0,8
		Cilindro x1	CDQSB25-75DCM - M9PL	
		Cilindro x1	CDU16-20D - M9PL	
		Cilindro x2	DMM-10-25-P-A	
	Porta tecla	Pinça x1	HGPT-25-A-B-G2	1,19
		Cilindro guiado x1	CXSM10-70	
		Cilindro rotativo x1	DSM-10-90-P-A	
		Cilindro x1	CD85N25-125C-B	
		Cilindro x1	ADNGF-32-60-P-A	
	"OFF"	Cilindro x1	ADNGF-50-30-P-A	0,32

	Ensaio	Cilindro	ADNGF-20-30-P-A x2	1,825
		Cilindro	SLS-6-10-P-A x2	
		Cilindro	DFM-20-80-P-A-GF x1	
		Cilindro	CDU10-20D-M9PL x2	
		Cilindro	DSNU-16-150-PPV- A x1	
	NOK	Pinça	HGPT-25-A-B-G2	0,94
		Cilindro	CD85N25-125C-B	
		Cilindro	ADNGF-32-60-P-A	

Todas as fontes de documentação técnica usada estão presentes no Anexo C.

Nas figuras anteriores é perceptível as características destes equipamentos que tornam o processo altamente configurável e flexível (*Reconfigurable Manufacturing System*), capaz de ser alterado rapidamente consoante as necessidades.

Utilizando as funcionalidades do Microsoft Excel foi possível representar e contextualizar os resultados obtidos, de forma a permitir uma melhor compreensão e criticar os resultados, demonstrados na Figura 5.10 e Figura 5.11. Aqui concluiu-se que as tarefas que ocupam maior tempo e candidatas ao título de “gargalo” são o posicionamento das bases

por parte do robot não colaborativo (posto 1), a colocação das garras (posto 5) e ensaio elétrico (posto 10).

Devido à grande subjetividade e margem de erro envolvida, estes valores não podem ser considerados exatos, no entanto proporcionam uma ideia das operações mais complexas e demoradas, que podem comprometer a produtividade da linha e devem ser cuidadosamente executadas.

É expectável que na prática estes valores variem, pois há vários fatores que influenciam estas operações, como a velocidade máxima para inércia aceitável, a alimentação de componentes, ligações, a precisão de movimento. No entanto espera-se que o tempo de ciclo deste processo seja de 2 segundos por produto acabado, tal como demonstrado neste subcapítulo.

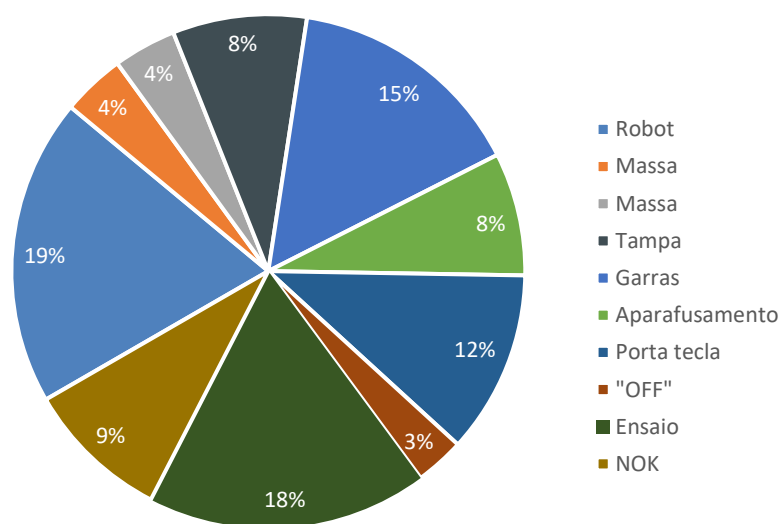


Figura 5.10. Gráfico de distribuição de tempo do Módulo II

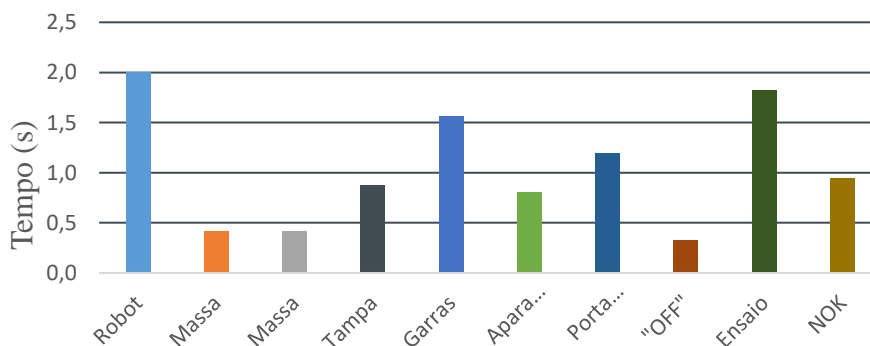


Figura 5.11. Gráfico de análise de tempos – Módulo II

5.4.3. Módulo III – Embalamento

Relativamente ao posto de embalagem, este é o mais simples dos três, onde a única operação diretamente produtiva é o embalamento, posto muito comum na empresa, estimado com 4 segundos de operação. Tendo em conta que o tempo de ciclo até este estágio é de 2 segundos, são necessários 2 operadores a embalar de forma a balancear a linha e garantir os 2 segundos de tempo de ciclo (Figura 5.7). De igual modo ao primeiro módulo, o procedimento está representado na Figura 5.12

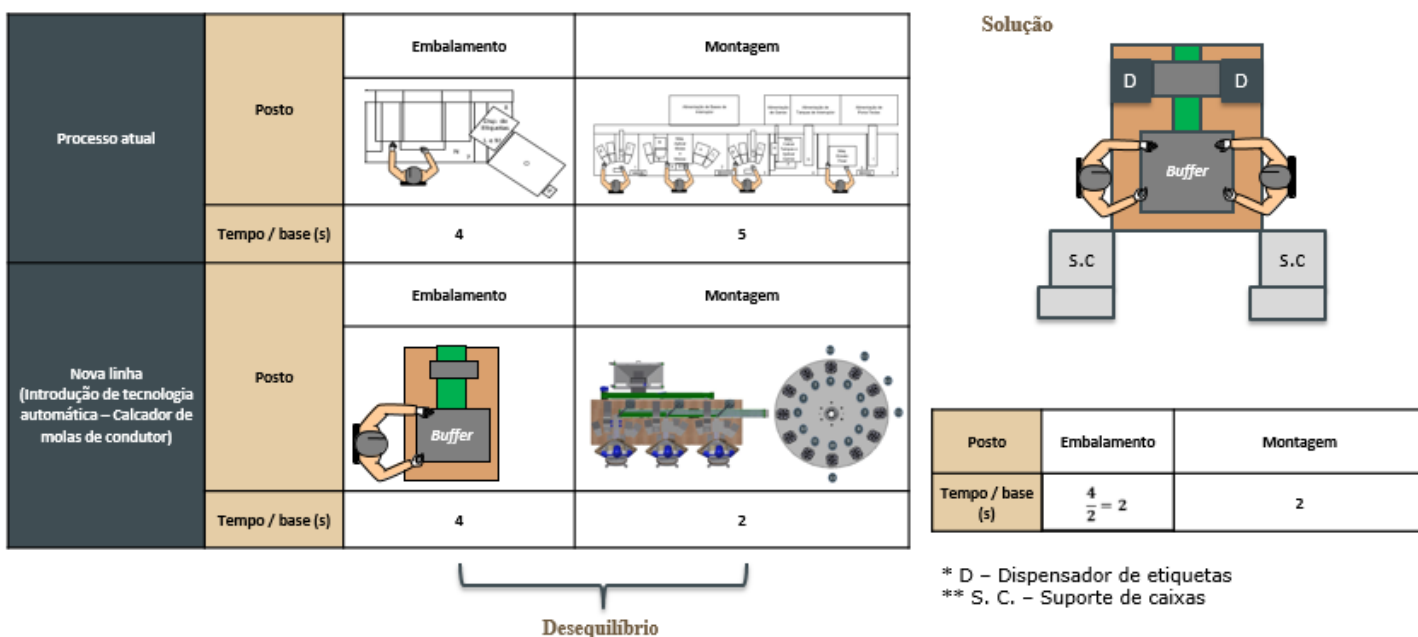


Figura 5.12. Balanceamento do Módulo III – Embalamento

6. AUTOMAÇÃO

Numa fase final de *design* da linha, foi necessário explorar soluções de automação industrial e todo o sistema de ligação entre os vários elementos que tornam o processo automático. Para tal é necessário ter em conta vários fatores como a complexidade de todo o sistema de comunicação, as restrições que condicionam as soluções encontradas e o balanço das vantagens inerente a cada aplicação.

6.1. Determinação do número de entradas e saídas

Para contextualizar então a complexidade do sistema de comunicação deste processo foi feito um levantamento de entradas e saídas de cada módulo

Nesta fase do projeto este levantamento acarreta muita incerteza pois o *design* da linha ainda não está completo, especialmente o Módulo I – Montagem semiautomática das bases.

Além disso devem ser consideradas mudanças ou acréscimos futuros, característica natural de qualquer projeto.

Após um *brainstorming* de toda a equipa ficou estabelecido que seriam consideradas 80 entradas e 60 saídas no primeiro Módulo e 120 entradas e 70 saídas relativas ao Módulo II automático. Destas, espera-se que 200 sejam relativas ao sistema pneumático. Este valor tem em conta a incerteza já mencionada e foi dimensionado por excesso.

6.2. Restrições

A restrição mais evidente encontra-se nas dimensões do *layout* desta nova linha, pois o epicentro de ligações do primeiro módulo está consideravelmente distanciado do segundo (cerca de 3 metros). Isto implica que a ligação individual tradicional necessitaria de mais que um *PLC*, ou fios enormes, que tornariam confuso o processo de montagem e manutenção, e, em alguns casos, pode ser um risco de segurança.

A outra principal restrição é o número de *I/O* necessários, que leva a um maior número de equipamentos e acessórios necessários, que mais uma vez causa constrangimento e requer maiores custos.

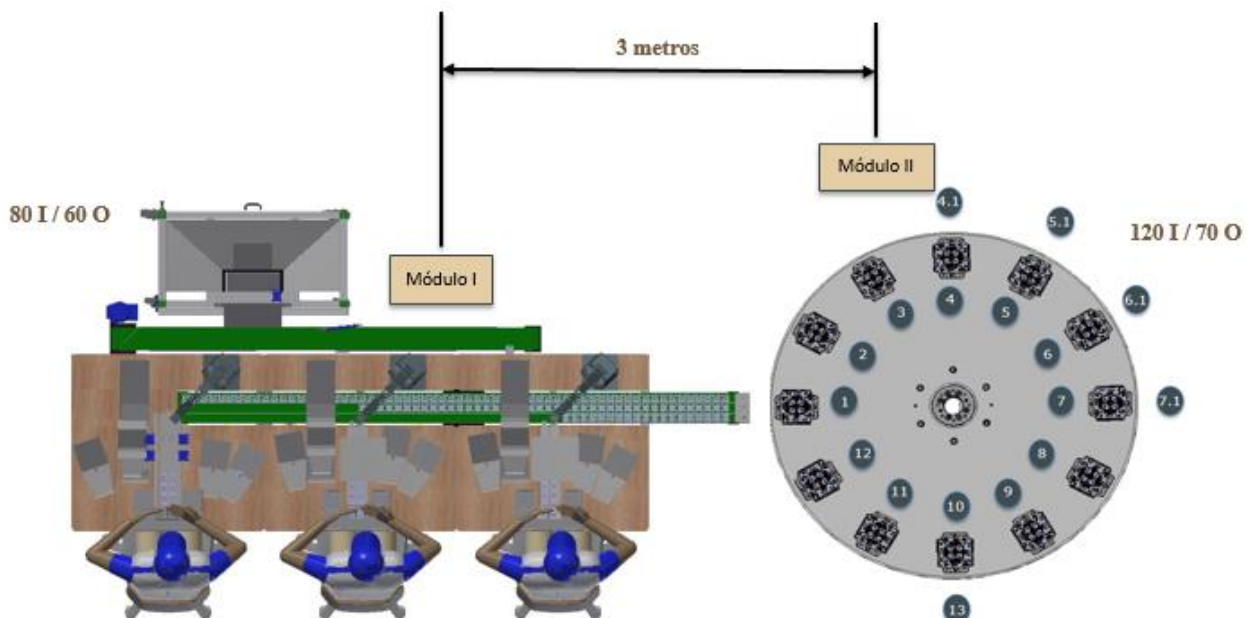


Figura 6.1. Restrições de ligação entre equipamentos automáticos

6.3. Solução encontrada

Tendo em conta as restrições mencionadas no capítulo anterior, ficou claro que a solução teria de passar por um sistema descentralizado, ou seja, que permita atacar o problema de centros de ligações distanciados, e, simultaneamente, permita criar um *Fieldbus* de dispositivos de forma a poupar as ligações e acessórios necessários.



6.3.1. Series EX 500

Durante a procura de solução, foram considerados 4 fatores críticos para a escolha desta: custo total; fiabilidade da solução; tempo de entrega e apoio por parte dessa empresa no projeto.

Cruzando estes valores, optou-se por utilizar uma solução da série *EX500*, um *Fieldbus System* fornecida pela SMC. Mais especificamente foi escolhido o *Gateway Decentralised System 2* de 128 *I/O*.

Este sistema permite a utilização de diferentes protocolos, destacados na Tabela 6.1, dos quais foi escolhido o *PROFINET™* devido às suas claras vantagens.

Tabela 6.1. Comparação de protocolos, (SMC)

System Comparison Table	Gateway Decentralised System 2	Gateway Decentralised System (Current model)
Protocol	 EtherNet/IP	DeviceNet 
Number of inputs/outputs (Number of inputs/outputs per branch)	128 inputs/128 outputs (32 inputs/32 outputs)	64 inputs/64 outputs (16 inputs/16 outputs)
Number of valve manifold connections (Number of connections per branch)	Max. 8 Units* (Max. 2 Units)	Max. 4 Units (1 Unit)
Number of Input Unit connections (Number of connections per branch)	Max. 8 Units (Max. 2 Units)	Max. 4 Units (1 Unit)
Branch cable length	Max. 20 m	Max. 10 m
Enclosure	GW Unit: IP65 SI Unit: IP67 Input Unit: IP67	GW Unit: IP65 SI Unit: IP67 Input Unit: IP65
Function	Web server function (Valve operation test, Connection diagnostic, Short-circuit diagnostic)	—
Page	8	48

O componente denominado *GW Unit* permite conectar até 4 ramos de sistemas de I/O, com um máximo de 128 entradas e saídas, ou seja, 32 por cada porto (ramo). Visto que são estimados cerca de 200 entradas ou saídas (Capítulo 6.1), são precisos 2 produtos destes para colmatar as necessidades.

Ainda no âmbito da série destas soluções, a SMC proporciona unidades de entrada e saída, mais especificamente unidades de agrupamento de entradas (ex: sensores), “*Input Unit*”, e blocos de válvulas (saídas), “*Valve Manifold*”. Estas unidades têm um mecanismo *switch* (*SI Unit*) integrado que permite então ligar unidades em série até um máximo de 2 unidades de entradas e saídas por ramo, perfazendo 32 I/O por ramo (Figura 6.2).

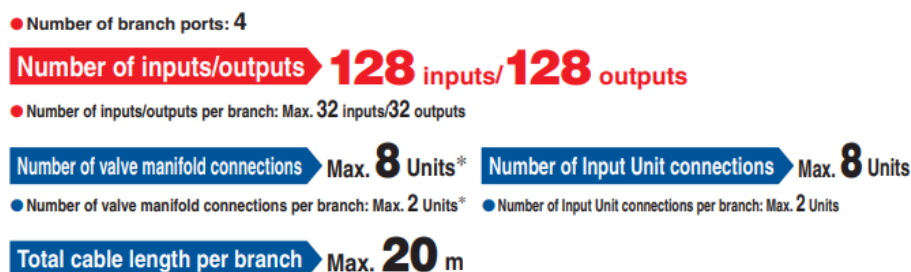


Figura 6.2. Descrição de interface I/O, (SMC)

De forma a esquematizar o processo descrito anteriormente foi desenvolvida a Figura 6.3. Como podemos observar, todo o sistema está conectado sobre o protocolo *PROFINET™*, caracterizado por fios verdes (Figura V. 1). A configuração deste sistema é

linear (Tabela 3.8), com o controlador diretamente ligado aos equipamentos *gateway*, que por sua vez se dividem em 4 ramos de interfaces *I/O*, com uma capacidade ramal teórica de 32 *I/O* (limitado a um máximo de 2 *Input Units* e 2 *Valve Manifolds* por porto), totalizando 128 *I/O* por cada equipamento *gateway*. Todos os componentes desta solução estão especificados no Anexo B.

6.4. Vantagens

Esta solução trouxe muitas vantagens ao projeto. Primeiramente retirou a necessidade de dois autómatos, uma para cada módulo, ou inúmeras ligações extensas, pois através do equipamento *GW Unit* é possível descentralizar o sistema e funcionar como se de facto dois módulos se tratassem. Além disso simplificou bastante esta ligação, sendo apenas necessárias uma ligação extensa entre os módulos. A nível local, esta filosofia de *Fieldbus* permite ligar as diferentes unidades de entrada e saída em série mais perto da zona de trabalho e evitar a tradicional concentração de ligações no autómato. Em adição dá a oportunidade ao operador de agrupar ligações do mesmo equipamento ou função na mesma unidade de entrada ou saída, tornando o processo de montagem e manutenção mais fácil e simples.

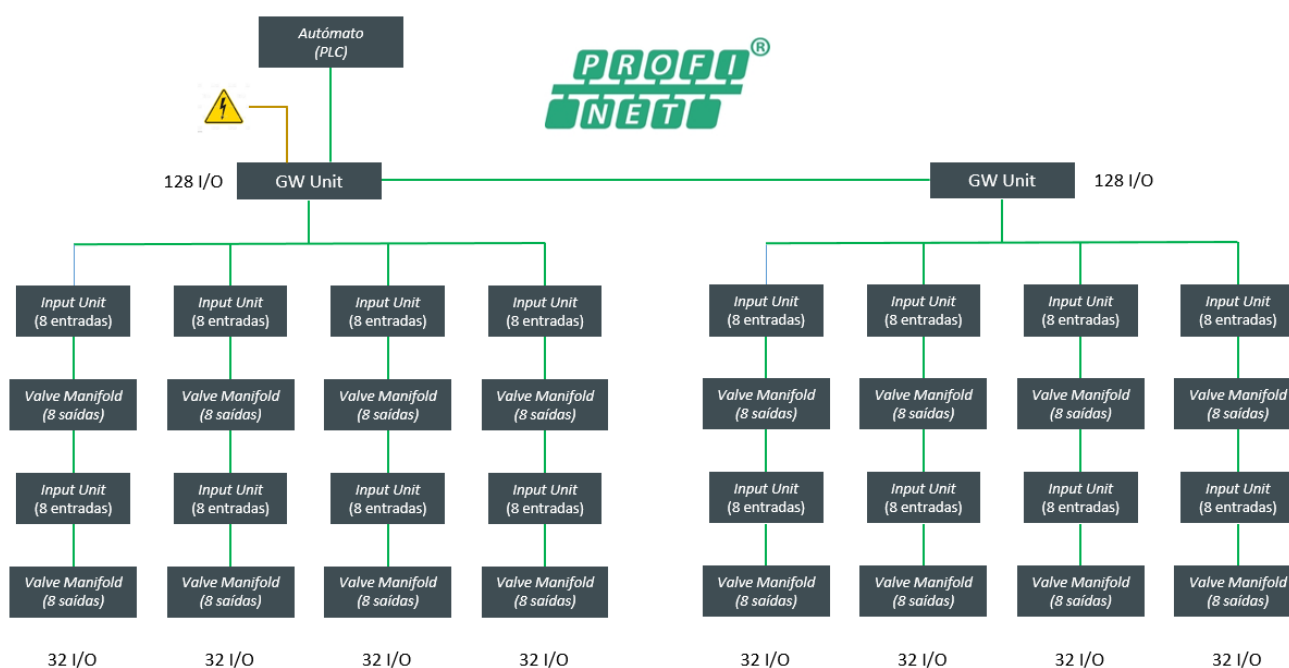


Figura 6.3. Diagrama da rede de comunicação

7. ANÁLISE DE RISCOS

Este capítulo é respetivo ao trabalho feito na vertente de Segurança e Saúde no Trabalho (SST), mais especificamente a análise e avaliação de todos os riscos relacionados com todos os equipamentos. O objetivo desta análise é ultimamente entender a *performance* necessária dos sistemas de controlo com função de segurança (*SRP/CS*).

Esta tarefa é especialmente importante para consciencializar dos riscos inerentes à nova linha de montagem, dimensionar a categoria de *SRP/CS* necessária e escolher um sistema de controlo que cumpra os requisitos de função de segurança e baixo custo. Com isto é possível atingir um ambiente de trabalho seguro, ter melhor documentação do processo e certificar este de forma a operar e produzir em conformidade com as normas nacionais e europeias.

A metodologia adotada está descrita no Capítulo 3.2.

7.1. Metodologia *Performance Level*

7.1.1. Definição dos limites da máquina

Neste primeiro passo, é necessário definir precisamente os limites de utilização da máquina. Isto é feito para descrever de forma geral o funcionamento da linha, o contexto em que os riscos são analisados e delinear as principais fontes de perigo sob correto uso da máquina. Além disso, este passo também pode servir de salvaguarda à empresa em caso de acidente relacionado com uso de máquinas fora do limite de utilização.

7.1.2. Identificação e Avaliação dos riscos

Nesta fase estão envolvidos dois principais passos: a identificação de riscos associados e avaliação destes (Tabela 7.1).

De forma a organizar e estruturar a informação, a linha é dividida em três módulos novamente. Além disso, os elementos são ordenados pela mesma ordem de trabalho dos operadores:

Tabela 7.1. Avaliação de riscos

	Equipamento	Riscos associados	Avaliação de riscos
Módulo I	Calcador de molas de condutor	Choque ou Impacto	1.2.1 -> b - B
		Esmagamento/Entalamento	2.2.1 -> d - 3
	Tapete	Enrolamento	1.1.1 -> a - B
Módulo II	Robot não colaborativo	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
		Entalamento	1.2.2 -> c - 2
		Entalamento (eixos)	2.1.2 -> d - 3
	Prato rotativo	Corte p/ cisalhamento	1.2.2 -> c - 2
		Agarramento ou Enrolamento	1.2.2 -> c - 2
		Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
	Doseador de massa	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
		Entalamento	1.2.2 -> c - 2
		Perfuração ou picadela	2.2.2 -> e - 4
	Calcador de tampa	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
		Esmagamento	2.2.2 -> e - 4
	Manipulador de Garras	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
		Entalamento	2.2.2 -> e - 4
		Perfuração ou picadela	2.2.2 -> e - 4
	Aparafusadora	Esmagamento	2.2.2 -> e - 4
		Perfuração ou picadela	2.2.2 -> e - 4
	Calcador porta tecla	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
		Esmagamento	2.2.2 -> e - 4
	Calcador "OFF"	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2
		Esmagamento	2.2.2 -> e - 4
	Teste Superior	Choque ou Impacto	1.2.1 -> b - B
		Entalamento	2.2.1 -> d - 3
	Teste Inferior	Choque ou Impacto	1.2.1 -> b - B
		Entalamento	2.2.1 -> d - 3
Extração OK's	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2	
	Entalamento	1.2.2 -> c - 2	
Extração NOK's	Choque ou Impacto	1.2.2 -> c - 2	
	Entalamento	1.2.2 -> c - 2	
Módulo III	Tapete	Enrolamento	1.1.1 -> a - B
Geral	Arestas vivas	Corte	1.2.1 -> b - B
	Ergonomia	Danos físicos	1.2.1 -> b - B
	Riscos elétricos/pneumáticos	Arranque intempestivo	2.1.2 -> d - 3
	Riscos elétricos	Eletrocussão, queimadura, etc	2.1.2 -> d - 3

A avaliação de riscos foi feita segundo o procedimento especificado no Capítulo 3.2.1.1.1. A seguinte determinação de *PL* necessário e a categoria equivalente foram conseguidas recorrendo à Figura 3.3 e Tabela 3.4.

Todas as decisões e medidas adotadas após esta fase foram de acordo com a Diretiva Máquinas e todas as normas harmonizadas aplicáveis que engloba, constadas na Tabela VI.1.

7.1.3. Seleção de SRP/CS adequado

Como podemos observar no capítulo anterior, os perigos e riscos associados estão concentrados no módulo central de montagem automática. Isto pode ser facilmente explicado pelo enorme uso de tecnologia, desde o *robot* não colaborativo com movimentos rápidos e perigosos a equipamentos desenhados para o propósito de montagem, com atuadores e sequência de movimentos ameaçadores.

Posto isto, ficou decidido utilizar proteções fixas, sensores magnéticos de segurança de categoria 4 nas portas e relés de segurança de categoria 4 ligados a estes sensores como *SRP/CS`s*. além disso serão aplicadas válvulas de anti-retorno pilotado de forma a parar a máquina em segurança.

7.1.3.1. Proteções fixas

Visto que os maiores riscos estão todos situados no módulo automático intermédio, é possível atacar este problema com medidas mais abrangentes que cumpram a função de segurança em relação a todos os riscos.

O exemplo mais óbvio é a construção de uma gaiola que isole todo o módulo automático, e conseqüentemente todos os riscos ameaçadores, tornando impossível a intervenção humana e assim acidentes. No entanto isto não é prático pois impede qualquer ação de manutenção e desencravamento. A solução para este problema é a implementação de portas estratégicas que garantam o acesso a pontos vitais da máquina, sem dar oportunidade à emergência de acidentes.

7.1.3.1. Sensores magnéticos de segurança

Ainda relacionado com a proteção fixa, todas as portas que deem acesso a zonas perigosas estão equipadas com os sensores magnéticos de segurança ilustrados na Figura 7.2, que de facto têm a função de segurança ativa. Estes sensores têm uma categoria de *SRP/CS* de 4, comprovada pela redundância de circuitos no seu esquema interna representada na Figura 7.3, tal como explicado no Capítulo 3.2.1.1.4.1. Na Figura 7.1 é possível observar

estes sensores instalados no interior das portas, destacados pelas circunferências encarnadas. Além disso encontra-se no Apêndice VI uma aplicação desta solução noutra linha de montagem da empresa (Figura VI. 1).

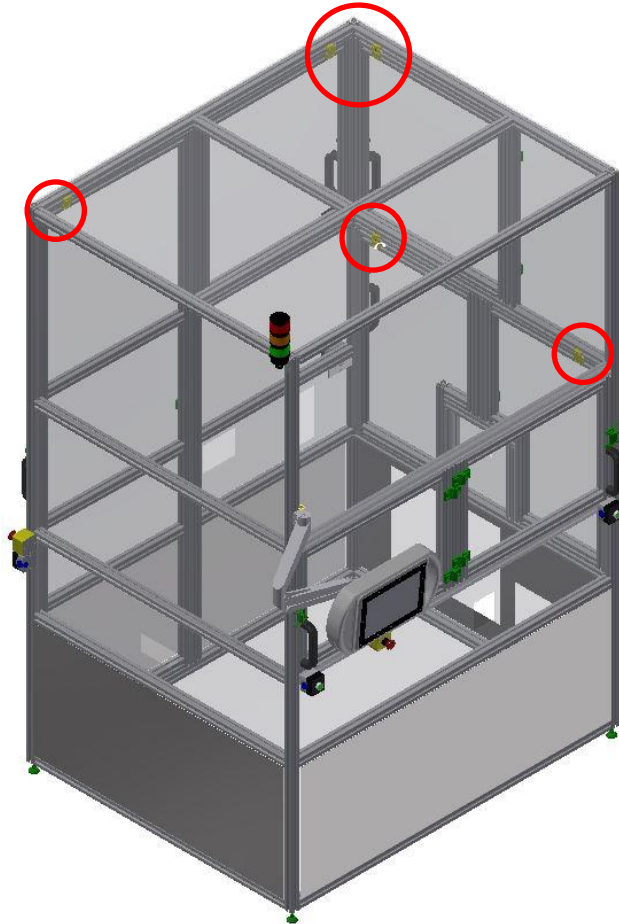


Figura 7.1. Proteção fixa (gaiola)



Figura 7.2. Sensor magnético (PSEN 1.1p-22/8 mm), (PILZ)

Connections

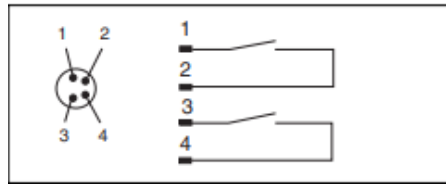


Figura 7.3. Esquema elétrico redundante (*PSEN 1.1p-22/ 8 mm*), (PILZ)

7.1.3.2. Relé de segurança

Em última instância, é o relé de segurança que tem a função de cortar o fornecimento de ar parar de imediato todo o funcionamento da máquina. De modo semelhante ao sensor, este *SRP/CS* também é classificado com categoria 4 (Tabela 7.2) devido à redundância de circuitos. Esquemáticamente o relé de segurança está ligado em série e redundantemente com todos os sensores. Isto é, quando uma porta abre, ou seja, é aberto acesso às zonas de perigo e a segurança é comprometida, o sensor envia um sinal redundante ao relé de segurança, que por sua vez envia também um sinal redundante aos sistemas de corte de energia, neste caso ar pressurizado, provocando a paragem em segurança da máquina. De modo semelhante aos sensores, também esta solução está já aplicada em processos da empresa (Figura VI. 2).



Figura 7.4. Relé de segurança (*PNOZ X2.8P*), (PILZ)

Tabela 7.2. Ficha técnica *PNOZ X2.8P*, (PILZ)

PNOZ X2.8P

Safety-related characteristic data	
PL in accordance with EN ISO 13849-1	PL e (Cat. 4)
Category in accordance with EN 954-1	Cat. 4
SIL CL in accordance with EN IEC 62061	SIL CL 3
PFH in accordance with EN IEC 62061	2.31E-09
SIL in accordance with IEC 61511	SIL 3
PFD in accordance with IEC 61511	2.03E-06
t_M in years	20

7.1.3.1. Válvula anti-retorno pilotado

Esta medida é direcionada aos equipamentos cuja paragem, seja planeada ou de segurança (ex.: acionamento pelas medidas anteriormente descritas), podem conduzir a acidentes e representam assim riscos sérios. A função da válvula anti-retorno pilotado é garantir que os atuadores ficam completamente estacionários em caso de paragem. Isto é especialmente importante em casos em que os equipamentos suportam cargas pesadas ou fazem movimentos bruscos, sendo necessários evitar as quedas dessas cargas, que podem causar muitos danos.

Este mecanismo tem por base o anti-retorno tradicional, com fluxo unidirecional. No entanto, de forma a permitir o avanço do atuador, tem uma entrada denominada de entrada “piloto” que abre o fluxo na válvula, e permite o normal funcionamento do atuador.

Em caso de paragem de fornecimento de energia, nomeadamente ar comprimido, não existe nenhuma força a contrariar a mola de anti-retorno, fazendo com que o atuador fique estacionário e evite alguns perigos.

Em contrapartida, esta medida pode apresentar algumas desvantagens em alguns casos, especialmente na situação de Entalamento e dificulta as ações de manutenção.

O funcionamento deste mecanismo está representado explicitamente na Figura 7.6.

De igual modo às soluções anteriores, esta válvula está muito aplicada em outros processos e ilustrada na Figura 7.5.



Figura 7.5. Válvula anti-retorno pilotado

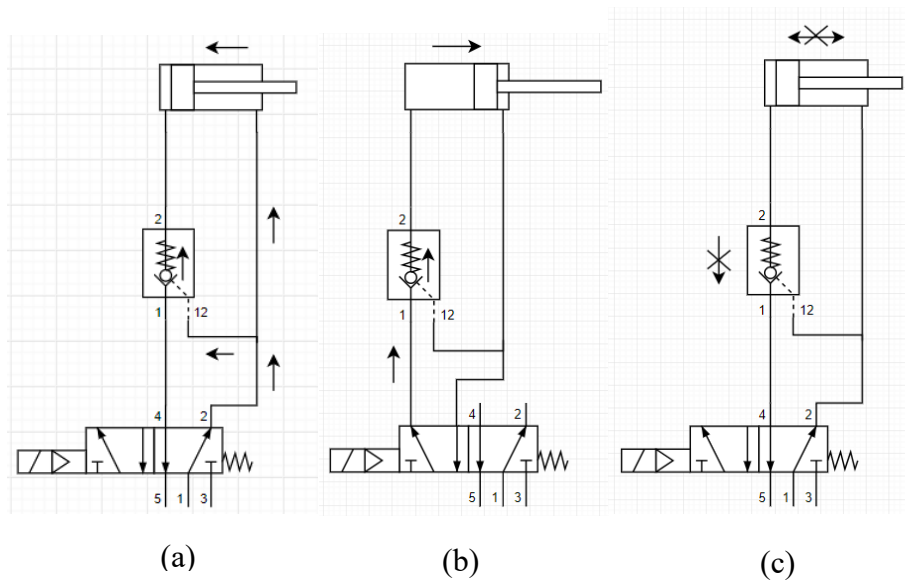


Figura 7.6. Esquema e funcionamento de Válvula anti-retorno pilotado a) Recuo do atuador; b) Avanço do atuador; c) Função de stop em caso de paragem de fornecimento de ar comprimido

7.1.4. Verificação final

Segundo o procedimento adotado para a implementação de medidas de segurança, destacado no Capítulo 3.2.1.1.4, seria necessário calcular o *Performance Level* das medidas aplicadas e verificar a conformidade desta com o valor definido como necessário na primeira fase (Capítulo 3.2.1.1.5).

No entanto, visto que as medidas aplicadas têm um nível de categoria 4, não é necessário fazer esta verificação, visto que a função de segurança já está no valor máximo.

8. CONCLUSÕES

Neste capítulo pretende-se fazer um balanço sobre o trabalho desenvolvido, as principais dificuldades encontradas e a conformidade com os objetivos definidos.

A primeira e derradeira restrição deste projeto é a sua dimensão com um número de tarefas complexas e longas, sendo o objeto de trabalho uma das linhas de montagem chave à empresa e a maior máquina projetada internamente. Isto traduz-se naturalmente num planeamento superior do projeto, que se iniciou em novembro de 2021 e com data prevista de aprovação no final do ano de 2022. Ou seja, o estágio curricular do qual nasce esta dissertação insere-se após o início do projeto e num relativo pequeno espaço de tempo.

Este fator contribuiu para algumas dificuldades iniciais, no sentido de conhecer os processos e métodos da empresa, estudar a linha de montagem atual de interruptores série 21 e integrar o projeto numa fase um pouco avançada. Posto isto, vários parâmetros já estavam definidos e desenvolvidos.

Por outro lado, a equipa é extremamente profissional, muito motivada, unida e com um *know-how* e multi-especialidade (1 Gestor de Planos; 3 Projetistas; 1 Responsável de manutenção; 1 Programador, 1 Responsável de Infraestruturas e Energias e 1 Responsável Administrativa) que simplificaram este complexo projeto e o tornaram interessante na minha ótica de aprendiz.

Numa fase inicial, o grau de automatização do processo já estava definido, tal como descrito na Figura 5.3. O *design* da nova linha de montagem foi uma das tarefas mais demoradas, especialmente o módulo de montagem automático, com a conceção de todos os equipamentos automáticos. Esta fase baseou-se em desenhar e reconfigurar o *layout* e a sequência de operações deste novo processo, tendo em conta os objetivos definidos previamente. Paralelamente à conceção deste novo processo foram feitas decisões implicativas para o balanceamento da linha de forma a otimizar os recursos nesta linha. O *know-how* e o histórico tiveram um grande papel aqui, com vários equipamentos e aplicações já instaladas e controladas, o facilitou o desenvolvimento do projeto. Todos estes aspetos estão especificados no Capítulo 5.

Num período final de *design*, já com vários equipamentos e fatores determinados, surgiu a oportunidade de estudar soluções para a rede de comunicação entre todos os

equipamentos de produção e o controlador programável. Estas ligações oferecem o potencial de automação e autonomia ao processo, evitando a intervenção humana e maior cadência de produção. Vários critérios foram considerados na procura desta solução, tais como o custo, a standardização, esforços de montagem e manutenção e segurança. Daqui surgiu uma solução da SMC, após uma reunião com o respetivo comercial Nuno Soares, denominada *EX500 Series*, sintetizada no Capítulo 6.3.1. Esta solução permitiu descentralizar a rede de comunicação em dois principais módulos (I & II), diminuiu o número de componentes necessários recorrendo a ligação em série de *Interfaces I/O* segundo um *Fieldbus* e, por fim, deu oportunidade de organizar as ligações de forma a diminuir o esforço de montagem e manutenção. Nesta tarefa uma das maiores dificuldades encontradas foi o prazo de entrega de vários produtos, que dificultou a implementação de uma solução viável e económica.

Paralelamente à última fase mencionada, após a conclusão do *design*, ou grande parte dele, fui responsável por realizar a deteção de perigos causados por equipamentos ou mecanismos de produção e posteriormente avaliar os riscos, com o objetivo de implementar dispositivos ou medidas de segurança que dessem conformidade ao processo relativamente à Diretiva Máquinas e assim obter certificação CE. A metodologia de avaliação de riscos usada pela empresa vai de acordo com a especificada na norma ISO 13849-1:2015, detalhada no Capítulo 3.2.1. De forma a combater a subjetividade inerente desta avaliação, esta apreciação foi feita de acordo com outras já feitas para equipamentos semelhantes em outras aplicações, resultando numa maior standardização de processos da empresa. Após avaliados os riscos e dimensionadas as medidas necessárias para os combater foi necessário escolher então os dispositivos ou medidas cuja função de segurança fosse suficiente para combater os riscos. As medidas aplicadas, presentes no Capítulo 7.1.3, resultaram de outras já aplicadas em processos semelhantes, com um bom histórico a apoiar a decisão.

Apesar de o projeto se apresentar longe de estar concluído, a equipa está confiante que os objetivos definidos no Capítulo 5.1 vão ser cumpridos durante o futuro funcionamento desta nova linha. Prevê-se uma diminuição do tempo de ciclo em 60% para os três produtos, fruto dos esforços de *design* da linha e equipamentos automáticos. Paralelamente a esse ganho, houve várias soluções adotadas, como por exemplo a rede de comunicação entre equipamentos automáticos, que permitiram incrementar alguns ganhos, que a longo prazo podem tomar um valor considerável. Igualmente importante foram as medidas tomadas que tornaram o processo transversalmente mais seguro, que garantiram a conformidade do

processo com normas internacionais e declaração CE. Estas são especialmente importantes para garantir a segurança dos colaboradores, criar um bom ambiente de trabalho e permitir a operação do processo em acordo com a legislação.

Em retrospectiva, as dificuldades que se destacaram, como já referido, foram os prazos de entrega de vários componentes, que comprometiam o cumprimento de prazos das tarefas, e algumas questões técnicas devido a soluções nunca antes utilizadas pela equipa como as alimentações de garras e tampas e os *robots* colaborativos (Figura II. 2). Por fim, uma das maiores adversidades que se avizinha está na maquinação interna de todos os componentes dentro do prazo definido devido ao paralelismo com outros projetos de inovação e desenvolvimento.

8.1. Trabalho futuro

Na continuidade da sequência deste mesmo projeto propõe-se a realização de tarefas relacionadas com o trabalho já feito.

Com o levantamento feito de todas os componentes do sistema pneumático torna-se interessante fazer o esquema pneumático de todo o sistema. Além de ser fundamental na fase de montagem, é também bastante útil em ações de manutenção e levantamentos energéticos.

Similarmente recomenda-se desenhar o esquema elétrico de todos os dispositivos envolvidos com vantagens muito semelhantes ao anterior.

Devido à complexidade e tempo necessário de maquinação de peças, esta teve início desde cedo após a definição de alguns componentes, e deve ser continuada em paralelo com todas as operações futuras.

Simultaneamente ao fabrico das peças, deve ser considerada a montagem inicial e o início da programação do processo automático, ao longo do avanço do projeto.

Numa ótica de melhoria, o trajeto é claramente a automação do Módulo I – Montagem semiautomática das bases e do Módulo III – Embalamento.

8.2. Última nota

Chegando ao fim este estágio curricular, esta experiência revelou-se uma das experiências mais desafiantes e gratificantes do meu percurso até ao momento. Este período de seis meses simboliza o meu primeiro contacto com a indústria, numa equipa fantástica

que me recebeu muito bem e garantiu disponibilidade para me ajudar no processo de aprendizagem. Em adição, a empresa EFAPEL S.A. demonstrou ser uma ótima escola com várias valências produtivas e recheada de grandes profissionais.

Fico eternamente grato por tudo o que aprendi durante estes seis meses e tenciono usar isto para crescer pessoalmente e profissionalmente no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Battaia, O., Delorme, X., Dolgui, A., & Grimaud, F. (2013). *Integrated Decision Making in Flow Line Balancing*. *IFAC Proceedings Volumes*, 831-838.
- Becker, C., & Scholl, A. (2003). Obtido de Friedrich-Schiller-Universität Jena: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.87.2382&rep=rep1&type=pdf>
- Benderbal, H., & Benyoucef, L. (2019). *A New Hybrid Approach for Machine Layout Design Under Family Product Evolution for Reconfigurable Manufacturing Systems*. *IFAC-PapersOnLine*, 1379-1384.
- Boysen, N., Schulze, P., & Scholl, A. (2022). *Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years?* *European Journal of Operational Research*, 797-814.
- Burggräf, P., Dannapfel, M., Adlon, T., & Föhlisch, N. (2021). *Adaptive assembly systems for enabling agile assembly – Empirical analysis focusing on cognitive worker assistance*. *Procedia CIRP*, 319-324.
- DOBOT MG400. (s.d.). Obtido de DOBOT: <https://www.dobot.cc/products/mg400-overview.html>
- EFAPEL S.A.;. (2022). *Mec 21*. Obtido de Produtos EFAPEL S.A.: <https://www.efapel.pt/pt/informacoes-tecnicas/logus-90>
- EPSON. (s.d.). *Epson SCARA G3-351S*. Obtido de https://www.epson.eu/en_EU/products/robots/scara-g-series%C2%A0/epson-scara-g3-351s/p/9720
- Falkenauer. (2013). *Real-world Line Balancing of Very Large Products*. *IFAC Proceedings Volume*, 1732-1737.
- Flanders. (1925). *Design, manufacture and production control of a standard machine*.
- Francis, R., McGinnis, L., & Jr., W. (1992). *Facility layout and location : an analytical approach*. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall.
- Groover. (2019). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing, 5th Edition*. Pearson.
- Hounshell, D. A. (1985). *From the American System to Mass Production, 1800-1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States (Studies in Industry and Society)*.

- Hu, S. J., Ko, J., Weyand, L., ElMaraghy, H. A., Lien, T., Koren, Y., . . . Shiptalni, M. (2011). *Assembly system design and operations for product variety*. *CIRP Annals*, 715-733.
- Ippolito, R., De Filippi, A., & Micheletti, C. F. (1980). *Formulation of a Stochastic model for the evaluation of the specific consumption of electric energy of a mechanical plant*. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- ISO. (2015). Norma 13849-1:2015. *ISO 13849-1:2015*. ISO- International Organization for Standardization. Obtido de ISO 13849-1:2015: <https://www.iso.org/standard/69883.html>
- Kidam, K., Hussin, N. E., Hassan, O., Ahmad, A., & Johari, A. H. (2014). *Accident prevention approach throughout process design life cycle*. *Process Safety and Environmental Protection*, 412-422.
- Kiran, D. R. (2022). *Chapter Twenty - Plant location and layout*. Em D. R. Kiran, *Principles of Economics and Management for Manufacturing Engineering* *Principles of Economics and Management for Manufacturing Engineering* (pp. 289-299). Butterworth-Heinemann.
- MTM Association. (2019). *MTM-1 Data Card Metric*. Obtido de MTM Association: https://mtm.org/fileadmin/mtm_upload/Download/MTM-1_data_card_EN.pdf
- McMullen, P. R., & Frazier, G. V. (1997). *A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations*. *International Journal of Production Economics*, 177-190.
- Michalos, G., Makris, S., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2010). *Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 81-91.
- Mitrofanov. (1966). *Scientific Principles of Group Technology*. Madison, Wisconsin: National Lending Library for Science and Technology.
- Nancy, L. H., & Wemmerlöv, U. (1984). *Group Technology and Productivity*. Obtido de Harvard Business Review: <https://hbr.org/1984/07/group-technology-and-productivity>
- Newman, S. T., Nassehi, A., Imani-Asrai, R., & Dhokia, V. (2012). *Energy efficient process planning for CNC machining*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 127-136.
- Nof, S. Y., Wilhelm, W., & Warnecke, H. (1997). *Industrial Assembly*. Chapman & Hall.
- Otto, A., & Li, X. (2020). Product sequencing in multiple-piece-flow assembly lines. *Omega*.
- Phillips. (1997). *Manufacturing Plant Layout: Fundamentals and Fine Points of Optimum Facility Design*. Society of Manufacturing Engineers.

-
- PILZ. (s.d.). *PNOZ X2.8P Catalog*. Obtido de https://www.is-com.ru/files/PNOZ_X2_8P_en.pdf
- PILZ. (s.d.). *PSEN 1.1p-22 Catalog*. Obtido de https://www.galco.com/techdoc/pilz/504222_dat.pdf
- Pires, N. (2000). *Object-oriented and distributed approach for programming robotic manufacturing cells*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29-42.
- Pires, N. (2005). *Complete robotic inspection line using PC-based control supervision and parameterization program*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 11-17.
- Pires, N. (Abril de 2021). Material de Apoio. Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Plant Layout*. (23 de Agosto de 2013). Obtido de eCourses Online: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=1133>
- Porto Editora. (14 de 06 de 2022). *Infopédia*. Obtido de Dicionários Porto Editora: [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$protocolos-de-comunicacao](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$protocolos-de-comunicacao)
- Prevention, N. I. (2010). *Prevention through Design*.
- Profinet Technology*. (s.d.). Obtido de *PI North America - The Leader in Industrial Ethernet & Fieldbus*: <https://us.profinet.com/technology/profinet/>
- Putzer, H. J., & Onken, R. (2003). *COSA – A generic cognitive system architecture based on a cognitive model of human behavior*. *Cognition Technology and Work*, 140-151.
- Rebelo, F. (2004). *Ergonomia no dia a dia*. Edições Sílabo.
- S.A., E. (2022). *Mec 21*. Obtido de Catálogo EFAPEL S.A.: <https://www.efapel.pt/pt/informacoes-tecnicas/logus-90>
- Sciences, N. R. (1998). *Visionary Manufacturing Challenges for 2020*. *Board on Manufacturing and Engineering Design*.
- Sena, F., & Pereira, F. (2012). *Fiabilidade e sua Aplicação à Manutenção*. Publindústria.
- SMC. (s.d.). *EX-500 Series Catalog*. Obtido de https://static.smc.eu/pdf/EX500-A_EU.pdf
- Sousa, A. J. (2005). *Programação de autómatos*. Obtido de Conceção de automatismos: https://web.fe.up.pt/~asousa/tsca/Omron/cursos_omr/plc10_V1_0.pdf
- Standardization, I. O. (Dezembro de 2015). *ISO 13849-1:2015 Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design*. Obtido de <https://www.iso.org/standard/69883.html>
- The Difference between PROFIBUS and PROFINET*. (10 de Junho de 2010). Obtido de *PI North America - The Leader in Industrial Ethernet & Fieldbus*: <https://us.profinet.com/the-difference-between-profibus-and-profinet/>
-

- Wang, L., Feng, H., & Cai, N. (2003). *Architecture design for distributed process planning. Journal of Manufacturing Systems*, 99-115.
- Wang, L., Keshavarzmanesh, S., Feng, H., & Buchal, R. O. (2008). *Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- WEISS. (s.d.). *Rotary Indexing Table TC*. Obtido de <https://www.weiss-world.com/PDFs/en/product%20ca>
- Zhang, H., Zhang, C., Peng, Y., Wang, D., Tian, G., Liu, X., & Peng, Y. (2018). *Balancing Problem of Stochastic Large-Scale U-Type Assembly Lines Using a Modified Evolutionary Algorithm. IEEE Access*, 78414 - 78424.

ANEXO A



● ESPECIFICAÇÕES

		G3-251	G3-301		G3-351		
		Mesa	Mesa	Múltiplo	Mesa	Múltiplo	
Tipo de montagem							
Comprimento do braço	Braços N°1, N°2	250 mm	300 mm		350 mm		
Peso (cabos não inclusos)			14 kg				
Repetibilidade	Juntas N°1, N°2	±0,008 mm	±0,010 mm				
	Junta N°3		±0,010 mm				
	Junta N°4		±0,005 graus				
Max. motion range	Reto	Junta N°1	±140 graus	±140 graus	±115 graus	±140 graus	±120 graus
		Junta N°2 Padrão	±141 graus	±142 graus	±135 graus	±142 graus	
		Junta N°2 Limpa	±137 graus	±141 graus	±135 graus	±142 graus	
	Curvo	Junta N°1 Mão Direita	-	-125-150 graus	-	-110-165 graus	-105-130 graus
		Junta N°1 Mão Esquerda	-	-150-125 graus	-	-165-110 graus	-130-105 graus
		Junta N°2 Mão Direita Padrão	-	-135-150 graus	-	-120-165 graus	-120-180 graus
		Junta N°2 Mão Direita Limpa	-	-135-145 graus	-	-120-160 graus	-120-150 graus
		Junta N°2 Mão Esquerda Padrão	-	-150-135 graus	-	-165-120 graus	-160-120 graus
		Junta N°2 Mão Esquerda Limpa	-	-145-135 graus	-	-160-120 graus	-150-120 graus
	Todos os modelos	Junta N°3 Padrão		150 mm			
		Junta N°3 Limpa		120 mm			
		Junta N°4		±360 graus			
	Carga útil	Avaliado		1 kg			
		Máximo		3 kg			
Padrão cycle time ¹		0,36 seg.	0,37 seg.				
Junta N°4 allowable moment of inertia ²	Avaliado		0,005 kg·m ²				
	Máximo		0,050 kg·m ²				
Junta N°3 força descendente			150 N				
Linhas elétricas			15-Pinos (D-Sub)				
Linhas pneumáticas			Ø4 mm x 1, Ø6 mm x 2				
Ambiente de instalações			Padrão / Sala Limpa (ISO 3) e ESD				
Controladores disponíveis			RC700A				
Normas de segurança			Marca CE, Diretiva EMC, Diretiva de Máquinas, Diretiva RoHS ANSI/RIA R15.06 UL1740 NFPA 79				

Figura A. 1. Robot não colaborativo, (EPSON)



TC 220T

DADOS TÉCNICOS

Diâmetro máximo de montagem recomendado:	aprox. 1100 mm	Precisão de indexação (arc seg):	Posições 2-12: $\pm 20''$ Posições 16-24: $\pm 30''$ Posições 30-36: $\pm 40''$ precisão maior de posicionamento sob solicitação
Diâmetro do disco:	220 mm	Precisão de parada:	(no \varnothing 220 mm) Posições 2-12: $\pm 0,011$ mm Posições 16-24: $\pm 0,016$ mm Posições 30-36: $\pm 0,021$ mm
Sentido de rotação:	esquerda – direita ou alternado	Max. circularidade do disco:	(no \varnothing 220 mm) 0,01 mm
Posições:	2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 30, 36, outras posições sob solicitação	Max. circularidade do disco:	0,01 mm
Frequência de operações:	até aprox. 220 ciclos/min., dependendo do momento de inércia de massa e do ângulo de rotação	Paralelismo máximo da superfície do disco em relação ao apoio da carcaça:	(no \varnothing 220 mm) 0,03 mm
Tensão:	230 / 400 V 50 Hz, 220 / 380 V 60 Hz, Tensão especial sob solicitação	\varnothing interno mínimo da base giratória:	96 mm
Potência de acionamento:	0,045 - 0,37 kW; BG 56/63/71		
Peso:	44 kg		
Posição de montagem: [*]	veja a página 47		

^{*} No caso de posições de montagem invertidas, entrar em contato com a WEISS.

Figura A. 2. Mesa rotativa indexada, (WEISS)

ANEXO B

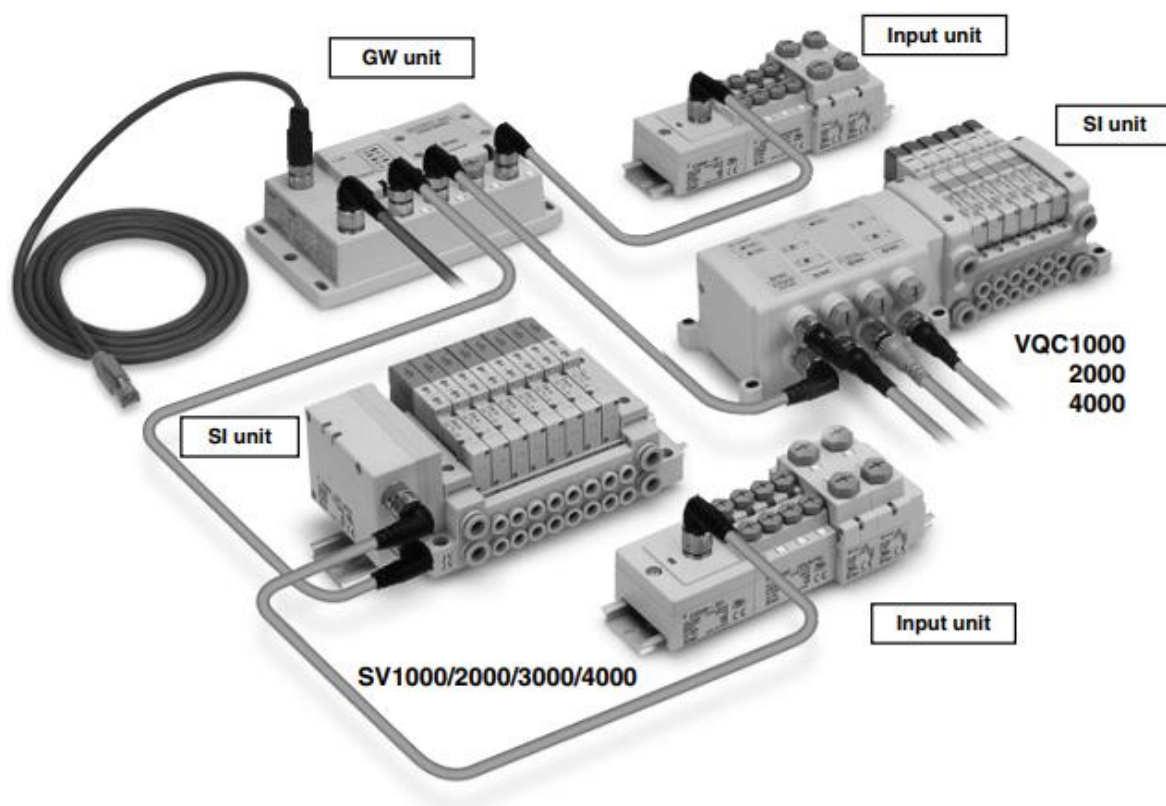


Figura B. 1. *Series EX500 - Fieldbus Gateway Decentralised System 2 (128 Points), (SMC)*



How to Order

EX500—G EN2



Communication protocol	
EN2	EtherNet/IP™ (Input/Output = 128 points/128 points)
PN2	PROFINET (Input/Output = 128 points/128 points)

Specifications

Model	EX500-GEN2	EX500-GPN2
Protocol	EtherNet/IP™ <small>Note 1)</small>	PROFINET IO
Version <small>Note 2)</small>	Volume 1 (Edition 3.14) Volume 2 (Edition 1.15)	PROFINET Specification Version 2.2
Media	100BASE-TX	100BASE-TX
Communication speed	10/100 Mbps (Automatic)	100 Mbps
Communication method	Full duplex/Half duplex (Automatic)	Full duplex
Number of inputs/outputs (I/O occupation area)	128 inputs/128 outputs (20 bytes/20 bytes)	128 inputs/128 outputs (18 bytes/16 bytes)
Configuration file <small>Note 3)</small>	EDS file	GSDML
IP address setting range	Switch settings: 192.168.0.1 to 254 or 192.168.1.1 to 254, Through DHCP server: Optional address	Optional address
Device information	Vendor ID: 7 (SMC Corporation) Product type: 12 (Communication Adapter), Product code: 198	—
Applicable function	DLR QuickConnect™ Web server	MRP Fast Start Up Web server
Power supply voltage	For input and control	24 V DC ±10 %
	For valve	24 V DC +10 %, -5 %
Current consumption	For input and control	6.2 A or less (Max. 1.5 A per branch x 4 branches + GW Unit internal current consumption: 0.2 A or less)
	For output (valve)	4 A or less (Max. 1 A per branch x 4 branches)
Branch port	Number of branch ports	4 ports
	Number of inputs and outputs	32 inputs/32 outputs per branch
	Branch cable length	20 m or less per branch
Environment	Enclosure	IP65
	Operating temperature range	Operating: -10 to 50 °C, Stored: -20 to 60 °C (No condensation)
	Operating humidity range	Operating, Stored: 35 to 85 %RH (No condensation)
Standards	CE marking, UL (CSA), RoHS compliant	
Weight	550 g	
Enclosed parts	Seal cap (for M12 connector socket) 5 pcs.	

Note 1) Use a CAT5 or higher communication cable.
 Note 2) Please note that the version is subject to change.
 Note 3) Each file can be downloaded from SMC website, <http://www.smc.eu>

Figura B. 2. Gateway Unit (EX500-GPN2, (SMC)

Input Unit



How to Order

EX500-DXPA

Input unit

Connector type

A	M8 connector type
B	M12 connector type

Specifications

Model	EX500-DXPA	EX500-DXPB
Connector type	M8 connector	M12 connector
Input	Number of inputs	16 inputs
	Input type	PNP
	Rated voltage	24 V DC
	Supply current	Max. 1.3 A/Unit [Total of 8 connectors of even number must be Max. 0.65 A, 8 connectors of odd number must be Max. 0.65 A]
	Input ON voltage/Input ON current	11 V or more/Typ. 7 mA (at 24 V DC)
	Input OFF voltage/Input OFF current	5 V or less/1.5 mA or less
Internal current consumption	200 mA or less (when the input signal is ON)	
Environment	Enclosure	IP67
	Operating temperature range	Operating: -10 to 50°C, Stored: -20 to 60 °C (No condensation)
	Operating humidity range	Operating, Stored: 35 to 85 %RH (No condensation)
Standards	CE, UL (CSA), RoHS compliant	
Weight	250 g	450 g
Enclosed parts	Seal cap (for M8 connector socket) 16 pcs.	Seal cap (for M12 connector) 17 pcs.
	Seal cap (for M12 connector socket) 1 pc.	

Dimensions/Parts Description

EX500-DXPA

EX500-DXPB

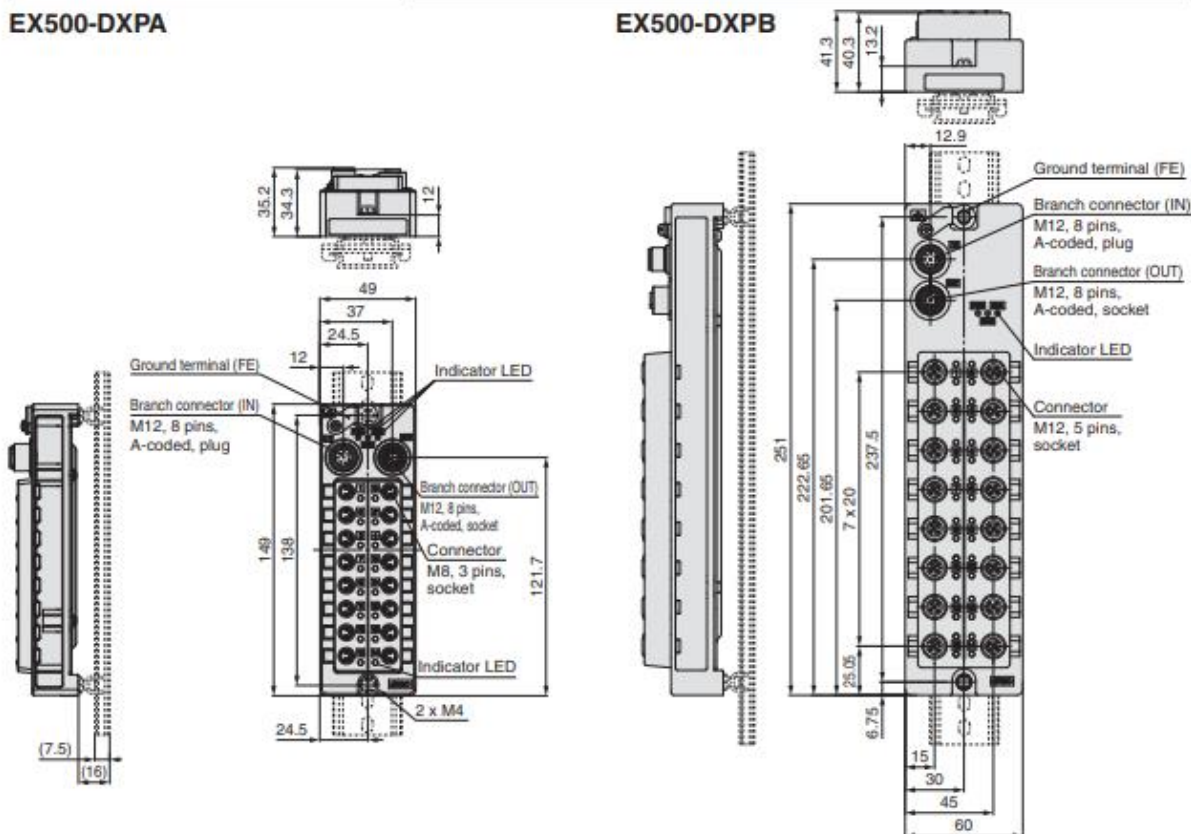
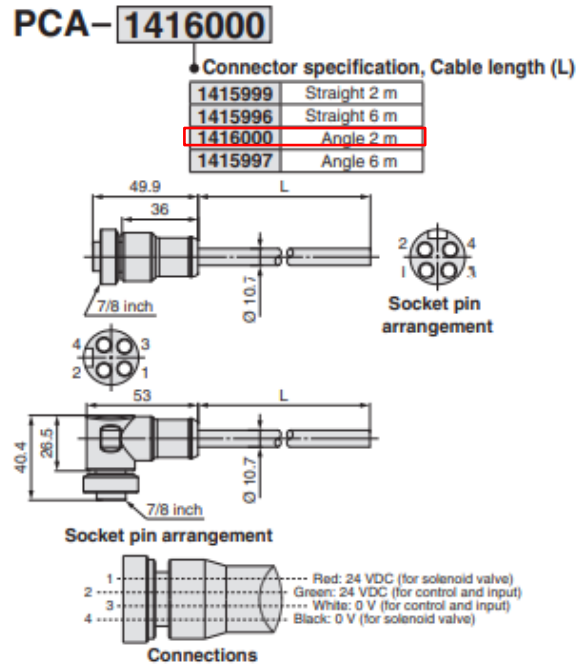


Figura B. 3. Input Unit (EX500-DXPA), (SMC)

Gateway Decentralised System 2
SY
VQC
S0700
SV

Figura B. 4. Power Supply Cable (PCA-1416000), (SMC)

① Power Supply Cable



③ Branch Cable

Connects the GW Unit and SI Unit or Input Unit.

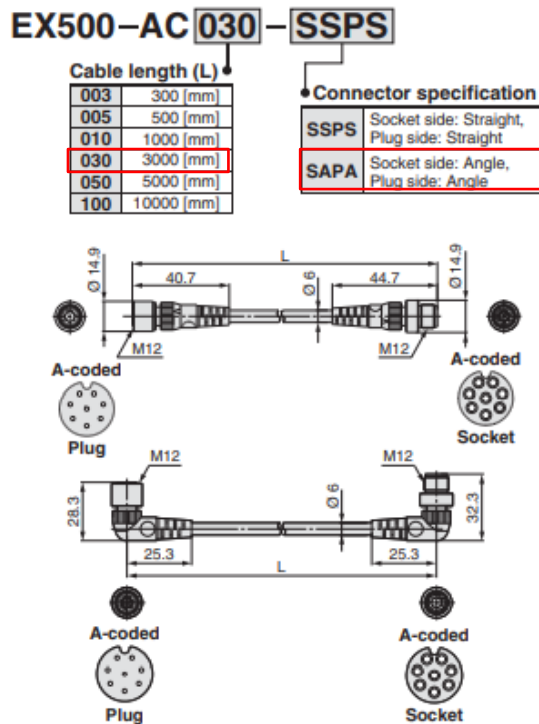


Figura B. 5. Branch Cable (EX500-AC030-SAPA), (SMC)

② Communication Cable/Connector

Cable with connector

PCA-1446566

SPEEDCON

Cable length

1446566	5000 (mm)
---------	-----------

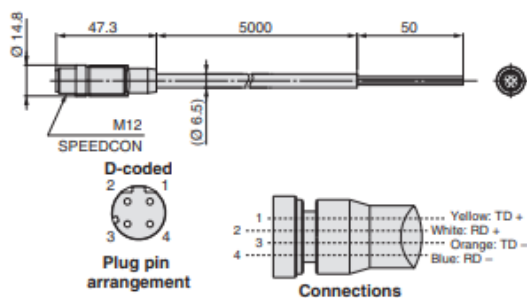


Figura B. 6. Cable with connector (PCA-1446566)

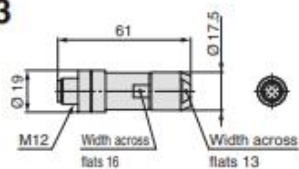
Field wireable connector

PCA-1446553

D-coded



Plug pin arrangement



Applicable Cable

Cable O.D.	4.0 to 8.0 mm
Wire gauge (Stranded wire cross section)	0.14 to 0.34 mm ² /AWG26 to 22

Note) The table above shows the specifications for the applicable cable. Adaptation for the connector may vary on account of the conductor construction of the electric wire.

Figura B. 7. Field wireable connector (PCA-1446553), (SMC)

Cable with M12 ↔ RJ-45 connector

EX9-AC 020 EN-PSRJ

Cable length (L)

010	1000 (mm)
020	2000 (mm)
030	3000 (mm)
050	5000 (mm)
100	10000 (mm)

Connector specification

PSRJ	M12 plug (Straight) ↔ RJ-45 connector
------	--

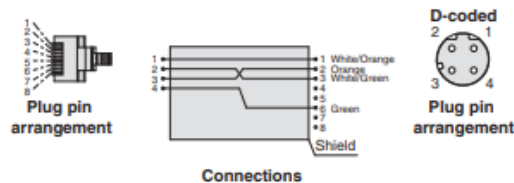


Figura B. 8. Cable M12-RJ45 connector (EX9-AC050EN-PSR), (SMC)

ANEXO C

- *Robot* não colaborativo - https://www.epson.eu/en_EU/products/robots/scara-g-series%c2%a0/epson-scara-g3-351s-l/p/11348;
- Pinça MHZ - <https://www.smc pneumatics.com/MHZ2-20D-M9PL.html>
- Cilindro DGST - https://www.festo.com/pt/pt/p/miniguia-id_DGST/?q=dgst~:festoSortOrderScored
- Cilindro CD85 - <https://www.smc pneumatics.com/CD85N25-125C-B.html>
- Cilindro ADNGF - https://www.festo.com/tw/en/a/554254/?siteUid=fox_tw&siteName=Festo+TW
- Pinça HGPT - https://www.festo.com/hk/en/a/560206/?q=~:sortByFacetValues-asc&siteUid=fox_hk&siteName=Festo+HK
- Cilindro DPDM - https://www.festo.com/gb/en/a/4833186/?q=4833186~:festoSortOrderScored&siteUid=fox_gb&siteName=Festo+GB
- Cilindro DSNU - https://www.festo.com/hk/en/a/1908265/?q=~:orderCode-asc&siteUid=fox_hk&siteName=Festo+HK
- Aparafusadora - <https://servaid.atlascopco.com/AssertWeb/en-US/AtlasCopco/Catalogue/8552>
- Cilindro CDQS - <https://www.smc pneumatics.com/CDQSB25-75DCM-M9PL.html>
- Cilindro CDU - <https://www.smc pneumatics.com/CDU16-20D-M9PL.html>
- Cilindro CXSM - <https://www.smc pneumatics.com/CXSM10-70.html>
- Cilindro DSM - https://www.festo.com/tw/en/a/185943/?siteUid=fox_tw&siteName=Festo+TW
- Cilindro SLS - https://www.festo.com/us/en/a/170486/?q=~:sortByFacetValues-asc&siteUid=fox_us&siteName=Festo+USA

- Cilindro DFM - https://www.festo.com/hk/en/a/170845/?siteUid=fox_hk&siteName=Festo+HK

APÊNDICE I

Tabela I. 1. Listagem de componentes dos diferentes produtos

Produto	Tipo de Produto	Designação	Nome	Sub. Prod.	Quantidade
21071	A	Comutador de Escada	PARAFUSO GARRA 2 ENTRADAS PASSO 2,6X15,8 ZINC	217003	2
			MOLA DE CURSOR	261003	1
			TAMPA BASE INT 4 LIGADORES 21	311080	1
			PORTA TECLA DE INT 4 LIGADORES 21	311083	1
			CURSOR DE INTERRUPTOR MM	315001	1
			MOLA DE CONDUTOR 21	321016	3
			APOIO DE CONTACTO MOVEL 21	321017	1
			CONTACTO FIXO INT E CONTACTO ELECTRICO 21	321053	1
			CONTACTO FIXO COMUT ESCADA E 1CONT ELECT 21	321055	1
			CONTACTO MOVEL E REBITE MACIÇO 21(NOVO)	330004	1
			BASE INTERRUPTOR IMP LASER 21071	341070	1
			GARRA DE INTERRUPTOR ZINCADA 21	371009	2
21011	A	Interruptor Unipolar	PARAFUSO GARRA 2 ENTRADAS PASSO 2,6X15,8 ZINC	217003	2
			MOLA DE CURSOR	261003	1
			TAMPA BASE INT 4 LIGADORES 21	311080	1
			PORTA TECLA DE INT 4 LIGADORES 21	311083	1
			CURSOR DE INTERRUPTOR MM	315001	1
			MOLA DE CONDUTOR 21	321016	2
			APOIO DE CONTACTO MOVEL 21	321017	1
			CONTACTO FIXO INT E CONTACTO ELECTRICO 21	321053	1
			CONTACTO MOVEL E REBITE 21(NOVO)	330003	1
			BASE INTERRUPTOR IMP LASER 21011	341061	1
			GARRA DE INTERRUPTOR ZINCADA 21	371009	2
			21061	A	Comutador de Lustre
MOLA DE CURSOR	261003	2			
PORTA TECLA DE COMUTADOR 21	310038	1			
TAMPA BASE INT 6 LIGADORES 21	310071	1			
CURSOR DE INTERRUPTOR MM	315001	2			
MOLA DE CONDUTOR 21	321016	3			
APOIO DE CONTACTO MOVEL 21	321017	2			
CONT. MOVEL C/ REB BIMETALICO INVERTIDO(NOVO)	330005	2			
CONT FIXO BOTÃO DUPLO PERSIANA E 2 REB 21	331027	1			
BASE INT 6 LIGADORES IMP 21061	340089	1			
GARRA DE INTERRUPTOR ZINCADA 21	371009	2			

Tabela I. 2. Análise de tempos de montagem do Interruptor Unipolar - 21011

Fase	Tarefa	Tempo Unit. (s)	Unidades	Tempo Total (s)	
Fase 1.1 - Aplicar metalizações	T1.1 Agarrar e verificar peça/colocar na calha	1.00	1.00	1.00	
	T1.2 Aplicar contacto móvel no apoio e aplicar conjunto na base	2.00	1.00	2.00	
	T1.3 Aplicar contacto fixo na base	2.00	1.00	2.00	
5.00					
Fase 1.2 - Aplicar molas de condutor e massa	T1.4 Aplicar mola de condutor	1.00	2.00	2.00	
	T1.5 Colocar peça na máquina	1.00	1.00	1.00	
3.00					
Fase 2 - Aplicar tampa da base e garras	T2.1 Aplicar tampa	2.50	1.00	2.50	
	T2.2 Aplicar garras	2.50	1.00	2.50	
5.00					
Fase 3 - Aplicar porta tecla e ensaio final	T3.1 Aplicar porta tecla na base e realizar ensaio final	4.11	1.00	4.11	
4.11					
Fase 4 - Embalagem	T4.1 Fazer caixote/Fechar caixote	20.00	0.01	0.20	
	T4.2 Montar embalagem e colocar divisórias	8.00	0.10	0.80	
	T4.3 Efetuar teste mecânico,colocar na embalagem	2.00	1.00	2.00	
	T4.4 Colocar rótulos na embalagem, fechar embalagem e colocar no caixote	6.00	0.10	0.60	
	T4.5 Colocar caixote na palete	8.00	0.02	0.16	
3.76					
Tarefas Auxiliares	Preparação da Ordem de Produção	TA.1 Abastecimento da linha	300.00	0.004	1.20
	Realimentação de Linha	TA.2 Abrir ordem de produção	80.00	0.004	0.32
		TA.3 Realimentar bases	45.00	0.002	0.09
		TA.4 Realimentar tampas	40.00	0.002	0.08
		TA.5 Realimentar garras	30.00	0.001	0.02
		TA.6 Realimentar porta teclas	85.00	0.001	0.09
	Conclusão da Ordem de Produção	TA.7 Contar defeitos e arrumar material excedente	240.00	0.004	0.96
		TA.8 Fechar ordem de produção	65.00	0.004	0.26
		TA.9 Entregar peças ao armazém	180.00	0.004	0.72
3.73					
Tempo de Ciclo (s)				24.6	

Tabela I. 3. Análise de tempos de montagem do Comutador de Lustre - 21061

Fase	Tarefa	Tempo Unit. (s)	Unidades	Tempo Total (s)
Fase 1.1 -Aplicar metalizações	T1.1 Agarrar e verificar peça/colocar na calha	3.50	1.00	3.50
	T1.2 Aplicar contacto móvel no apoio e aplicar conjunto na base	1.45	1.00	1.45
	T1.3 Aplicar contacto fixo na base	3.63	2.00	7.26
				12.21
Fase 1.2 -Aplicar molas de condutor e massa	T1.4 Aplicar mola de condutor	3.28	1.00	3.28
	T1.5 Colocar peça na máquina	1.37	3.00	4.11
				7.39
Fase 2 - Aplicar tampa da base e garras	T2.1 Aplicar tampa	1.93	1.00	1.93
	T2.2 Aplicar garras	2.89	1.00	2.89
				4.82
Fase 3 - Montar e aplicar porta tecla e ensaio final	T3.1 Montar porta tecla de interruptor com dois cursores	5.46	1.00	5.46
	T3.2 Aplicar porta tecla na base e realizar ensaio final	3.15	1.00	3.15
				8.61
Fase 4 - Embalagem	T4.1 Fazer caixote/Fechar caixote	20.00	0.01	0.20
	T4.2 Montar embalagem e colocar divisórias	9.50	0.10	0.95
	T4.3 Efetuar teste mecânico,colocar na embalagem	2.69	1.00	2.69
	T4.4 Colocar rótulos na embalagem, fechar embalagem e colocar no caixote	6.00	0.10	0.60
	T4.5 Colocar caixote na palete	8.00	0.01	0.08
				4.52
Preparação da Ordem de Produção	TA.1 Abastecimento da linha	300.00	0.0003	0.08
	TA.2 Abrir ordem de produção	80.00	0.0003	0.02
Realimentação de Linha	TA.3 Realimentar bases	45.00	0.0020	0.09
	TA.4 Realimentar tampas	40.00	0.0020	0.08
	TA.5 Realimentar garras	30.00	0.0005	0.02
	TA.6 Realimentar porta teclas	85.00	0.0010	0.09
Conclusão da Ordem de Produção	TA.7 Contar defeitos e arrumar material excedente	240.00	0.0003	0.06
	TA.8 Fechar ordem de produção	65.00	0.0003	0.02
	TA.9 Entregar peças ao armazém	180.00	0.0003	0.05
				0.49
Tempo de Ciclo (s)				38.04

Tabela I. 4. Análise de tempos de montagem do Comutador de Escada - 21071

Fase	Tarefa	Tempo Unit. (s)	Unidades	Tempo Total (s)
Fase 1.1 -Aplicar metalizações	T1.1 Agarrar e verificar peça/colocar na calha	3.24	1.00	3.24
	T1.2 Aplicar contacto móvel no apoio e aplicar conjunto na base	3.63	1.00	3.63
	T1.3 Aplicar contacto fixo na base	1.45	2.00	2.90
				9.77
Fase 1.2 -Aplicar molas de condutor e massa	T1.4 Aplicar mola de condutor	3.28	1.00	3.28
	T1.5 Colocar peça na máquina	1.37	3.00	4.11
				7.39
Fase 2 - Aplicar tampa da base e garras	T2.1 Aplicar tampa	3.51	1.00	3.51
	T2.2 Aplicar garras	2.66	1.00	2.66
				6.17
Fase 3 - Aplicar porta tecla e ensaio final	T3.1 Aplicar porta tecla na base e realizar ensaio final	3.15	1.00	3.15
				3.15
Fase 4 - Embalagem	T4.1 Fazer caixote/Fechar caixote	20.00	0.01	0.20
	T4.2 Montar embalagem e colocar divisórias	9.50	0.10	0.95
	T4.3 Efetuar teste mecânico,colocar na embalagem	2.69	1.00	2.69
	T4.4 Colocar rótulos na embalagem, fechar embalagem e colocar no caixote	6.00	0.10	0.60
	T4.5 Colocar caixote na palete	8.00	0.01	0.08
				4.52
Preparação da Ordem de Produção	TA.1 Abastecimento da linha	300.00	0.0003	0.08
	TA.2 Abrir ordem de produção	80.00	0.0003	0.02
Realimentação de Linha	TA.3 Realimentar bases	45.00	0.0020	0.09
	TA.4 Realimentar tampas	40.00	0.0020	0.08
	TA.5 Realimentar garras	30.00	0.0005	0.02
	TA.6 Realimentar porta teclas	85.00	0.0010	0.09
Conclusão da Ordem de Produção	TA.7 Contar defeitos e arrumar material excedente	240.00	0.0003	0.06
	TA.8 Fechar ordem de produção	65.00	0.0003	0.02
	TA.9 Entregar peças ao armazém	180.00	0.0003	0.05
				0.49
Tempo de Ciclo (s)				31.49

APÊNDICE II



Figura II. 1 Alimentação automática de bases



Figura II. 2. Robot colaborativo – (DOBOT MG400, s.d.)

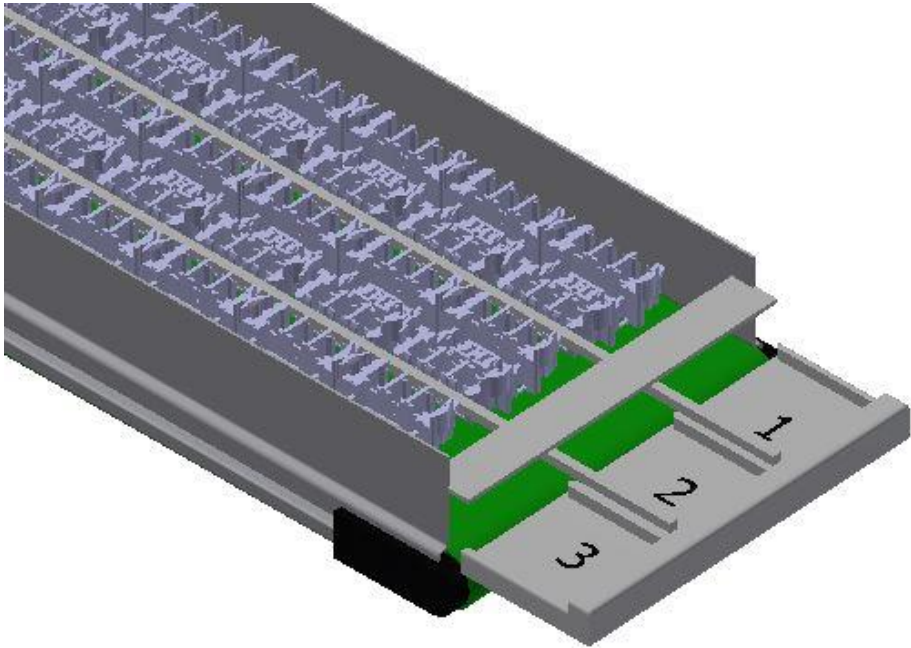


Figura II. 3. Ninho de posicionamento de bases montadas

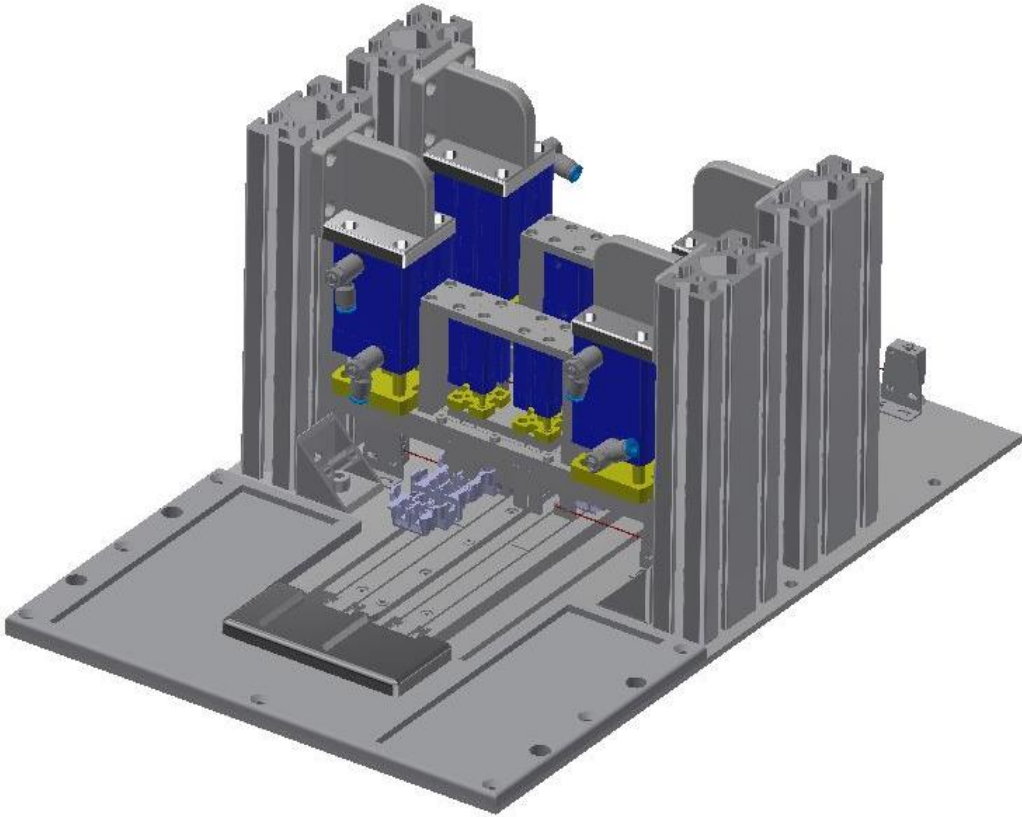


Figura II. 4. Calçador de molas de condutor

APÊNDICE III

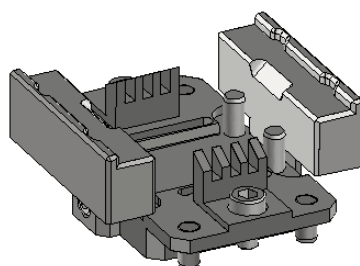


Figura III. 1. Posicionador

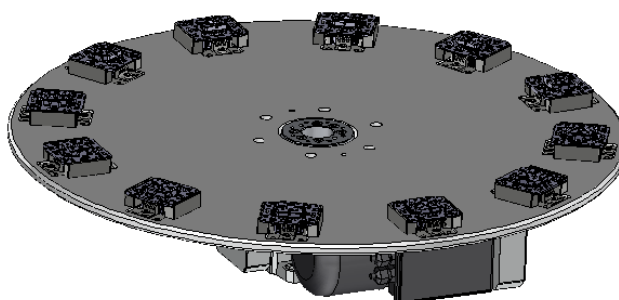


Figura III. 2. Mesa rotativa indexada com prato rotativo montado



Figura III. 3. Robot não colaborativo, (EPSON)



Figura III. 4. Alimentação de massa

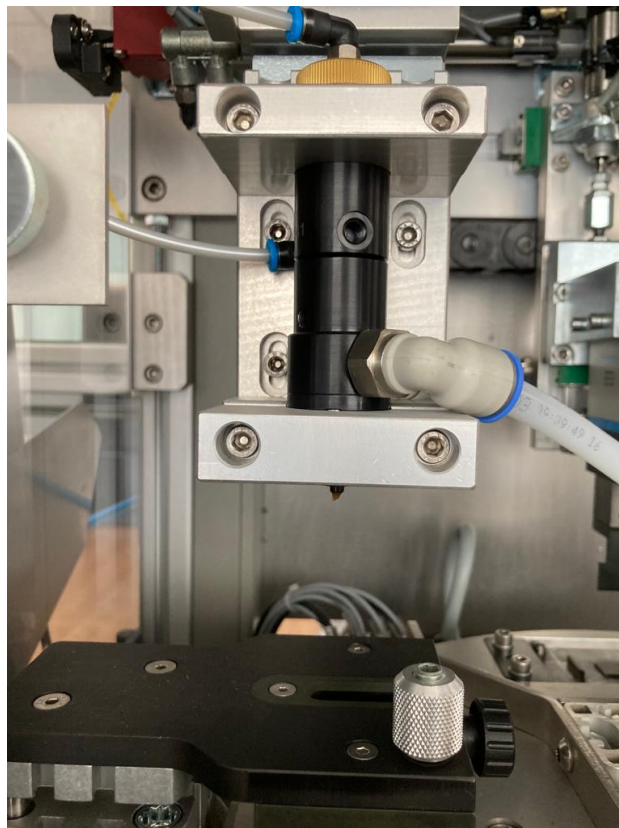


Figura III. 5. Doseador de massa



Figura III. 6. Alimentador de tampas

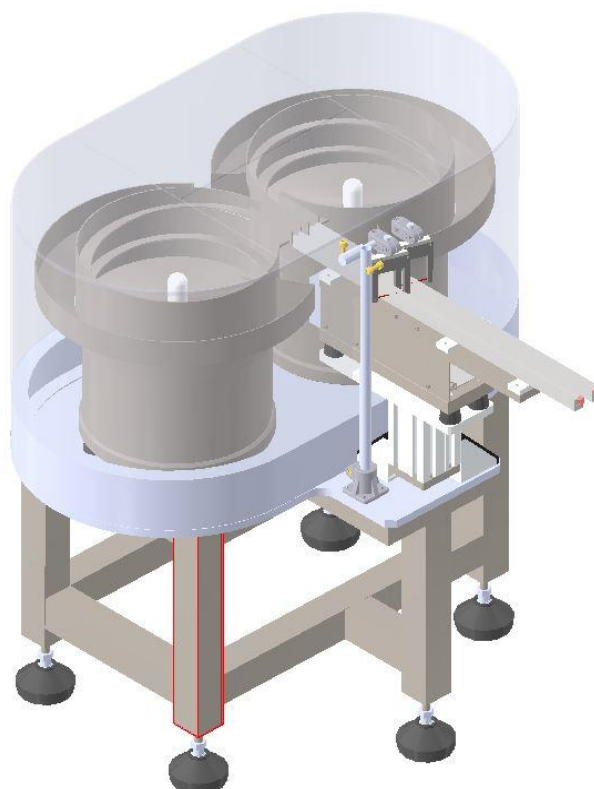


Figura III. 7. Alimentador de garras por vibradores

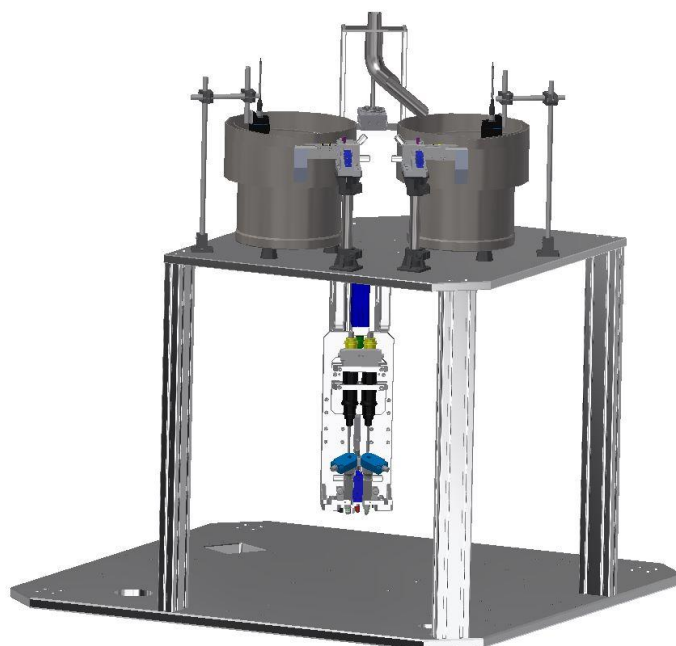


Figura III. 9. Suporte da Aparafusadora e alimentação de parafusos por vibradores

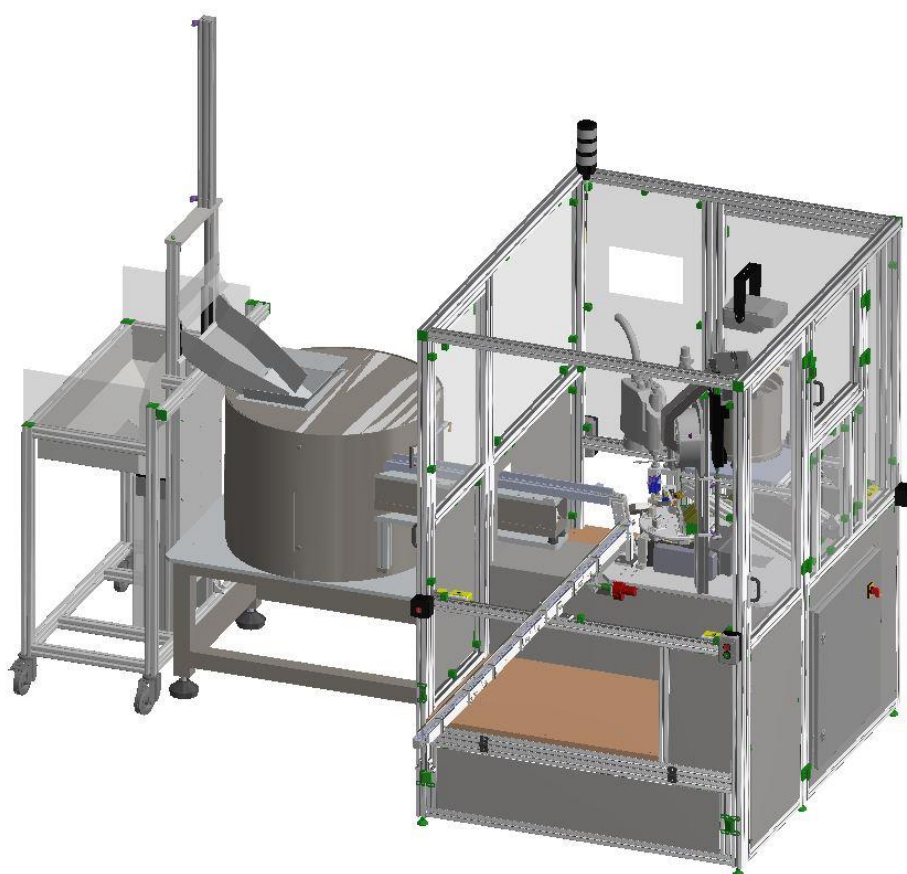


Figura III. 8. Máquina de porta tecla e respetiva alimentação

APÊNDICE IV



Figura IV. 1 Posto de embalagem



Figura IV. 2. Posto de embalagem



Figura IV. 3. Dispensador de etiquetas

APÊNDICE V

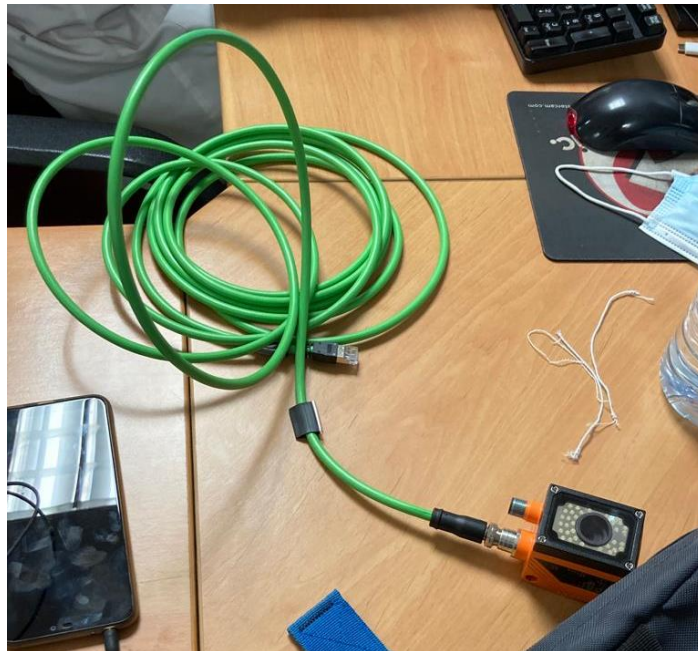


Figura V. 1. Cabo de ligação *PROFINET™*

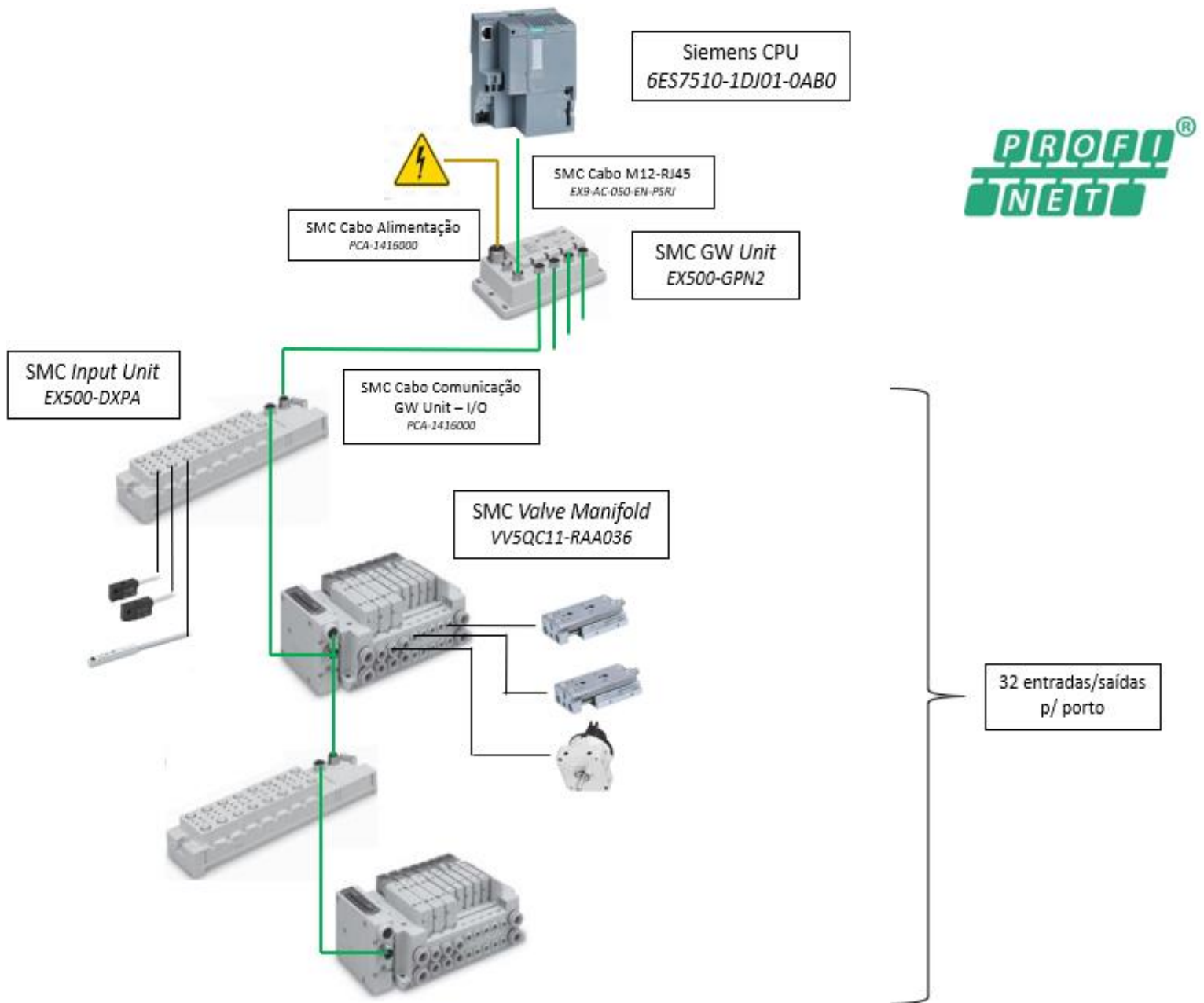


Figura V. 2. Esquema de comunicação contextualizado

APÊNDICE VI

Tabela VI. 1. Normas harmonizadas aplicáveis na avaliação de risco

Documentos técnicos	Título
EN 349:1993+A1:2008	Safety of machinery - Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body
EN 547-1:1996+A1:2008	Safety of machinery - Human body measurements - Part 1: Principles for determining the dimensions required for openings for whole body access into machinery
EN 614-1:2006+A1:2009	Safety of machinery - Ergonomic design principles - Part 1: Terminology and general principles
EN 614-2:2000+A1:2008	Safety of machinery - Ergonomic design principles - Part 2: Interactions between the design of machinery and work tasks
EN 842:1996+A1:2008	Safety of machinery - Visual danger signals - General requirements, design and testing
EN 894-1:1997+A1:2008	Safety of machinery - Ergonomics requirements for the design of displays and control actuators - Part 1: General principles for human interactions with displays and
EN 894-2:1997+A1:2008	Safety of machinery - Ergonomics requirements for the design of displays and control actuators - Part 2: Displays
EN 894-3:2000+A1:2008	Safety of machinery - Ergonomics requirements for the design of displays and control actuators - Part 3: Control actuators
EN 953:1997+A1:2009	Safety of machinery - Guards - General requirements for the design and construction of fixed and movable guards
EN 981:1996+A1:2008	Safety of machinery - System of auditory and visual danger and information signals
EN 983:1996+A1:2008	Safety of machinery - Safety requirements for fluid power systems and their components - Pneumatics
EN 1037:1995+A1:2008	Safety of machinery - Prevention of unexpected start-up
EN ISO 4414:2010	Pneumatic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components
ISO 12100: 2010	Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction
ISO 13849-1:2015	Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design
ISO 13849-2:2012	Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 2: Validation
ISO 13850:2015	Safety of machinery — Emergency stop function — Principles for design
EN ISO 13855:2010	Safety of machinery — Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body
ISO 13857:2008	Safety of machinery – Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs
ISO 14120 : 2015	Safety of machinery — Guards — General requirements for the design and construction of fixed and movable guards
IEC 60204-1:2016	Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements
Directiva 2014_30_UE	Directiva de Compatibilidade Electromagnética
Directiva 2014_35_UE	Directiva Equipamento Eléctrico de Baixa Tensão
Directiva 2006/42/CE	Directiva Máquinas

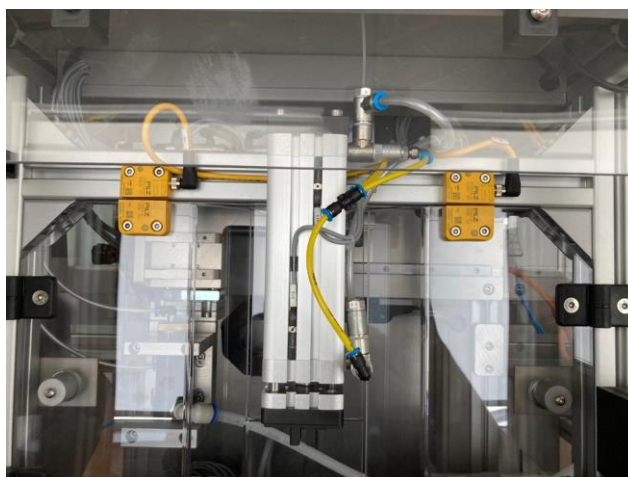


Figura VI. 1. Sensores magnéticos (*PSEN 1.1p-22/ 8 mm*) aplicados, (*PILZ*)

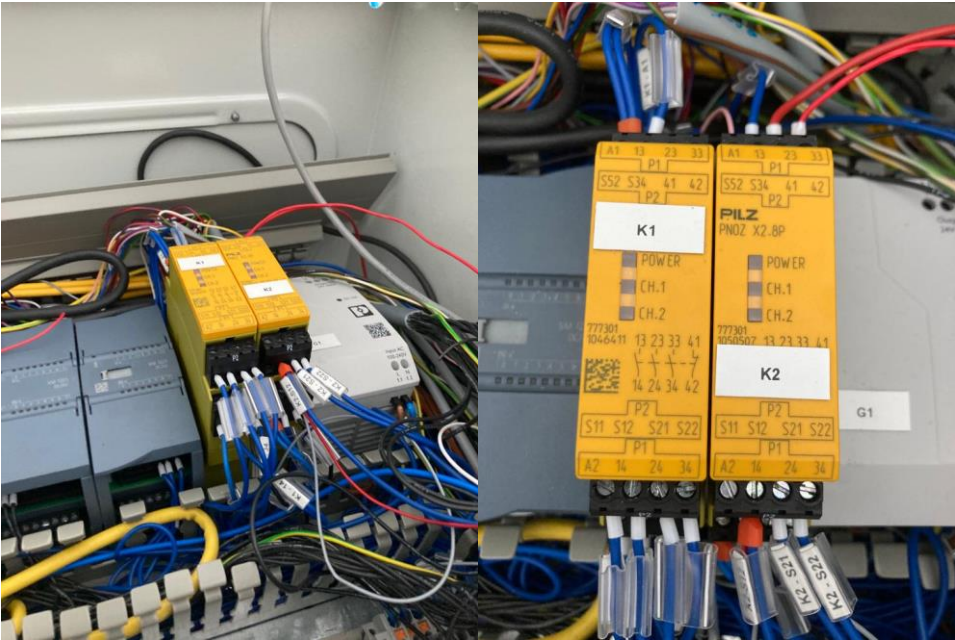


Figura VI. 2. Relé de segurança (PNOZ X2.8P) aplicado, (PILZ)

APÊNDICE VII

Tabela VII. 1. Análise MTM – Análise de Tempos (MTM Association, 2019)

Índice	Operações eliminadas	Descrição	Classe	TMU	Tempo (s)
1	Pegar	> 25x25x25 mm	G4A	7,3	0,2628
2	Mover	Mover objeto para uma posição aproximada	MdB	13,3	0,4788
3	Largar	Soltar por abertura dos dedos	RL1	2	0,072
4	Alcançar	Alcançar objeto solitário na sequência de trabalho (Possibilidade de localização ligeiramente diferente)	RdB	12,8	0,4608
5	Pegar	> 25x25x25 mm	G4A	7,3	0,2628
6	Mover	Mover objeto para uma posição exata ou definida (posicionador)	MdC	15,1	0,5436
Total				57,8	2,08

Índice	Operações adicionadas	Descrição	Classe	TMU	Tempo (s)
A	Empurrar	Por contacto	G5	0	0
Total				0	0

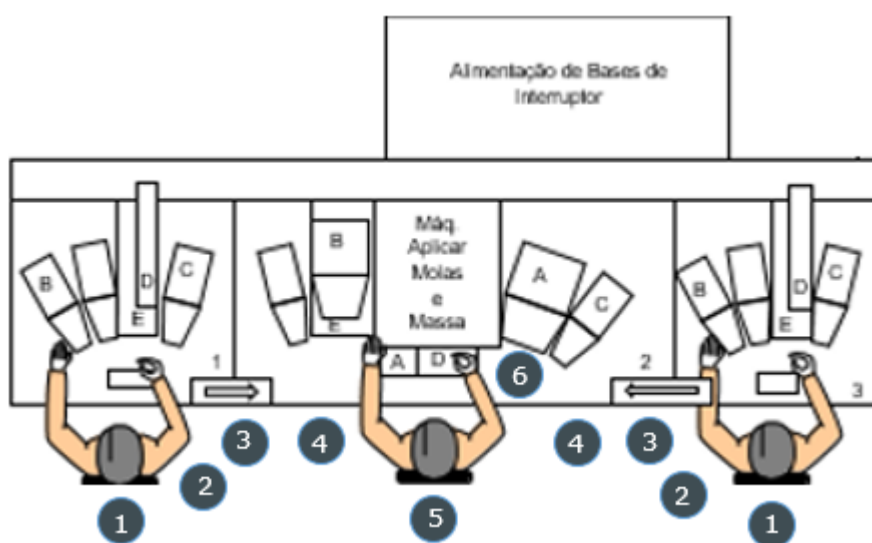


Figura VII. 1. Esquema de operações

Grasp - G

Code	TMU	Case Description	
G1A	2.0	Pick-up Grasp: any size object by itself, easily grasped.	
G1B	3.5	Pick-up Grasp: object very small or lying close against a flat surface	
G1C1	7.3	$\varnothing > 12$ up to ≤ 25 mm	Pick-up Grasp: interference with Grasp on bottom and one side of nearly cylindrical object.
G1C2	8.7	$\varnothing \geq 6$ up to ≤ 12 mm	
G1C3	10.8	$\varnothing < 6$ mm	
G2	5.6	Regrasp: change grasp without relinquishing control.	
G3	5.6	Transfer Grasp: control transferred from one hand to the other.	
G4A	7.3	$> 25 \times 25 \times 25$ mm	Select Grasp: object jumbled with other objects so that search and select occur.
G4B	9.1	$\geq 6 \times 6 \times 3$ up to $\leq 25 \times 25 \times 25$ mm	
G4C	12.9	$< 6 \times 6 \times 3$ mm	
G5	0.0	Contact Grasp (sliding or hook grasp).	

Figura VII. 2. Operações de Pegar (MTM Association, 2019)

Move - M

Motion Length in cm	TMU					with Force/Weight			Case Description
	M-A	M-B	M-C	mM-B M-Bm	m(B)	in daN/kg up to	Static Const. SC in TMU	Dynamic Factor	
2 or less	2.0	2.0	2.0	1.7	0.3	1	0.0	1.00	A Move object to other hand or against stop.
4	3.1	4.0	4.5	2.8	1.2	2	1.6	1.04	
6	4.1	5.0	5.8	3.1	1.9				
8	5.1	5.9	6.9	3.7	2.2	4	2.8	1.07	
10	6.0	6.8	7.9	4.3	2.5				
12	6.9	7.7	8.8	4.9	2.8	6	4.3	1.12	
14	7.7	8.5	9.8	5.4	3.1				
16	8.3	9.2	10.5	6.0	3.2	8	5.8	1.17	
18	9.0	9.8	11.1	6.5	3.3				
20	9.6	10.5	11.7	7.1	3.4	10	7.3	1.22	
22	10.2	11.2	12.4	7.6	3.6				
24	10.8	11.8	13.0	8.2	3.6	12	8.8	1.27	
26	11.5	12.3	13.7	8.7	3.6				
28	12.1	12.8	14.4	9.3	3.5	14	10.4	1.32	
30	12.7	13.3	15.1	9.8	3.5				
35	14.3	14.5	16.8	11.2	3.3	16	11.9	1.36	
40	15.8	15.6	18.5	12.6	3.0				
45	17.4	16.8	20.1	14.0	2.8	18	13.4	1.41	
50	19.0	18.0	21.8	15.4	2.6				
55	20.5	19.2	23.5	16.8	2.4	20	14.9	1.46	
60	22.1	20.4	25.2	18.2	2.2				
65	23.6	21.6	26.9	19.5	2.1	22	16.4	1.51	
70	25.2	22.8	28.6	20.9	1.9				
75	26.7	24.0	30.3	22.3	1.7	22	16.4	1.51	
80	28.3	25.2	32.0	23.7	1.5				

Figura VII. 3. Operações de Mover (MTM Association, 2019)

Release - RL

Code	TMU	Case Description	Code	TMU	Case Description
RL1	2.0	Normal release performed by opening fingers as independent motion	RL2	0.0	Contact release

Figura VII. 4. Operações de Soltar (MTM Association, 2019)

Reach - R

Motion Length in cm	TMU							Case Description
	R-A	R-B	R-C R-D	R-E	mR-A R-Am	mR-B R-Bm	m(B)	
2 or less	2.0	2.0	2.0	2.0	1.6	1.6	0.4	A Reach to object in fixed location, or to object in other hand or on which other hand rests.
4	3.4	3.4	5.1	3.2	3.0	2.4	1.0	
6	4.5	4.5	6.5	4.4	3.9	3.1	1.4	
8	5.5	5.5	7.5	5.5	4.6	3.7	1.8	
10	6.1	6.3	8.4	6.8	4.9	4.3	2.0	
12	6.4	7.4	9.1	7.3	5.2	4.8	2.6	
14	6.8	8.2	9.7	7.8	5.5	5.4	2.8	
16	7.1	8.8	10.3	8.2	5.8	5.9	2.9	
18	7.5	9.4	10.8	8.7	6.1	6.5	2.9	
20	7.8	10.0	11.4	9.2	6.5	7.1	2.9	
22	8.1	10.5	11.9	9.7	6.8	7.7	2.8	B Reach to single object in location which may vary slightly from cycle to cycle.
24	8.5	11.1	12.5	10.2	7.1	8.2	2.9	
26	8.8	11.7	13.0	10.7	7.4	8.8	2.9	
28	9.2	12.2	13.6	11.2	7.7	9.4	2.8	
30	9.5	12.8	14.1	11.7	8.0	9.9	2.9	
35	10.4	14.2	15.5	12.9	8.8	11.4	2.8	C Reach to object jumbled with other objects in a group so that search and select occur.
40	11.3	15.6	16.8	14.1	9.6	12.8	2.8	
45	12.1	17.0	18.2	15.3	10.4	14.2	2.8	
50	13.0	18.4	19.6	16.5	11.2	15.7	2.7	
55	13.9	19.8	20.9	17.8	12.0	17.1	2.7	
60	14.7	21.2	22.3	19.0	12.8	18.5	2.7	D Reach to very small object or where accurate grasp is required.
65	15.6	22.6	23.6	20.2	13.5	19.9	2.7	
70	16.5	24.1	25.0	21.4	14.3	21.4	2.7	
75	17.3	25.5	26.4	22.6	15.1	22.8	2.7	
80	18.2	26.9	27.7	23.9	15.9	24.2	2.7	
								E Reach to indefinite location to get hand in position for body balance or next motion or out of way.

4

Figura VII. 5. Operações de Alcançar (MTM Association, 2019)

Tabela VII. 2. Relação entre TMU e tempo real (MTM Association, 2019)

Os valores de tempo desta tabela, correspondem a um rendimento de 100% conforme sistema LMB	UNIDADE DE TEMPO			
	TMU	SEGUNDO	MINUTO	HORA
	1	0.036	0.0006	0.00001
	27,8	1		
	1,666.7		1	
	100.000			1