

# **Desenvolvimento de um sistema de deteção de emendas e identificação do perfil de pneus agrícolas em verde**

*Maria Ferreira da Silva Braga Soares*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof. Francisco Jorge Teixeira de Freitas

Orientador na empresa: Eng. Rui Manuel Fazenda da Silva



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

setembro 2019



*Nothing happens until something moves.*

*- Albert Einstein*



## Resumo

O processo de construção de um pneu agrícola “em verde” exige que este, numa fase final, seja pulverizado (pintado), no seu interior, com um material desmoldante. Este permite, tal como o seu nome indica, separar a superfície interna do pneu de um diafragma insuflável que é utilizado na fase seguinte do processo de produção, a vulcanização.

A pulverização é realizada por meios automáticos estando o pneu suspenso numa ferramenta, o que lhe dá uma deformação específica. Por este motivo, desta pulverização robotizada, pode ocorrer desperdícios no material que não atinge o pneu, bem como partes do pneu que não são pulverizadas. O reconhecimento específico da forma do pneu quando suspenso é, assim, necessário.

Atualmente, o processo de reconhecimento da superfície interior de um pneu agrícola fica a cargo dos operários e da sua experiência, que o fazem sem rigor. A Gislotica reconhece a necessidade de uma solução automática no sentido de melhorar este processo, uma vez que este pode complementar as tarefas realizadas numa cabine de pintura automática já desenvolvida. Isto fez com que surgisse a motivação para a realização deste projeto.

Para a elaboração de uma solução automática, inicialmente, foi definida a utilização de sistemas de medição laser. Este tipo de equipamento permite, através de triangulação laser, medir distâncias à superfície interior do pneu. Assim, foram estudados sistemas com gamas de medição, dimensões de feixe laser projetado, custos e repetibilidade diferentes, de forma a selecionar o mais indicado para identificar o perfil de um pneu agrícola “em verde” e detetar partes que não devam ser pintadas, como são as emendas de construção em pneus. Para isso, foram realizados diversos ensaios práticos com alguns sistemas de medição.

Através do tratamento das medições da superfície interior de um pneu, foi possível recriar o seu perfil, detetar e localizar as suas emendas. Assim, com um sensor de baixo custo, foi otimizado o processo de medição.

Numa segunda fase, tendo por base o sensor selecionado, foi desenvolvida uma solução automática que permite o controlo de movimento da ferramenta que suporta o pneu na cabine de pintura (controlo de dois eixos) e o sistema de medição. Esta foi criada com a finalidade de realizar o processo de medição automaticamente, de uma forma eficiente e segura para o operador. Para a visualização do perfil, localização das emendas e controlo do processo foi desenvolvida uma interface homem-máquina. Esta permite dois modos de funcionamento, um modo de testes que possibilita a realização de ensaios de determinação da qualidade de medição realizada pelo sensor, na cabine de pintura, e um modo automático que executa o processo de reconhecimento da superfície automaticamente.

Este projeto disponibilizou à Gislotica uma solução automática, a integrar na cabine de pintura, que permite otimizar o processo atual de pintura de pneus agrícolas “em verde”, através da medição da sua superfície. Desta forma, foram cumpridos os objetivos propostos para o projeto

## Palavras-chave:

- Sobre-espessura de telas têxteis;
- Sistema de medição laser;
- Controlo lógico;
- Controlo de movimento;
- Interface homem-máquina.



## **Development of a system detection of splices and identification of the profile of green” agricultural tires**

### **Abstract**

The process of constructing an agricultural tire "in green" requires, at a final stage, that it is sprayed (painted) inside with a release agent.. This allows, as the name implies, to separate the inner surface of the tire from an inflatable mold that is used in the next phase of the production process, the vulcanization.

The spraying is performed by automatic method with the tire suspended in a tool, which gives it a specific deformation. Thus, material waste can occur from this robotic spraying that does not reach the tire and some parts of it are not even sprayed. The specific recognition of the tire shape when suspended is therefore necessary.

Currently, the process of recognizing the interior surface of an agricultural tire is accomplished by the workers and their experience, which do so without rigor. Gislotica recognizes the need for an automatic solution to improve this process, since it can complement the tasks performed in an automatic painting booth already developed. This caused the motivation for the realization of this project to emerge.

Initially for the elaboration of an automatic solution, the use of laser measuring systems was defined. This type of equipment allows, through laser triangulation, to measure distances to the interior surface of the tire. Thus, its studied systems with measuring ranges, projected laser beam dimensions, different costs and repeatability, in order to select the most suitable to identify the profile of an agricultural tire "in green" and detect parts that should not be painted, as are the construction seams on tires. For this, several practical tests were carried out with some measurement systems.

By treating the measurements of the interior surface of a tire, it was possible to recreate the profile, detect and locate its splices. Thus, with a low-cost sensor, the measurement process was optimized.

In a second phase, based on the selected sensor, an automatic solution was developed that allows the movement control of the tool which supports the tire in the painting machine (two-axis control) and the measurement system. This was created for the purpose of performing the measurement process automatically, in an efficient and safe way for the operator. A man-machine interface was developed for the visualization of the profile, location of the seams and process control. This allows two modes of operation, a test mode that enables the performance of tests to determine the measurement quality performed by the sensor, in the paint booth, and an automatic mode that performs the process of surface recognition automatically.

This project provided Gislotica an automatic solution, to be integrated in the painting machine, which allows to optimize the current process of painting agricultural tires "in green" by measuring its surface. Thus, the proposed objectives were fulfilled for the project.

### **Keywords:**

- Splice;
- Laser measuring system;
- Logical control;
- Motion control;
- Man-Machine Interface.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Engenheiro Rui Fazenda, pela oportunidade de trabalhar num projeto da Gislotica, onde me foram dadas as condições necessárias para o desenvolvimento de todo o trabalho, bem como a familiarização num ambiente empresarial.

Ao Professor Doutor Francisco Freitas pela disponibilidade e orientação dada durante o desenvolvimento deste projeto.

Ao Engenheiro Humberto Ramos, gostaria de agradecer, de uma forma particular, por todo o suporte dado e paciência demonstrada ao longo de todo o projeto. Os conhecimentos e competências que me transmitiu farão de mim uma melhor Engenheira.

À Gislotica e aos seus funcionários por toda a hospitalidade e disponibilidade demonstrada. Em particular ao Sr. Celso, ao Sr. Paulo e ao Sr. Henrique.

Aos meus amigos e companheiros de estágio por todo o apoio, entre-ajuda e boa disposição ao longo de todos estes anos de faculdade.

Por último, um agradecimento muito grande e especial à minha família e ao meu namorado, pela presença em todos os momentos e por serem, cada um à sua maneira, um exemplo para mim.



# Índice de Conteúdos

|       |                                                              |    |
|-------|--------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introdução .....                                             | 1  |
| 1.1   | Enquadramento do projeto.....                                | 1  |
| 1.2   | Gislotica – Projeto e Fabrico de Soluções Mecânicas Lda..... | 2  |
| 1.3   | Objetivos do projeto .....                                   | 2  |
| 1.4   | Estrutura da dissertação .....                               | 4  |
| 2     | Estudo prévio .....                                          | 7  |
| 2.1   | Pneus agrícolas .....                                        | 7  |
| 2.1.1 | Indústria .....                                              | 7  |
| 2.1.2 | Componentes .....                                            | 8  |
| 2.2   | Processo produtivo dos pneus agrícolas.....                  | 9  |
| 2.2.1 | Construção de um pneu “em verde” .....                       | 10 |
| 2.2.2 | Processo de pintura e não conformidades em pneus .....       | 13 |
| 2.3   | Emendas em pneus agrícolas.....                              | 13 |
| 3     | Apresentação do projeto .....                                | 17 |
| 3.1   | Cabine de pintura.....                                       | 17 |
| 3.2   | Identificação do perfil do pneu .....                        | 18 |
| 3.2.1 | Solução atual .....                                          | 19 |
| 3.3   | Deteção de emendas .....                                     | 20 |
| 3.3.1 | Solução atual .....                                          | 20 |
| 3.4   | Requisitos do projeto .....                                  | 21 |
| 3.5   | Soluções estudadas.....                                      | 21 |
| 3.5.1 | Sistemas de medição.....                                     | 22 |
| 4     | Equipamento e ambiente de programação .....                  | 32 |
| 4.1   | Autómato.....                                                | 32 |
| 4.1.1 | Componentes .....                                            | 33 |
| 4.1.2 | Funcionamento .....                                          | 36 |
| 4.2   | Ambiente de programação: TIA Portal .....                    | 37 |
| 4.3   | Rede industrial: <i>Profinet</i> .....                       | 38 |
| 4.3.1 | Profinet IO RT (Real Time) .....                             | 39 |
| 4.3.2 | Profinet IO IRT (Isochronous Real Time).....                 | 39 |
| 4.3.3 | Profinet CBA (Component Based Network) .....                 | 40 |
| 4.4   | Drive Sinamics S120 .....                                    | 41 |
| 4.5   | Interface TP 900 <i>Comfort</i> .....                        | 42 |
| 5     | Ensaaios realizados e resultados obtidos.....                | 43 |
| 5.1   | Especificação dos ensaios com sensores.....                  | 43 |
| 5.1.1 | Movimento do pneu .....                                      | 44 |
| 5.1.2 | Pneus “em verde” utilizados .....                            | 44 |
| 5.1.3 | Requisitos de controlo .....                                 | 45 |
| 5.1.4 | Identificação do perfil e medição de uma emenda.....         | 47 |
| 5.2   | Resultados obtidos.....                                      | 49 |
| 5.2.1 | Sensor laser LE550IQ da Banner .....                         | 49 |
| 5.2.2 | Sensor laser LM150, da Banner .....                          | 59 |
| 5.3   | Ensaaios com câmara de visão 3D .....                        | 63 |
| 5.4   | Solução de medição.....                                      | 64 |
| 5.5   | Análise temporal .....                                       | 66 |
| 6     | Desenvolvimento da solução de controlo .....                 | 71 |
| 6.1   | Considerações iniciais.....                                  | 71 |
| 6.1.1 | Tempo de ciclo .....                                         | 71 |
| 6.1.2 | Memória disponível no PLC.....                               | 72 |
| 6.2   | Desenvolvimento do controlador .....                         | 73 |

|       |                                                                                                  |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1 | Supervisão e segurança .....                                                                     | 75  |
| 6.2.2 | Modo de funcionamento .....                                                                      | 76  |
| 6.2.3 | Controlo sensor e deteção de emenda .....                                                        | 80  |
| 6.2.4 | Procedimento medições obtidas .....                                                              | 81  |
| 6.2.5 | Cálculo de posições .....                                                                        | 82  |
| 6.3   | Desenho e programação da interface .....                                                         | 82  |
| 6.3.1 | Especificações .....                                                                             | 82  |
| 6.3.2 | Programação .....                                                                                | 84  |
| 7     | Conclusões e trabalhos futuros .....                                                             | 91  |
|       | Referências .....                                                                                | 93  |
|       | ANEXO A: Representação de valores analógicos em intervalos de medição de corrente e tensão ..... | 97  |
|       | ANEXO B: Instruções utilizadas no ambiente de programação TIA <i>Portal</i> .....                | 99  |
|       | ANEXO C: Esquemas elétricos .....                                                                | 101 |
|       | ANEXO D: Resultados obtidos com sistemas de medições .....                                       | 107 |
|       | ANEXO E: <i>Grafsets</i> comportamentais .....                                                   | 117 |

## Abreviaturas, Acrónimos e Siglas

CPU - *Central Processing Unit*

DB - *Data Block*

FC - *Function*

FB - *Function Block*

GRAFCET - *GRAphe Fonctionnel Commande Etape Transition*

HMI - *Human Machine Interface*

IP - *Internet Protocol*

IRT – *Isochronous Real Time*

OB - *Organization Block*

PLC - *Programmable Logic Controller*

PROFINET - *Process Field Net*

TCP - *Transmission Control Protocol*

TIA - *Totally Integrated Automation*

TO - *Technology Objects*



## Índice de Figuras

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Empresa Gislótica (Globaz, 2012).                                                                                    | 2  |
| Figura 1.2 Representação de uma secção do interior de um pneu agrícola.                                                         | 3  |
| Figura 1.3 Pneu agrícola “em verde”.                                                                                            | 3  |
| Figura 2.1 Os maiores fabricantes de pneus do mundo, tendo por base a sua capacidade de venda (Statista, 2018).                 | 7  |
| Figura 2.2 Representação em corte dos componentes de um pneu (Walter & Gent, 2005).                                             | 8  |
| Figura 2.3 Esquema representativo do processo produtivo de um pneu agrícola (Rockwell Automation, 2013).                        | 10 |
| Figura 2.4 Representação do processo de calandragem de telas têxteis (Ammeraal Beltech, 2019).                                  | 11 |
| Figura 2.5 Representação do processo de corte das telas têxteis (SICK AG, 2019).                                                | 11 |
| Figura 2.6 Representação da colocação das telas no tambor da máquina de construção (U.S. Tire Manufacturers Association, 2018). | 12 |
| Figura 2.7 Emenda aberta.                                                                                                       | 13 |
| Figura 2.8 Representação de uma emenda.                                                                                         | 14 |
| Figura 2.9 Representação de uma “emenda vertical” num pneu “em verde”.                                                          | 15 |
| Figura 3.1 Cabine de pintura de pneus “em verde” desenvolvida pela Gislótica.                                                   | 17 |
| Figura 3.2 Ferramenta desenhada pela Gislótica para o suporte e transporte de pneus agrícolas.                                  | 18 |
| Figura 3.3 Em a) representação da divisão do pneu e em b) inclinação pistolas de pintura.                                       | 19 |
| Figura 3.4 Esquema representativo da deteção de emendas em relação ao código de barras.                                         | 20 |
| Figura 3.5 Irregularidades da forma de um pneu “em verde” (ITW Akron Standard, 2001).                                           | 23 |
| Figura 3.6 Resultados esperados pelo equipamento de medição, num troço de pneu ampliado.                                        | 24 |
| Figura 3.7 Gama de medição de um sistema de medição.                                                                            | 25 |
| Figura 3.8 Sensor laser LE550IQ da Banner.                                                                                      | 27 |
| Figura 3.9 Triangulação laser.                                                                                                  | 28 |
| Figura 3.10 Gráfico de repetibilidade do sensor LE550IQ (Banner, 2019).                                                         | 28 |
| Figura 3.11 Sensor laser LM150 da Banner (Banner Engineering Corp., 2018).                                                      | 29 |
| Figura 3.12 Sensor laser da Keyence.                                                                                            | 29 |
| Figura 3.13 Câmaras de visão 3D da Sick.                                                                                        | 31 |
| Figura 3.14 Esquema representativo do campo de visão da câmara 3D da Sick.                                                      | 31 |
| Figura 4.1 Componentes principais de um PLC.                                                                                    | 34 |
| Figura 4.2 Fonte de alimentação, CPU e Módulo de sinal de entrada utilizado.                                                    | 34 |
| Figura 4.3 Modelo de execução cíclica de um PLC.                                                                                | 37 |
| Figura 4.4 Modelo de execução cíclica de um PLC com interrupções.                                                               | 37 |
| Figura 4.5 Representação dos blocos utilizados na programação (Siemens AG, 2018).                                               | 38 |

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.6 Intervalos de tempo dos diferentes ciclos de comunicação <i>Profinet</i> .                                                                            | 39 |
| Figura 4.7 Esquema de comunicação industrial utilizada no projeto.                                                                                               | 40 |
| Figura 4.8 Driver S120 e suas ligações (Siemens Industry, 2017).                                                                                                 | 41 |
| Figura 4.9 Painel tátil TP 900 (Siemens AG, 2015).                                                                                                               | 42 |
| Figura 5.1 Equipamento utilizado nos ensaios realizados.                                                                                                         | 43 |
| Figura 5.2 Pneus “em verde” utilizados nos ensaios a) de perfilagem e b) de localização da emenda.                                                               | 45 |
| Figura 5.3 Bloco de normalização dos valores medidos.                                                                                                            | 46 |
| Figura 5.4 Bloco para conversão de escala.                                                                                                                       | 46 |
| Figura 5.5 Representação da diferença entre medições consecutivas.                                                                                               | 46 |
| Figura 5.6 a) Condições para obter o perfil de um pneu “em verde” b) Posicionamento inicial dos sensores.                                                        | 48 |
| Figura 5.7 Condições para a rotação do pneu “em verde”, de forma a detetar uma emenda.                                                                           | 48 |
| Figura 5.8 Em a) emenda interna e em b) emenda superficial do pneu “em verde” analisado.                                                                         | 49 |
| Figura 5.9 Intervalo de tempo entre medições consecutivas.                                                                                                       | 50 |
| Figura 5.10 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s.                                         | 51 |
| Figura 5.11 Dimensões do pneu estudado e distâncias medidas entre o sensor e a superfície interior do pneu.                                                      | 52 |
| Figura 5.12 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 3mm/s.                                         | 53 |
| Figura 5.13 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 20mm/s.                                        | 53 |
| Figura 5.14 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s e com uma inclinação do sensor de 10°.   | 54 |
| Figura 5.15 Regressão linear do perfil traçado com o sensor LE550IQ, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s.                                                   | 55 |
| Figura 5.16 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 2°/s.                                             | 56 |
| Figura 5.17 Diferença entre duas medições consecutivas, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.                                      | 57 |
| Figura 5.18 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s. | 57 |
| Figura 5.19 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s (sensor LE550IQ).                            | 58 |
| Figura 5.20 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s. | 58 |
| Figura 5.21 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.                                               | 59 |
| Figura 5.22 Diferença entre duas medições consecutivas, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.                                      | 60 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.23 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s. ....                                               | 60 |
| Figura 5.24 Pulso criado para representar a detecção de uma emenda. ....                                                                                                                                            | 61 |
| Figura 5.25 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s. ....                                                                                            | 61 |
| Figura 5.26 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s. ....                                              | 61 |
| Figura 5.27 Distâncias medidas pelo sensor LM150, no teste 2, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s. ....                                                                                | 62 |
| Figura 5.28 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, no teste 2, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s. ....                                     | 62 |
| Figura 5.29 Diferença entre duas medições consecutivas, no teste 2, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s. ....                                                                       | 62 |
| Figura 5.27 Imagens de uma emenda, obtidas com a câmara de visão 3D. ....                                                                                                                                           | 64 |
| Figura 6.1 Hierarquização dos <i>Grafsets</i> que especificam o controlador. ....                                                                                                                                   | 74 |
| Figura 6.2 Perfil de velocidade obtido para os valores predefinidos. ....                                                                                                                                           | 79 |
| Figura 6.3 Posição do pneu e distância medida pelo sensor, ao longo do processo de identificação do perfil de um pneu. ....                                                                                         | 80 |
| Figura 6.4 Árvore de ecrãs da interface desenvolvida. ....                                                                                                                                                          | 83 |
| Figura 6.5 Declaração de alarmes no <i>WinCC</i> . ....                                                                                                                                                             | 84 |
| Figura 6.6 Ecrã inicial em 4 situações diferentes: -a) servomotores desabilitados -b) informação referente à introdução de dados -c) dados não introduzidos -d) servomotores habilitados e dados introduzidos. .... | 85 |
| Figura 6.7 Ecrã principal. ....                                                                                                                                                                                     | 86 |
| Figura 6.8 Ecrã para calibração da posição <i>Home</i> dos servomotores. ....                                                                                                                                       | 86 |
| Figura 6.9 Ecrã modo de funcionamento: -a) modo manual ou testes -b) modo automático. ....                                                                                                                          | 87 |
| Figura 6.10 Ecrã de visualização do perfil traçado: -a) primeira abordagem, -b) segunda abordagem, c) solução final. ....                                                                                           | 87 |
| Figura 6.11 Ecrãs disponíveis após a identificação do perfil do pneu: -a) dimensões pneu -b) localização das “emendas horizontais”. ....                                                                            | 88 |
| Figura 6.12 Ecrã que indica a localização das emendas detetadas. ....                                                                                                                                               | 89 |
| Figura 6.13 Ecrã de erros: -a) erros -b) histórico de erros. ....                                                                                                                                                   | 89 |
| Figura 6.14 Ecrã de emergência. ....                                                                                                                                                                                | 89 |

## Índice de Tabelas

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 Caraterísticas do sensor LE550IQ da Banner. ....                                                                                | 27 |
| Tabela 3.2 Caraterísticas do sensor LM150 da Banner. ....                                                                                  | 29 |
| Tabela 3.3 Caraterísticas sensores da série IL da Keyence (Keyence, 2019). ....                                                            | 30 |
| Tabela 3.4 Caraterísticas da câmara de visão 3D da Sick (Sick, 2019). ....                                                                 | 31 |
| Tabela 4.1 Comparação entre o controlador S7-1200 e S7-1500. ....                                                                          | 33 |
| Tabela 4.2 Caraterísticas da CPU 1511-1 PN. ....                                                                                           | 35 |
| Tabela 4.3 Tempo de corrida das OBs influenciado pelo controlo de movimento (Siemens AG, 2014). ....                                       | 35 |
| Tabela 4.4 Tempo de corrida das OBs influenciado pelo controlo de posição (Siemens AG, 2014). ....                                         | 35 |
| Tabela 4.5 Caraterísticas do módulo ET 200SP (Siemens, 2017). ....                                                                         | 36 |
| Tabela 4.6 Principais caraterísticas da interface TP 900 (Siemens AG, 2012). ....                                                          | 42 |
| Tabela 5.1 Medições ao pneu em análise, obtidas pelo sensor LE550IQ e manualmente. ....                                                    | 52 |
| Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de identificação do perfil do pneu, com o sensor LE550IQ. ....                                           | 55 |
| Tabela 5.3 Ferramentas da aplicação informática SOPAS (SICK AG, 2019). ....                                                                | 63 |
| Tabela 5.4 Análise temporal do processo identificação do perfil, para $\Delta t_{\text{entre medições}} = 240\text{ms}$ . ....             | 66 |
| Tabela 5.5 Análise temporal do processo de deteção de uma “emenda vertical”, para $\Delta t_{\text{entre medições}} = 240\text{ms}$ . .... | 67 |
| Tabela 5.6 Análise temporal do processo de deteção de uma “emenda vertical”, para $\Delta t_{\text{entre medições}} = 50\text{ms}$ . ....  | 68 |
| Tabela 5.7 Características do módulo de entradas analógicas AI 2 X U/I 2, 4Wire HF. ....                                                   | 68 |
| Tabela 5.8 Análise temporal do processo de deteção de uma “emenda vertical”, para $\Delta t_{\text{entre medições}} = 4\text{ms}$ ....     | 69 |
| Tabela 5.9 Comparação da análise temporal com diferentes módulos de entradas analógicas. ....                                              | 69 |
| Tabela 6.1 Variáveis para o cálculo do tempo de ciclo do processo. ....                                                                    | 72 |
| Tabela 6.2 Tempo de ciclo do processo ....                                                                                                 | 72 |
| Tabela 6.3 Funções dos diferentes <i>Grafsets</i> desenvolvidos. ....                                                                      | 75 |
| Tabela 6.4 Instruções utilizadas para o controlo dos servomotores. ....                                                                    | 77 |
| Tabela 6.5 Contagem de bits no WinCC. ....                                                                                                 | 85 |
| Tabela 7.1 Principais características dos sensores estudados. ....                                                                         | 92 |

## **Glossário**

Este glossário tem como principal objetivo introduzir alguns conceitos que serão, posteriormente, explicados na presente dissertação, para que seja mais fácil a sua leitura.

### **Pneu “em verde”**

Designação dada aos pneus durante a sua fase de construção. Fase esta que antecede a vulcanização, onde o pneu é colocado num molde para obter a sua forma final e os seus padrões característicos.

### **Pintura de um pneu “em verde”**

Última fase do processo de construção de um pneu agrícola, que consiste na pulverização de um material desmoldante na superfície interior do pneu. Esta etapa do processo é de elevada importância, uma vez que irá permitir a separação do diafragma insuflável, utilizado na vulcanização, e a superfície do pneu. Desta forma é garantida uma boa qualidade do produto final- pneu finalizado.

### **Emenda**

Sobreposição dos extremos de uma tela – camada de borracha e aço que constitui um pneu – ou, apenas no caso dos pneus agrícolas, sobreposição de diferentes telas.



## **1 Introdução**

Neste primeiro capítulo é apresentado o enquadramento, as motivações e os objetivos do projeto alvo deste relatório, bem como uma breve introdução à empresa onde foi realizado, a Gislotica - Mechanical Solutions Lda. Esta introdução permite abordar o tema, de forma objetiva e concisa, no sentido de clarificar o seu propósito, contexto e eventuais dificuldades a ultrapassar.

### **1.1 Enquadramento do projeto**

A realidade de hoje remete-nos para um mundo cada vez mais automatizado. Esta necessidade partiu do crescente rigor e exigência dos consumidores, provocando uma grande evolução na indústria. O desenvolvimento dos equipamentos e a comunicação entre eles permitiu aumentar a qualidade dos processos e do produto final, assim como diminuir o seu tempo de entrega e garantir melhores condições de trabalho aos operadores.

A Gislotica, empresa de engenharia especializada no estudo e desenvolvimento de equipamentos para a indústria de pneus, é um exemplo de como os construtores de máquinas têm de responder à evolução constante que esta indústria tem sofrido.

Neste projeto, a empresa está interessada em desenvolver uma solução automática para uma das fases do processo de fabrico de pneus agrícolas, a “pintura”. Esta fase consiste na aplicação de um desmoldante no interior dos pneus para que a fase posterior, vulcanização, seja bem-sucedida, terminando com uma boa separação entre o diafragma utilizado e o pneu.

Pretende-se que este processo seja realizado por um robô industrial. No entanto, para programar o seu percurso e a quantidade de desmoldante a aplicar em cada zona do pneu, é necessário recolher os parâmetros e o perfil específico do pneu, tarefa que normalmente se realiza de modo manual. Os critérios para a aplicação de desmoldante variam com o contorno variável da superfície interior do pneu e da localização das suas emendas interiores, tornando o processo de identificação mais complexo, uma vez que estas estão obrigatoriamente presentes num pneu, têm uma espessura relativamente pequena e podem provocar, posteriormente, alguns defeitos.

Assim, com a necessidade de aumentar o rigor e a precisão para identificar o perfil interior do pneu e do processo de localização das suas emendas, torna-se imprescindível automatizar, o mais possível, este processo. Desta forma, pretende-se aumentar a qualidade do pneu acabado e garantir a segurança do operador.

## 1.2 Gislotica - Projeto e Fabrico de Soluções Mecânicas Lda

A Gislotica nasceu em 2000, numa pequena oficina metalomecânica, com apenas um cliente, a Continental AG. A constante procura de equipamentos automatizados para a indústria de pneus e a falta de respostas criou uma oportunidade para a empresa se desenvolver e crescer.

Em 2003, com um projeto bastante complexo e robusto, viu a necessidade de aumentar a sua área de trabalho. Desde então, foi ampliando o espaço conforme o seu crescimento e capacidade, dispondo, hoje em dia, de uma área de 16000 m<sup>2</sup>, estando 2500 m<sup>2</sup> contruídos e já com perspectivas para duplicar.

Tornou-se então especializada na conceção, desenvolvimento e produção de máquinas para a indústria de pneus, tendo conquistado a confiança tecnológica de marcas altamente qualificadas na área, como a Continental AG, Goodyear, Pirelli, Nexen, Apollo, MRF e JK. Em 2015 conquista a “Categoria A” de fornecedores da Continental, destaque máximo dado pela mesma aos seus fornecedores.

A Gislotica exporta cerca de 95% da sua produção para 35 países, sendo os mais importantes na Europa. Para responder ao progresso das diferentes marcas de forma rápida e eficiente está agora representada comercialmente na Índia, China e Rússia.

Inicialmente a empresa respondia às necessidades concretas dos clientes, isto é, produzia apenas o que lhe era pedido. Hoje em dia já se antecipa criando soluções inovadoras. Esta é bastante autónoma, estando equipada de forma a elaborar e construir as soluções mecânicas, elétricas e de automação requeridas num projeto, bem como o transporte e instalação do produto final. Todas estas soluções têm como objetivo aumentar a eficiência da produção dos fabricantes de pneus, bem como diminuir os seus custos energéticos.

Para preservar estes propósitos, a Gislotica mantém um constante investimento em equipamentos e soluções informáticas, assegurando sempre a sua filosofia de alta qualidade com preços competitivos. Também neste sentido tem certificação de qualidade, segundo a norma ISO 9001 (Jornal de Notícias, 2016).



Figura 1.1 Empresa Gislotica (Globaz, 2012).

## 1.3 Objetivos do projeto

Os objetivos principais desta dissertação são estudar e desenvolver um sistema, de baixo custo, capaz de localizar as emendas interiores de um pneu agrícola “em verde” e recriar o seu perfil interior. Através desta solução pretende-se aumentar o rigor na localização das suas emendas interiores, do processo de aplicação de desmoldante, identificação do perfil do pneu e, portanto, melhorar a qualidade do produto final (pneu agrícola). Assim, para atingir esses

objetivos principais, o projeto foi dividido em diferentes fases, que constituem diferentes objetivos parciais.

Antes de definir estes objetivos parciais é necessário introduzir alguns conceitos e explicar, brevemente, alguns processos que impulsionaram o desenvolvimento deste projeto.

A aplicação excessiva de material lubrificante nas emendas interiores de um pneu, pode criar diferentes tipos de defeitos. Este pode-se acumular nestas zonas, durante o processo de vulcanização e provocar a abertura da emenda. Por outro lado, caso hajam zonas onde não é aplicado material desmoldante, uma vez que atualmente não é conhecido o interior do pneu, a vulcanização pode ser comprometida, tal como será explicado no próximo capítulo.

A Figura 1.2 pretende representar uma secção do interior de um pneu agrícola. Nesta, é possível identificar as suas emendas - sobreposição das telas que constituem o pneu - que podem medir entre 2 e 4mm.

Ora, devido ao elevado tamanho dos pneus agrícolas, com diâmetros até 2200 mm e altura de 1000 mm, existem emendas tanto verticais como horizontais. Tal deve-se ao facto de as telas que os constituem não serem suficientemente grandes para cobrir a sua altura.

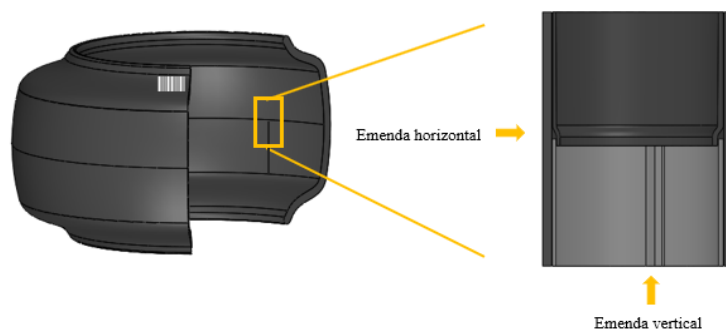


Figura 1.2 Representação de uma secção do interior de um pneu agrícola.

O perfil interno de um pneu é o contorno criado pela sua superfície interior, neste caso, quando este é suspenso por uma ferramenta, na cabine de pintura (Figura 1.3). Nestas condições o perfil do pneu não é simétrico, uma vez que, a sua parede lateral superior é segura pela ferramenta, provocando o seu alongamento, ao contrário da sua parede lateral inferior.



Figura 1.3 Pneu agrícola “em verde”.

A identificação do perfil de um pneu é bastante importante, porque a pintura do seu interior tem diferentes requisitos, conforme este perfil, podendo variar a zona ou quantidade a aplicar. É necessário que não se pinte sobre as emendas dos pneus, de forma a evitar possíveis defeitos, como a acumulação de desmoldante e posterior abertura da emenda, portanto torna-se essencial saber a sua localização específica. Neste momento, ainda existem pneus que são

totalmente pintados, no entanto, uma das causas para defeitos como, depressões, bolhas e variações de forças radiais nos pneus, é a incorreta aplicação do desmoldante durante o processo de pintura.

Assim, tendo por base toda a informação apresentada acerca do projeto e das suas motivações, a sua divisão por objetivos foi facilitada.

Numa primeira fase, já com maior conhecimento acerca da indústria de pneus, de pneus agrícolas “em verde”, do seu processo produtivo e do ambiente onde será inserido o projeto, é necessário estudar diferentes sistemas de medição. É, primeiramente, definido um conjunto de características necessárias ao sistema para que cumpra com os objetivos do projeto.

Ora, após esta análise, devem ser selecionados alguns equipamentos de medição para que, com eles, sejam realizados ensaios experimentais. Assim, um próximo objetivo será a escolha de um sistema de medição que permite medir o perfil de um pneu “em verde” e as suas emendas interiores.

Numa fase seguinte pretende-se criar uma solução de controlo que permita recriar o perfil interior de um pneu e a deteção das suas emendas, de uma forma automática e contínua. Para tal, deve ser elaborada uma solução de controlo de movimento do pneu ou do sistema de medição escolhido, criando assim um processo automático que cumpre o principal objetivo do projeto.

Por fim, os resultados obtidos, através da solução criada, devem ser visíveis numa interface HMI (*Human Machine Interface*). Desta forma, o operador verifica a veracidade dos valores recolhidos, posteriormente, controla o processo de aplicação de desmoldante e, por fim, armazena a informação numa base de dados. Nesta mesma interface deve ser possível localizar as emendas detetadas, bem como as dimensões do pneu analisado.

É importante referir que o processo a desenvolver apenas será realizado a um pneu agrícola de cada família, uma vez que o processo produtivo é igual para todos os pneus de uma mesma família.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada por capítulos, que são discriminados abaixo.

No presente capítulo, é apresentado o projeto a desenvolver, onde se expõe o seu enquadramento e os objetivos a cumprir, bem como a empresa onde foi realizado.

No segundo capítulo, é feita uma contextualização do tema. Primeiramente é apresentado o pneu, como principal objeto de estudo, para que seja feito um enquadramento com a sua indústria, história e constituição. De seguida é descrito o seu processo de fabrico, visto ser o principal foco da empresa e, consequentemente, do projeto a desenvolver.

O terceiro capítulo, pretende explorar os requisitos do projeto e analisar, de forma detalhada, as soluções possíveis para realizar o seu principal objetivo, identificar o perfil interior de um pneu “em verde” e a detetar as suas emendas interiores. Assim, são apresentados alguns dos equipamentos (sistemas de medição) selecionados para a sua concretização.

No quarto capítulo são apresentados os equipamentos necessários ao projeto, assim como o ambiente de programação utilizado para o controlo do sistema.

O quinto capítulo descreve o sistema desenvolvido, apresentando os ensaios realizados e as suas conclusões, para o desenvolvimento da solução mais eficiente para a medição das emendas e perfil do pneu.

No sexto capítulo é apresentada a solução final, que permite perfilar e detetar as emendas interiores de pneus agrícolas “em verde” na cabine de pintura, assim como a sua programação.

Por último, no sétimo capítulo são expostas as conclusões retiradas do trabalho executado, bem como as propostas para trabalhos futuros.



## 2 Estudo prévio

Neste capítulo, são expostos os conceitos fundamentais para a realização do projeto, assim como o enquadramento em que este se insere. Neste sentido, é feita uma pequena descrição da história e indústria do pneu, das características deste e do seu processo produtivo, sendo abordado, com maior detalhe, a etapa de pintura (aplicação de desmoldante) nos pneus.

### 2.1 Pneus agrícolas

Produto de alta tecnologia e estudo de engenharia, o pneu é o único elemento de um veículo que faz a ligação entre este e o solo. Este contacto, embora de dimensões mínimas, permite responder a todas as funções requeridas para um pneu.

Assim, com este elemento é possível suportar o peso do veículo, amortecer o desnivelamento sentido no solo, transmitir a potência útil do motor e resistir às sobrecargas produzidas na aceleração, travagem e curvagem (Nexen Tire, 2017).

#### 2.1.1 Indústria

O pneu, como um constituinte essencial de um veículo, torna-se um elemento com enorme interesse de desenvolvimento, colocando a sua indústria em constante evolução e inovação. Atualmente, a indústria de pneus tem uma perspetiva de expansão contínua a nível global, com uma taxa de crescimento esperada de cerca de 3%, por ano, até 2022 (Mayer, 2017).

No conjunto dos diversos fabricantes de pneus destacaram-se, em 2017, pelas suas taxas de produção e constante acompanhamento na inovação, a Bridgestone Corporation, Michelin, Goodyear, Continental AG, e a Sumitomo Rubber, tal como se pode verificar na Figura 2.1. Estes mantêm-se nestas posições de realce há cinco anos (Statista, 2018).

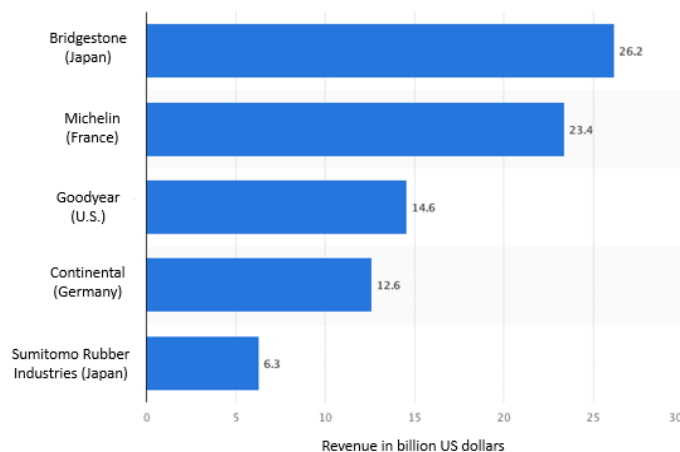


Figura 2.1 Os maiores fabricantes de pneus do mundo, tendo por base a sua capacidade de venda (Statista, 2018).

A gradual melhoria e inovação na fabricação de pneus deve-se ao desenvolvimento da tecnologia e o seu fácil acesso, permitindo simular a estrutura, construção e reações do pneu em diversas situações, assim como à integração da inteligência artificial no seu processo produtivo. Este progresso está associado à Indústria 4.0, revolução que tocou as mais diversas indústrias, minimizando a intervenção humana nos processos, tornando-os mais eficientes, automáticos e independentes (Mayer, 2017).

Atualmente, os maiores fabricantes desta indústria estão a desenvolver protótipos para a produção do pneu do futuro, para que seja empregue nos automóveis mais recentes e inovadores.

### 2.1.2 Componentes

Atualmente, os pneus são constituídos por diversas camadas, compostas por diferentes materiais. A sua disposição e quantidade no pneu dependem do seu perfil e tamanho.

Todos os componentes de um pneu devem ser misturados, preparados, construídos e vulcanizados em conjunto, isto é, devem passar todas as etapas do processo produtivo juntos. Assim, a qualidade do pneu depende da capacidade de misturar todos estes componentes de uma forma coesa.

Estes componentes, de uma forma geral, são constituídos por borracha, aço e material têxtil. A percentagem do peso de cada material num pneu é especificada em baixo, sendo este um valor aproximado, podendo depender da marca e do tipo de pneu.

1. Borracha sintética ou natural: 38%
2. Elementos de reforço, como aço, rayon e nylon: 16%
3. Enchimento, como carbono, sílica e giz: 30%
4. Plastificantes, como óleo e resina: 10%
5. Químicos para vulcanização, como enxofre e óxido de zinco: 4%
6. Outros elementos: 2% (Walter & Gent, 2005)

Estes materiais estão presentes nos diversos componentes que constituem um pneu. Na Figura 2.2, é possível analisar os seus principais constituintes, sendo estes posteriormente explicados e detalhados.

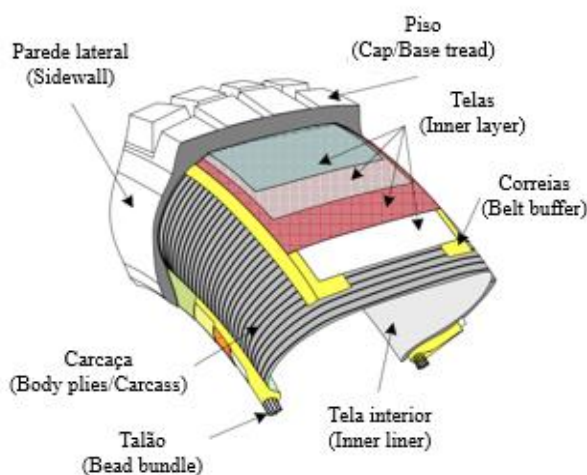


Figura 2.2 Representação em corte dos componentes de um pneu (Walter & Gent, 2005).

O talão (*Bead bundle*) é um conjunto de cabos de aço, com uma elevada resistência, revestidos de borracha. Este permite que o pneu se molde à jante e que permaneça acoplado a ela, de forma a que esta suporte todas as forças que lhe são aplicadas.

As camadas internas (*Inner layer*) são compostas por diferentes telas ou lonas, sendo o tecido mais comum o poliéster. A camada superior designa-se por *cap ply* e é, normalmente, uma tira de nylon revestida a borracha que envolve as restantes telas. Esta camada permite fortificar a construção do pneu e melhorar o seu desempenho a velocidades altas. No entanto, nem todos os pneus a contêm. Esta é encontrada, principalmente, em pneus de elevada velocidade.

O revestimento interno (*Inner liner*) é uma camada de borracha que forma o interior de um pneu sem câmara de ar, impedindo a perda de pressão do mesmo.

As correias (*Belt*) são camadas de fios de aço, poliéster, nylon ou *kevlar* revestidos com borracha que envolvem a carcaça do pneu. Estas são projetadas para reforçar as telas, de forma a aumentar a força e a rigidez. As correias também permitem manter o piso plano no contacto com a estrada, permitindo reduzir o seu desgaste e aumentar a sua resistência a impactos e penetrações.

A carcaça (*Body plies/Carcass*) é composta pelas diversas camadas que compõem o corpo do pneu. A sua principal função é suportar as tensões criadas pela pressão do ar e é feita de aço revestido por borracha. A força de um pneu pode ser descrita pelo número de camadas da carcaça (Jazar, 2008).

As paredes laterais (*Sidewall*) proporcionam estabilidade na zona lateral do pneu, evitam que o ar escape do seu interior, protegem de possíveis danos externos e condições atmosféricas. Na sua superfície são inscritas diversas informações relativas ao pneu, como a sua marca ou modelo, tamanho, série ou perfil, tipo de construção, índice de carga e código de velocidade (Michelin, 2019).

O piso (*Base tread*) é a parte do pneu que está em permanente contacto com o pavimento. Este proporciona tração e aderência ao pneu, permitindo uma boa resistência ao desgaste, à abrasão e ao calor. O seu *design* varia com a marca e a finalidade específica do pneu. No entanto, é sempre composta de borracha natural ou sintética. O espaço entre duas linhas ou blocos de piso designa-se por ranhura. Esta dá capacidade de tração ao pneu, sendo bastante útil em pisos molhados ou com neve (Jazar, 2008).

## 2.2 Processo produtivo dos pneus agrícolas

Para a produção de um pneu coeso e que cumpra as suas especificações é necessário que este complete um conjunto de operações e etapas, segundo uma determinada sequência. O processo produtivo dos pneus é assim dividido em cinco fases.

1. **Misturação:** inicialmente é misturada a borracha, enchimentos e outros ingredientes que vão ser incluídos no pneu. A sua quantidade, tal como referido anteriormente, depende dos objetivos de desempenho do pneu. Esta operação ocorre em liquidificadoras de elevadas dimensões, que criam uma pasta negra e viscosa que será a base para o processo seguinte.
2. **Preparação:** aquando do arrefecimento da borracha, esta reveste os diferentes tecidos e posteriormente é cortada em tiras. Estas vão constituir os diferentes componentes básicos de um pneu, telas, talões, piso, entre outros. Nesta etapa, são também criados alguns dos seus constituintes revestidos com outros tipos de borracha.

3. **Construção:** depois da preparação dos componentes é necessário construir o pneu, montando-o a partir do seu interior. Para tal, os elementos têxteis, as telas, os talões entre outros componentes são colocados em “máquinas de construção” de pneus para a construção da carcaça. Obtém-se assim um pneu “em verde”, designação conferida ao pneu antes de ser vulcanizado.
4. **Vulcanização:** nesta fase o pneu é vulcanizado. Para isso é colocado num molde de cura submetido a uma elevada pressão e temperatura, por um tempo específico. Para comprimir o pneu pelo seu interior contra o molde são utilizados diafragmas (insufláveis) de vulcanização, ou *bladder*. Os moldes conferem ao pneu a sua forma final e permitem criar o padrão característico do seu piso.
5. **Inspeção final:** numa fase final o pneu passa por um controlo de qualidade, onde inspetores especializados analisam a sua qualidade e uniformidade. Apenas com a sua aprovação é que o pneu poderá ser comercializado. Para além desta última inspeção, ao longo de todo o processo são feitas seleções de pneus para o controlo e deteção de possíveis erros ou falhas (Goodyear, 2016).

As fases referidas estão representadas de um modo gráfico, com maior detalhe, na Figura 2.3. Nesta imagem é possível analisar o percurso dos materiais que compõem o pneu, bem como os equipamentos necessários, desde o seu estado puro até à sua forma final.

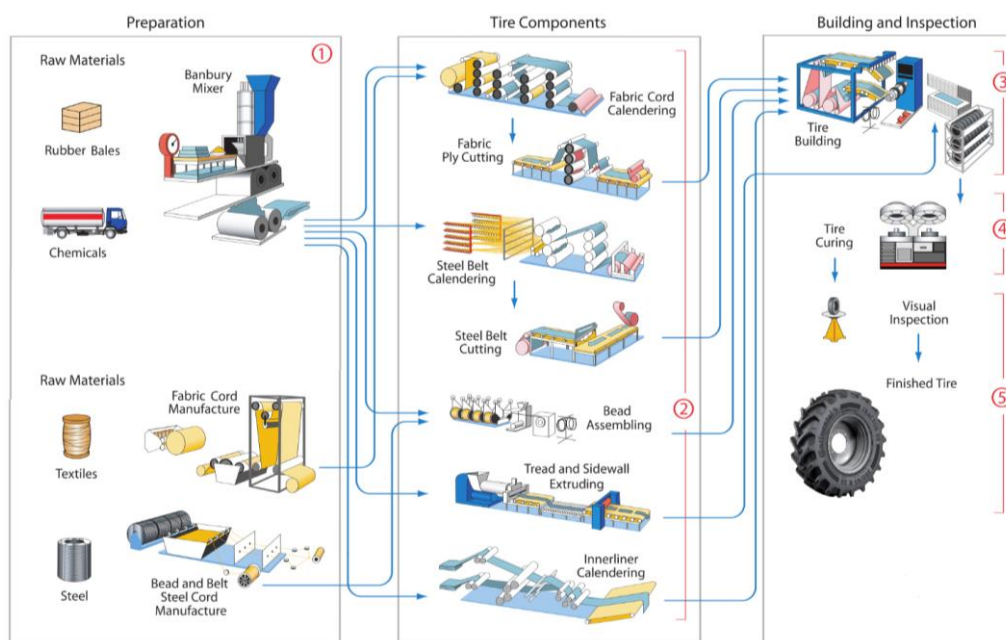


Figura 2.3 Esquema representativo do processo produtivo de um pneu agrícola (Rockwell Automation, 2013).

### 2.2.1 Construção de um pneu “em verde”

A fase de construção do pneu “em verde” divide-se por duas “máquinas de construção”, podendo, no entanto, ser feita apenas numa. Esta divisão pode ser realizar-se, porque a construção da carcaça e do piso podem ser realizadas separadamente. Estes equipamentos “de construção”, do pneu “em verde” eram, inicialmente, do tipo manual. Atualmente são completamente automáticos, sendo manipulados e vigiados sem a necessidade de um operador. Estas máquinas variam estruturalmente com o tipo de pneu.

Previamente à construção é necessário que as telas e os restantes componentes que vão constituir o pneu tenham sido desenvolvidos e cortados de acordo com as especificações. O processo de conformação dos materiais denomina-se “calandragem” e consiste no revestimento, em borracha, de ambos os lados do tecido têxtil. Este é composto por diversos filamentos, normalmente, de poliéster, rayon ou aço, que são fundamentais para o desempenho final do pneu, uma vez que a sua distribuição e espessura podem desenvolver alguns defeitos. A tela têxtil é enrolada num tambor para que depois seja cortada, como se pode ver na Figura 2.4.

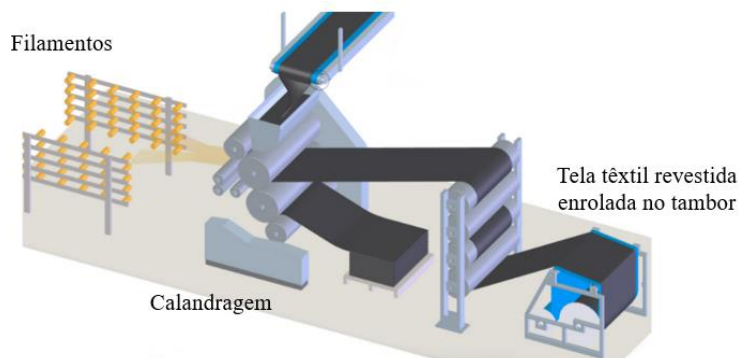


Figura 2.4 Representação do processo de calandragem de telas têxteis (Ammeraal Beltech, 2019).

O corte da tela é o passo seguinte, uma vez que a disposição dos filamentos não é a pretendida nem a eficiente para ser aplicada num pneu.

Estes filamentos, no processo de calandragem, são dispostos ao longo da tela. No entanto, um pneu radial requer que os filamentos sejam dispostos transversalmente, à formação do pneu. Assim, é necessário transformar telas com filamentos alinhados em telas com filamentos normais a esta. Então, a tela original tem que ser cortada em diferentes tiras de tela de dimensão adequada à largura de um pneu, de acordo com o pneu a que vai dar origem. Estas, no entanto, têm que voltar a constituir uma tela contínua, pelo que voltam a ser unidas, através da sobreposição de material, criando as chamadas “emendas de preparação”, separadas de uma distância igual à dimensão da largura da tela original. Na Figura 2.5, é possível observar o processo de corte e posterior junção (emenda).



Figura 2.5 Representação do processo de corte das telas têxteis (SICK AG, 2019)

Posteriormente, é inicializado o processo de construção do pneu “em verde”. Primeiro, os talões são colocados no tambor da máquina de construção. Estes têm de estar corretamente posicionados para que não haja desequilíbrios no pneu.

A segunda operação é a montagem das diversas telas que compõem o seu corpo. Na Figura 2.6 é possível identificar a primeira tela a ser colocada na máquina, bem como os filamentos que a constituem. Junto ao tambor existem, normalmente, passadeiras de distribuição, que permitem distribuir as telas de forma automática. Estas estão programadas para permitir o avanço das telas segundo a sua ordem de construção. Assim, uma das suas extremidades é colocada sobre o tambor da máquina. Este, por sua vez, roda até que haja uma sobreposição de dois a cinco filamentos de tela, criando-se assim uma “emenda de construção”. Para a fixação dos seus limites é utilizado um rolete.

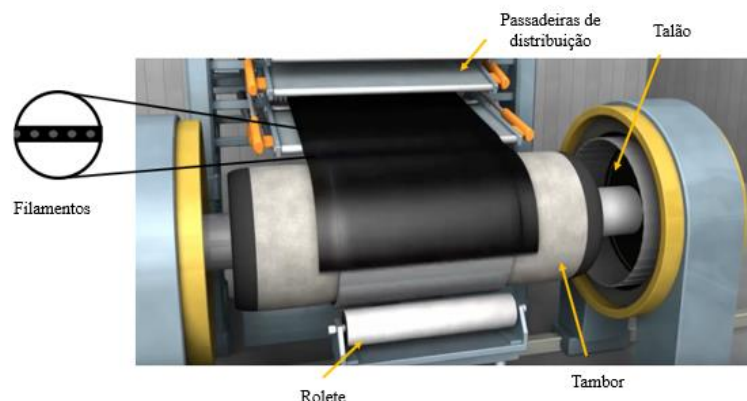


Figura 2.6 Representação da colocação das telas no tambor da máquina de construção (U.S. Tire Manufacturers Association, 2018).

A instalação automática dos aros dos talões, através de aplicadores, é o processo seguinte. Este permite virar as extremidades laterais das telas para o interior da carcaça, utilizando um diafragma de vulcanização. Esta área da tela é de novo comprimida pelo rolete.

As paredes laterais são colocadas nos extremos do tambor sobre a carcaça, montada anteriormente. O tambor volta a rodar sobre si de forma a unir os extremos que, por fim, são calcados pelo rolete.

No caso dos pneus agrícolas, devido à sua dimensão, são necessários tambores com elevado comprimento. Nestes, são colocadas as telas tal como descrito acima. No entanto é ainda necessário criar “emendas horizontais”. Isto é, devido à altura do pneu - distância entre as suas paredes laterais - é necessário mais do que uma tela para revestir todo o perfil do pneu, sendo colocadas diversas telas seguidas até se criar a sua altura predefinida. Assim, depois da primeira volta, o tambor movimenta-se na horizontal para que seja colocada uma nova tela, igual à anterior. Este processo repete-se até se atingir a altura pretendida, podendo assim existir mais do que uma “emenda horizontal”, contínua ao longo de todo o perímetro.

Por último, é montado o piso. A sua construção pode ser realizada em sequência na mesma máquina ou ser realizada separadamente, sendo composta por cintas, telas de proteção e o piso. A montagem das cintas, telas e o piso, é semelhante ao processo utilizado na carcaça, usando o tambor de construção como instrumento para unir as suas extremidades e um rolete para fazer a sua compressão. As cintas são colocadas no centro da carcaça, as telas sobre estas e finalmente é colocado o piso (Caetano, 2014).

Nesta fase, o pneu “em verde” caracteriza-se pela sua excentricidade, uma vez que ainda não passou pela fase de vulcanização, ou seja, ainda não tem a sua forma definida. Esta característica pode influenciar o estudo do sistema de medição a utilizar, como será analisado, com maior detalhe, no próximo capítulo.

### 2.2.2 Processo de pintura e não conformidades em pneus

A pintura do pneu “em verde”, é o processo de aplicação de desmoldante na superfície interior do pneu, que segue à sua construção. Este é essencial para que a vulcanização se desenvolva corretamente, sem dificuldades.

Esta aplicação, atualmente, é realizada por robôs. Estes têm no seu punho uma ferramenta (pistola de pintura) que irá pulverizar o interior do pneu “em verde”, com um material lubrificante adequado, antes de se inicializar a vulcanização.

A aplicação de desmoldante pode ser feita de forma uniforme ao longo de todo o perfil interior do pneu ou seguir especificações concretas. Devido à existência de emendas no seu interior, que constituem uma sobre-espessura local, podem ser impulsionados defeitos de construção no pneu. As não conformidades ou defeitos podem ser:

- Defeitos de geometria, como a existência de bolhas, caso o desmoldante ou o ar consigam penetrar no pneu, através de uma emenda aberta (Figura 2.7), devido à elevada pressão reinante no processo;
- Variações da distribuição de forças num pneu, caso haja uma acumulação excessiva de material lubrificante nas emendas;
- Mau balanceamento de massa, caso haja sobreposição de emendas ou excesso de material concentrado num ponto do pneu (ITW Akron Standard, 2001).

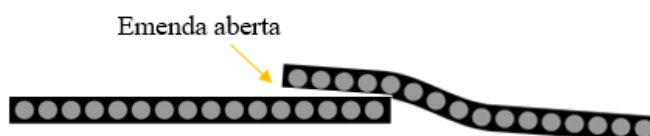


Figura 2.7 Emenda aberta.

Assim, nalguns casos, é então necessário não pulverizar estas áreas, de forma a diminuir possíveis erros no processo que se segue à pintura (vulcanização).

A camada de desmoldante aplicada num pneu “em verde”, permite reduzir o atrito e remover o ar do interior do pneu, à medida que o diafragma de vulcanização expande. Este vai comprimir o pneu contra o molde exterior e, uma vez terminada a vulcanização, é necessário “descolá-lo” das paredes internas do pneu. Com o desmoldante aplicado, esta operação torna-se mais fácil e rápida (United States Environmental Protection Agency, 1981).

Este processo é essencial para a construção de um pneu uniforme e homogêneo, porque, o excesso de desmoldante aplicado nas emendas é uma das principais causas apontadas para o desenvolvimento de não conformidades nos pneus, e o seu defeito pode provocar a degradação do diafragma de vulcanização.

## 2.3 Emendas em pneus agrícolas

Como referido anteriormente, as emendas são criadas ao longo da construção do pneu, através da união dos extremos dos seus componentes, tal como se pode ver na Figura 2.8. Constituem assim uma sobre-espessura localizada numa secção específica do pneu.

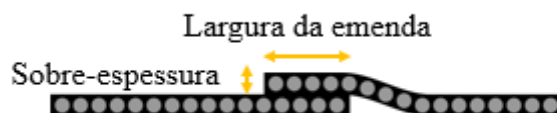


Figura 2.8 Representação de uma emenda.

Estas uniões são imprescindíveis para a construção do pneu, mas simultaneamente têm de ser minimizadas, visto que podem criar defeitos, como os referidos acima. Num pneu automóvel, são permitidas, no máximo, três emendas, uma vez que estas têm o dobro da espessura do componente a ser integrado. No caso dos pneus agrícolas, são necessárias mais emendas, uma vez que têm dimensões muito superiores. Relativamente à sua largura, esta varia com a marca e tipo de pneu, mas é sempre especificada de forma a minimizar defeitos de balanceamento de massa.

Numa emenda é possível observar sobreposições de material por excesso ou por defeito, relativamente ao valor de sobreposição padrão. O pneu, devido à sua forma, permite que as suas forças centrífugas se anulem. No entanto, com a acumulação de matéria concentrada numa área, a sua excentricidade varia, o que provoca uma alteração não negligenciável no seu balanço dinâmico. Ora, quanto maior for a zona de união entre os extremos do componente, maior será o impacto no balanço dinâmico do pneu e nas suas forças radiais. Assim, de forma a combater esta excentricidade, as emendas devem estar suficientemente espaçadas entre si e são colocadas para que anulem o efeito que provocam no equilíbrio dinâmico do pneu.

No caso de uma emenda ter uma sobreposição inferior ao padrão, ou seja, falta de material, é possível despoletar falhas na construção, uma vez que aumenta o risco de rutura da emenda e de escape do ar.

No final do processo de construção do pneu “em verde” é feita a sua vulcanização. Nesta fase o pneu é colocado num molde e pressurizado por um diafragma de vulcanização, que o comprime contra as paredes do molde. Durante esta pressurização, a emenda pode abrir, caso não esteja suficientemente coesa e haja acumulação de material lubrificante, tornando o pneu inapto para comercialização. No caso de nada acontecer nesta fase, na inspeção final são realizados testes para verificar a resistência do pneu à pressão e, caso a emenda não esteja suficientemente consistente podem criar-se relevos que, mais uma vez, tornam o pneu impróprio para comercialização. Estes defeitos também podem desenvolver-se depois do seu uso, provocando vibrações, desgaste irregular e prematuro tanto do pneu como da suspensão, assumindo assim uma falta de qualidade que se associa à “imagem” da marca.

Na presente dissertação, os pneus em análise são agrícolas. Assim sendo, as suas dimensões são extremamente elevadas, comparativamente aos pneus usados nos automóveis, os pneus ligeiros. Neste caso, existem tanto “emendas verticais” como “emendas horizontais”, uma vez que as telas elementares não conseguem cobrir todo o perfil do pneu.

Na Figura 2.9 é possível ver a representação de uma “emenda vertical”, baseada na Figura 1.2 (Capítulo 1). Estas formam-se através da sobreposição dos extremos de duas telas contíguas. Este processo realiza-se no tambor de uma máquina de construção, como referido anteriormente, e verifica-se sempre que aí se coloca uma nova tela. Nos pneus ligeiros apenas existe este tipo de emendas, uma vez que as suas telas elementares têm dimensões suficientes para cobrir todo o perfil dos pneus.

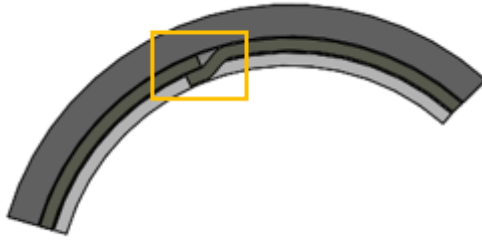


Figura 2.9 Representação de uma “emenda vertical” num pneu “em verde”.

As “emendas horizontais” são necessárias apenas em pneus com elevadas dimensões. Estas estão presentes ao longo do perímetro do pneu e são criadas quando se sobrepõem duas telas diferentes, de forma a obter a altura predefinida do pneu a construir - altura do pneu é a distância entre as suas paredes laterais. Nestes pneus, entre duas “emendas horizontais”, existe sempre uma “emenda vertical”.



### 3 Apresentação do projeto

No presente capítulo, é feita uma descrição pormenorizada do projeto, apresentando a solução atual para identificar o perfil de um pneu e a localização das suas emendas interiores. Posteriormente, tendo por base os requisitos discriminados para o projeto, são apresentadas algumas soluções de medição e movimento do pneu.

#### 3.1 Cabine de pintura

O projeto a desenvolver foi proposto para ser inserido num equipamento já construído pela Gislótica, uma cabine de pintura (de aplicação de desmoldante), como representado na Figura 3.1. Nesta máquina, o pneu “em verde” é pulverizado, interiormente, com desmoldante de forma completamente automática.



Figura 3.1 Cabine de pintura de pneus “em verde” desenvolvida pela Gislótica.

A máquina tem dimensões 18x15x8m e foi desenvolvida especificamente para a pintura de pneus agrícolas. Para tal, é equipada com toda a tecnologia e equipamentos necessários ao processo, bem como um sistema de ventilação e sucção de partículas que permitem a manutenção da sua constante limpeza.

O percurso do pneu inicia-se nos carris de entrada e termina em iguais carris de saída. Estes funcionam como uma passadeira, completamente automática, que permite o transporte do pneu do exterior para o interior e vice-versa.

Já no interior, um sistema de transporte garante o movimento do pneu desde a passareira até ao local de pintura. Este contém uma ferramenta que permite suportar o pneu durante todo o processo, bem como durante o seu transporte. Esta tem capacidade para suspender uma carga superior a 1200 kg e rodá-la 360°, uma vez que a colocação dos cabos elétricos utilizados foi concebida, de forma a permiti-lo.

A ferramenta foi desenvolvida, integralmente, pela empresa e está representada na Figura 3.2.

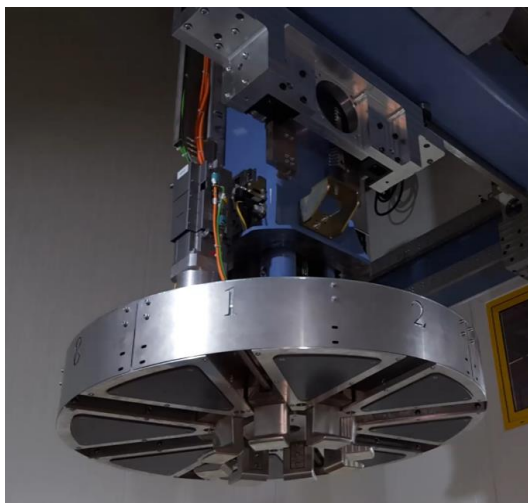


Figura 3.2 Ferramenta desenhada pela Gislótica para o suporte e transporte de pneus agrícolas.

De seguida, o pneu é centrado com o robô de pintura, através do sistema de transporte. Este robô vem equipado com duas ferramentas de pintura (pistolas) no seu punho, que pulverizam o interior do pneu. Através do movimento de rotação da ferramenta do sistema de transporte e a permanência do robô de pintura na sua posição central, o desmoldante é aplicado em todo o perfil do pneu, ou conforme o requisitado.

### 3.2 Identificação do perfil do pneu

A pintura do interior do pneu, tal como referido no Capítulo 2, é essencial para o processo de vulcanização do mesmo, uma vez que o diafragma de vulcanização necessita de ser facilmente separado da superfície interior do pneu, mesmo a elevadas temperaturas. Ora, para isso é necessário que a pintura seja uniforme ao longo de todo o interior do pneu, segundo os requisitos de pintura, por exemplo, pintar ou não sobre as suas emendas interiores. Assim, devido aos seus requisitos e importância é fundamental detalhar a superfície interior do pneu “em verde” antes de este ser pintado.

Toda a área do pneu deve ser pintada conforme o requisitado, portanto tanto o excesso de material desmoldante como o defeito têm efeitos:

- caso seja aplicada uma quantidade inferior à ideal, a qualidade do pneu pode ser comprometida e pode provocar a degradação do diafragma de vulcanização;
- caso seja aplicada em excesso existe um desperdício de material e, portanto, custos acrescidos. Neste caso, existe ainda a possibilidade de aumentar a probabilidade da ocorrência de defeitos no pneu, bem como poluição ambiental.

Consequentemente, a primeira fase do projeto a desenvolver é perfilar o interior de um pneu agrícola. Através de um sistema de medição, pretende-se recriar o contorno interior do pneu,

para que seja possível visualizar as diferentes inclinações da sua superfície interna, em relação ao eixo central do pneu. Para isso, o sistema de medição deverá conseguir medir a distância entre o centro do pneu e a sua superfície interior, para que seja possível recriar este contorno.

Conhecer este perfil é essencial, uma vez que para a aplicação de desmoldante no interior do pneu, é necessário que toda a superfície requerida seja pulverizada. Ora, como o perfil do pneu não é uniforme, o robô de pintura deverá ser programado para que se posicione, de forma a que as pistolas pulverizem toda a superfície interior do pneu. Este posicionamento vai depender do ângulo de pulverização das pistolas e do ângulo imposto a estas pelo robô, em relação ao eixo central do pneu. O ângulo de pulverização corresponde à abertura possível da pistola, que permite uma maior ou menor área pulverizada com desmoldante.

A Figura 3.3 pretende representar as diferentes zonas que podem existir num pneu agrícola, onde o perfil tem uma inclinação diferente, exigindo uma alteração no ângulo das pistolas de pintura. Tal como referido no Capítulo 1, quando estes pneus “em verde” são transportados pela ferramenta, que existe na cabine de pintura, o seu perfil varia, uma vez que se encontram suspensos pela sua parede lateral superior.

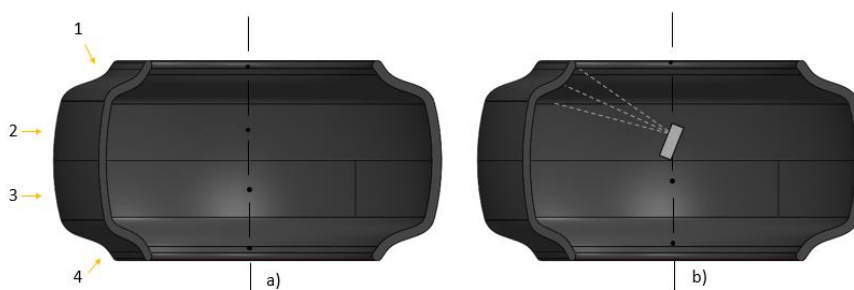


Figura 3.3 Em a) representação da divisão do pneu e em b) inclinação pistolas de pintura.

Assim, ao longo desta etapa de construção de um pneu “em verde”, as pistolas têm de alterar o seu ângulo, para que todo o perfil seja pulverizado segundo os pré-requisitos de pintura.

### 3.2.1 Solução atual

Atualmente, a identificação do perfil de um pneu agrícola é feita através de um operador. Este avalia visualmente as curvaturas presentes ao longo do perfil, para que posteriormente programe o processo de pintura. Não existe, portanto, um registo do contorno da superfície interna do pneu.

Desta forma a identificação do perfil não permite ao operador saber, com grande precisão, o ângulo que terá de dar às pistolas de pintura, para que seja pintado todo o seu interior, segundo os requisitos. Como é possível ver na Figura 3.3 a), existem áreas no perfil do pneu que, devido às suas curvaturas, não permitem que sejam pintadas da mesma forma que zonas mais retas, como o piso. Assim, é necessário saber qual o ângulo necessário da pistola e o seu ângulo de pulverização, de forma a garantir a pintura uniforme do pneu.

Devido à incerteza do processo, este é repetido até que o interior do pneu esteja pintado de forma uniforme. Isto é, como o perfil não é obtido com precisão, o operador dá um ângulo às pistolas que pode não estar totalmente correto, sendo necessário repetir o processo. Ora, tal provoca uma pintura em excesso em áreas já pintadas e aumenta o tempo dispensado para este processo. Também é de extrema importância a segurança do operador, uma vez que tem de se

deslocar para o interior da cabine de pintura para realizar todos estes processos de identificação.

Assim, torna-se essencial automatizar o processo de identificação do perfil do pneu, diminuindo incertezas e faltas de precisão.

### 3.3 Detecção de emendas

Como visto no Capítulo 1, as emendas num pneu são inevitáveis e inerentes ao processo produtivo. No entanto, podem provocar alguns defeitos graves. Desta forma, estas devem ser analisadas, ao longo do processo de construção, vulcanização e inspeção final, com bastante cuidado, tentando minimizar defeitos como:

- bolhas, devido a excesso de ar ou acumulação de material desmoldante;
- variações na distribuição de forças;
- irregularidade da forma, entre outros.

Assim, torna-se essencial localizar as emendas interiores antes da aplicação de material desmoldante.

Tal como referido, neste projeto, as emendas que se pretendem detetar são as que se revelam no interior do pneu agrícola – “emendas verticais” e “emendas horizontais”.

#### 3.3.1 Solução atual

Atualmente, o processo de medição e deteção de emendas é realizado de forma manual, por operadores especializados. Esta identificação é realizada, certamente, sem grande precisão ou rigor. Para esta operação são utilizados instrumentos de medição convencionais, que permitem, numa primeira fase, verificar o diâmetro, altura e largura do pneu e, de seguida, identificar o número e posição angular das suas emendas interiores. Como base para a medição, e de forma a que esta seja feita sempre da mesma forma, a referência angular utilizada é relativa à localização do código de barras no pneu. Desta forma, cada emenda é localizada a partir do ângulo que faz com este código, como está representado na Figura 3.4. Cada pneu tem um código de barras próprio, que permite identificá-lo completamente e localizá-lo. Através deste é possível aceder à informação sobre as fases pelos quais o pneu passou ou terá de passar, bem como as suas principais características técnicas. Ao longo do processo de construção e desenvolvimento, ou até quando os pneus são comercializados, é possível atualizar ou associar informação ao código de barras. Esta é proveniente de uma base de dados.



Figura 3.4 Esquema representativo da deteção de emendas em relação ao código de barras.

Para a medição do pneu e localização das emendas, o operador necessita de entrar na cabine de pintura, estando exposto a diversos riscos. Os pneus agrícolas são bastante pesados e toda a estrutura que permite fazer o seu transporte é igualmente robusta. Como tal, o operador ao colocar-se no centro do pneu, caso este esteja suportado pela ferramenta de transporte, está sujeito a que estes caiam sobre si. No caso de avaria ou falha do sistema é também extremamente perigoso um operador estar dentro da máquina.

Por último, os valores recolhidos pelo operador são armazenados numa base de dados. Esta contém toda a informação sobre os diferentes tipos de pneus produzidos na empresa.

Como é possível verificar, este processo de detecção de emendas não garante uma elevada confiança nos seus resultados, visto depender totalmente do operador, não permitindo a sua segurança. Assim, torna-se imprescindível automatizá-lo.

### **3.4 Requisitos do projeto**

Para o desenvolvimento de uma solução, é necessário ter em atenção certas exigências:

- Conceber um sistema automático, visto que um dos principais objetivos da dissertação é eliminar a insegurança do processo atual de reconhecimento da superfície interior do pneu.
- Escolher um sistema de medição que permite a detecção das emendas existentes no interior de um pneu “em verde” e recriar o seu perfil, num curto espaço de tempo, a um custo comportável. Para tal devem ser testados diferentes equipamentos;
- Desenvolver um projeto flexível, para que seja aplicável noutras máquinas e com outros pneus, isto é, escolher um sistema de medição com base no menor valor de sobre-espessura (2mm);
- Elaboração de uma solução de controlo de movimento que permita otimizar o processo de medição;
- Desenvolver uma solução de controlo que garanta o cumprimento dos objetivos;
- Criar uma HMI intuitiva, com operações simples e rápidas, não só para testes, mas também para uma futura utilização na cabine de pintura.
- Garantir a exatidão e repetibilidade de todo o processo.

### **3.5 Soluções estudadas**

Após uma apresentação do projeto, dos seus objetivos e requisitos, serão agora estudadas diferentes soluções automáticas para o seu cumprimento. O processo será dividido em duas fases:

- Movimento do pneu;
- Medições através de um sistema de medição.

Inicialmente, foi idealizado um sistema mecânico que permitisse o movimento do sistema de medição escolhido, de forma a que este perfilasse o pneu e se aproximasse da sua superfície interna para a medição das suas emendas. No entanto, rapidamente se observou que seria mais eficaz utilizar a ferramenta de movimentação já existente na cabine de pintura, para controlar

o movimento do pneu, mantendo-se assim o sistema de medição imóvel. Nesta solução apenas é necessário alterar a trajetória do sistema de transporte e programá-lo para que realize o movimento desejado. Este movimento, por sua vez, é dependente do sistema de medição escolhido e das suas características.

Ora, tendo definido o sistema que garante o movimento, é necessário escolher um equipamento para detetar as emendas nos pneus e recolher as distâncias entre este e a superfície interior do pneu, de forma a recriar o seu contorno (perfil). Este sistema será determinante para o desenvolvimento da solução de controlo.

### **3.5.1 Sistemas de medição**

Para o presente projeto foi necessário estudar os diferentes equipamentos capazes de medir distâncias entre o centro do pneu e a sua superfície interior, de forma a recriar o seu perfil bem como detetar as suas emendas interiores. A todo o equipamento necessário para obter uma medição dá-se o nome de sistema de medição.

Foi feita uma pesquisa sobre diversos tipos de sensores disponíveis em diferentes marcas: Sick, LMI Technologies, Cognex, Banner e Keyence. Estas marcas têm equipamentos especificamente desenvolvidos para a indústria de pneus, o que tornou mais fácil a sua seleção. Assim, rapidamente foi verificado que os sistemas mais utilizados nesta indústria para aplicações de medição, eram de tecnologia laser:

- Sensores laser de distância;
- Câmaras de visão 3D.

O LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) consiste num raio de luz monocromático (comprimento de onda definido) e direcional que pode ser de diferentes tipos, dependendo da sua duração, da forma do seu feixe e da sua potência.

Estes sistemas funcionam através da amplificação da luz por emissão estimulada de radiação, que consiste na excitação de átomos e posterior emissão estimulada de energia. Neste caso, as emissões de cada fóton ocorrem numa única direção e num instante de tempo ordenado, isto é, as emissões são forçadas. A propagação dá-se, porque, quando dois fótons coincidem há emissão de radiação, aumentando o comprimento do feixe e a sua amplitude. O constante contacto entre fótons permite criar as linhas laser tal como conhecemos, definidas com grande alcance e com uma única cor (Pinheiro, Paulo F. de Almeida, & Luiz Guilherme P. Soares, 2017).

Hoje em dia, este tipo de sistemas de medição são fundamentais para processos de automação industrial, uma vez que permitem uma elevada fiabilidade nas medições, sendo bastantes as marcas e soluções disponíveis.

Por outro lado, a junção de um laser com uma câmara de visão permitiu criar soluções 3D de elevada qualidade e precisão. Estas imagens são facilmente analisadas, posteriormente, nas aplicações informáticas desenvolvidas para este tipo de aquisição de medições.

Para a escolha do sistema de medição é necessário ter em consideração diversos parâmetros, como:

- Detalhes de aplicação;
- Objetivos finais;

- Gama de medição;
- Velocidade do pneu;
- Tempo de aquisição;
- Tamanho do laser;
- Custo.

### Detalhes de aplicação

Inicialmente, é necessário ter em consideração que o objeto em análise é um pneu “em verde”. Este é característico pela sua cor preta e composto, maioritariamente, por borracha. Para além disso, por não estar na sua fase final de produção, a sua forma ainda não é totalmente bem definida.

A cor escura dos pneus absorve bastante a luz, podendo comprometer a qualidade dos valores medidos pelos sensores. Portanto os equipamentos a estudar têm de ser capazes de medir sobre superfícies pretas.

Relativamente à borracha, este polímero com elevada resistência à tração e boa elasticidade, na presença de um laser pode não refletir o feixe incidente da forma esperada, podendo alterar o bom desempenho destes sensores. Assim, torna-se essencial analisar se estes são apropriados para a indústria de pneus.

Um último detalhe importante deste projeto, é que o pneu em estudo se encontra na sua fase de construção, portanto, a sua forma não é uma circunferência definida (forma excêntrica). A Figura 3.5 pretende representar os erros de medição que podem existir devido à irregularidade da forma de um pneu “em verde”, caso o sensor esteja fixo no seu centro. Estas variações não podem ser identificadas, ou confundidas como emendas.

Concluindo, será necessário que o sistema permita, através dos seus resultados, distinguir irregularidade da forma e emendas. Para tal, é necessário um sensor com boa repetibilidade.

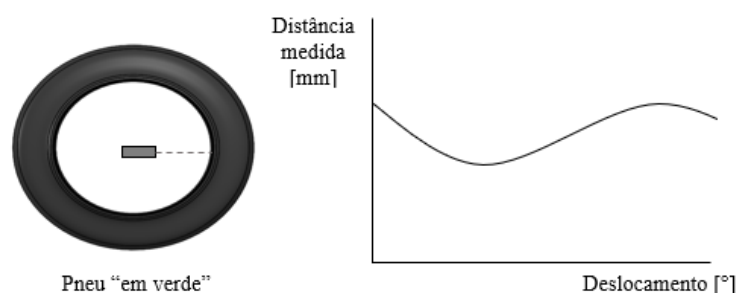


Figura 3.5 Irregularidades da forma de um pneu “em verde” (ITW Akron Standard, 2001).

### Objetivos finais

Para a escolha dos equipamentos de medição mais indicados para o projeto, é necessário explicitar bem os objetivos finais pretendidos. Desta forma, serão analisados os requisitos para que o sistema de medição seja capaz de medir todos os pontos que possibilitam traçar o perfil interior do pneu, bem como aqueles que, posteriormente, pela sua análise, permitem a localização/detecção das suas emendas.

Nesta fase do projeto, é necessário escolher um sistema de medição capaz de medir uma emenda e traçar o perfil de um pneu, através das suas medições. Para tal, é esperado que:

- Colocando o sistema de medição dentro do pneu, aquando do início do seu movimento, este deverá medir todos os pontos que permitem traçar o seu perfil. O número de pontos dependerá da velocidade dada ao pneu;
- O sensor deverá ser capaz de medir o número de vezes necessárias para que seja possível detetar uma emenda;
- Para a medição de “emendas verticais” o sensor, colocado dentro do pneu, deverá medir a distância entre ele e a superfície interna do pneu, durante uma rotação completa;
- As suas medições têm de permitir a posterior deteção de uma emenda.

É importante diferenciar a medição de uma emenda e a sua deteção. Para que haja uma deteção, será primeiro necessário medir. Neste momento, para a escolha de um sistema de medição, apenas é importante estudar o que esperar de uma medição de uma emenda.

O que diferencia a medição de uma sobre-espessura é a variação brusca entre duas medições consecutivas e uma posterior suavização desse mesmo valor. Esta diminuição brusca da distância medida e posterior aumento suavizado, está representado na Figura 3.6. O ponto 1 representa a variação elevada do valor de distância medido entre duas medições consecutivas, e o ponto 2 o posterior aumento da distância medida, até que este se iguale à distância efetiva entre o sensor e a superfície.

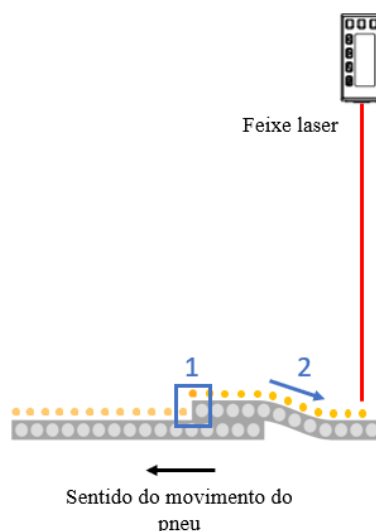


Figura 3.6 Resultados esperados pelo equipamento de medição, num troço de pneu ampliado.

De salientar que existem também soluções mais dispendiosas que permitem recriar todo o interior do pneu, através de uma imagem, nesse caso, os resultados obtidos não seriam os representados na Figura 3.6, mas sim uma imagem 3D, que seria posteriormente analisada, para detetar uma emenda.

Para que seja possível obter estes resultados, é necessário que o equipamento tenha capacidade para obter medições precisas e repetíveis ao longo de toda a área do pneu. Para melhor compreensão destes conceitos, estes serão detalhados de seguida:

- Mensuranda – grandeza que se pretende medir, neste caso, uma distância;

- Exatidão – aproximação entre o valor medido pelo sistema de medição e o valor real de uma mensuranda. Este conceito não se pode quantificar, no entanto, uma medição é tanto mais exata quanto menor for o seu erro de medição;
- Erro de medição – diferença entre o valor medido e o valor de referência (real). Este valor de referência deverá ser obtido através de um outro sistema de medição de ordem de exatidão (classe) superior;
- Resolução – menor variação na grandeza a medir (mensuranda) que lhe provoca uma variação no valor medido;
- Repetibilidade – fidelidade da medição para um dado conjunto de repetibilidade, isto é, mantendo o mesmo procedimento de medição, com o mesmo sistema de medição, operadores e objeto a medir (Instituto Português da Qualidade, 2012);
- Fidelidade de medição ou precisão - aproximação entre os valores medidos, obtidos por medições repetidas, em condições específicas, segundo a norma ISO 5725-3:1994 (ISO, 1994).

Tendo estes conceitos presentes, torna-se mais fácil afirmar que se pretende um sistema preciso, com elevada repetibilidade. Neste caso, como as emendas têm sobre-espessuras entre 2 e 4 mm, a repetibilidade e precisão do sistema deveria ser 100x melhor do que o valor medido, isto é  $\pm 0,01\text{mm}$ . No entanto, como o pretendido é detetar uma emenda, não será necessário um rigor elevado. Portanto, podem ser utilizados sistemas de medição, com repetibilidades até  $\pm 1\text{mm}$ . Assim, será garantida a leitura da sobre-espessura, com um menor erro de medição.

A exatidão do sistema de medição não é uma característica importante, neste caso, porque os objetivos do sistema (recriar o perfil do pneu e localizar as sobre-espessuras) não necessitam de um valor exato da distância entre o sensor e o objeto, para que sejam cumpridos.

No entanto, é necessário ter em consideração que os valores fornecidos nas fichas técnicas dos sistemas de medição são para sistemas estáticos, isto é, os valores apresentados de repetibilidade e precisão são obtidos quando o objeto e o sistema estão parados. Portanto, espera-se um erro dinâmico, que irá piorar estes valores disponibilizados.

### Gama de medição

A gama de medição de um sistema de medição, é o intervalo de valores entre os quais este consegue medir. A medição é efetuada dentro de um intervalo de distâncias máximo e mínimo, entre o equipamento e o objeto a medir, neste caso a superfície interior do pneu, tal como representado na Figura 3.7.

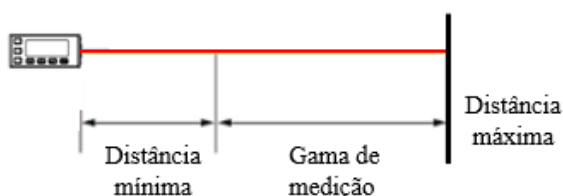


Figura 3.7 Gama de medição de um sistema de medição.

Esta propriedade do sistema de medição é bastante importante para a escolha do equipamento, porque as paredes laterais são curvadas para o centro do pneu e o seu piso tem dimensões bastante elevadas. Portanto, para que não haja colisão entre estas e o sistema de medição, este

deverá ser colocado a uma distância em que, tendo em consideração a sua gama de medição, não cause erros de medição. Assim, é possível concluir que, para este projeto, deveram ser escolhidos sistemas com uma ampla gama de medição.

No entanto, tal como será analisado posteriormente, estes valores podem variar, caso seja possível movimentar o pneu para que o sensor esteja sempre a uma distância conhecida da sua superfície interior.

### **Velocidade do pneu e tempo de aquisição do sistema**

Uma outra característica fundamental a analisar, será o tempo de aquisição do sistema de medição e as suas implicações caso a aplicação não seja estática.

O tempo de aquisição de um sistema de medição é o intervalo de tempo necessário para que a saída (valor medido) altere o seu valor, desde a primeira medição. Este intervalo de tempo entre duas saídas consecutivas é bastante importante para o sistema a desenvolver, uma vez que as dimensões de um pneu agrícola são bastante elevadas e a velocidade de rotação do pneu depende deste tempo de resposta do sistema de medição, sendo tanto maior quanto menor for o tempo de resposta.

Portanto, este deverá ser o mais curto possível, para que sejam detetadas as emendas e identificado perfil do pneu a uma velocidade consideravelmente elevada. Esta velocidade dependerá também do número de sensores a usar, do tamanho do pneu e do hardware utilizado para a eventual conversão do sinal.

Neste caso, não é possível limitar o tempo de aquisição, uma vez que à partida não existe um limite de tempo de ciclo predefinido. Assim, os sistemas de medição escolhidos deverão permitir a medição a diferentes velocidades, variando assim o seu tempo de aquisição.

Relativamente à velocidade do pneu, esta, tal como referido, será dependente do tempo de aquisição do sistema. No entanto, como sabemos, o erro de medição aumenta com a diminuição do tempo de aquisição, pelo que, posteriormente, serão realizados ensaios para que se encontre a velocidade ideal para o sistema.

### **Dimensão do laser**

A dimensão do feixe laser projetado na superfície varia bastante dependendo do sistema, sendo, por vezes, superior à dimensão de uma emenda. Esta área laser projetada pode ser circular ou retangular.

O laser ao percorrer o interior do pneu, sendo de dimensões superiores à emenda, pode não fazer a medição da distância entre ele e a sobre-espessura corretamente, não sendo depois possível detetar esta emenda. Assim, torna-se relevante estudar diferentes sistemas, com diferentes dimensões de área laser projetada, de forma a avaliar a sua influência nos resultados obtidos.

Relativamente às câmaras de visão 3D, estas permitem a medição através de um varrimento por um feixe (linha) laser, abrangendo uma trajetória linear muito superior, comparativamente ao laser de ponto incorporado nos sensores de distância. Portanto, não há influência na leitura devido ao tamanho do laser.

## Custo

Por último, outro fator que influencia na decisão de escolha de um sistema de medição é o seu preço. Como é de esperar, quanto mais exato e fiável for o sistema a grandes distâncias (>1000mm), mais cara se torna a solução. Neste caso, o projeto será para aplicar apenas a um pneu de cada família. Portanto a solução completa não poderá ser muito dispendiosa.

Este fator torna-se, portanto, fundamental na escolha de um sistema de medição para o projeto, assim como todos os equipamentos utilizados para o seu controlo.

Tendo por base os diversos pontos referidos acima, foram analisados alguns sistemas de medição já existentes na empresa e, posteriormente, escolhidos outros para que fossem testados diferentes sistemas. Todos eles são apresentados de seguida.

### 3.5.1.1 Sensor laser LE550IQ, da Banner

Um dos sensores de distância estudado foi o LE550IQ da Banner, Figura 3.8. Sendo indicado para a indústria de pneus, será de esperar um bom desempenho na sua superfície de borracha preta. Este sensor é económico e tem uma boa precisão, dado o seu alcance.



Figura 3.8 Sensor laser LE550IQ da Banner.

Nesta figura é reconhecido, na face superior, um visor LCD (*display*), onde é indicada a medição da distância em tempo real e a saída analógica, três indicadores LED, que fornecem indicação contínua do estado de deteção e quatro botões de programação do sensor e acesso a informação.

Relativamente às suas principais características, estas são apresentadas na Tabela 3.1 e são, posteriormente, analisadas.

Tabela 3.1 Características do sensor LE550IQ da Banner.

|                    | LE550IQ       |
|--------------------|---------------|
| Gama de medição    | 100 a 1000 mm |
| Dimensões do laser | 4,9 x 12,1 mm |
| Repetibilidade     | $\pm 1$ mm    |
| Tempo de aquisição | 2/5/15/50 ms  |

Este sensor tem quatro tempos de aquisição para diferentes velocidades de medição, tal como se pode ver na Tabela 3.1. Estes valores representam diferentes gamas de velocidade na qual a medição é calculada, isto é, para velocidades mais lentas de cálculo há um maior tempo de resposta do sensor, mas aumenta a exatidão e a repetibilidade do mesmo. Neste sentido, para

este projeto, será interessante avaliar o sensor nas suas diferentes velocidades de aquisição de dados, de forma a estudar qual será a mais indicada a utilizar (Banner, 2019).

O sensor utiliza triangulação a laser para aquisição de dados, isto é, um feixe laser incide sobre a superfície do objeto, para que, ao ser refletido por este, se consiga medir a distância. Este valor é calculado através da distância entre o ponto de laser enviado e a sua reflexão no sensor e o ângulo de incidência que a sua reflexão faz no sensor. A Figura 3.9 pretende representar este processo.

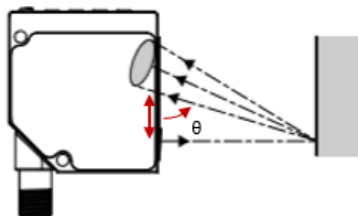


Figura 3.9 Triangulação laser.

Para a análise deste sensor é fundamental estudar as suas curvas de repetibilidade, representadas na Figura 3.10.

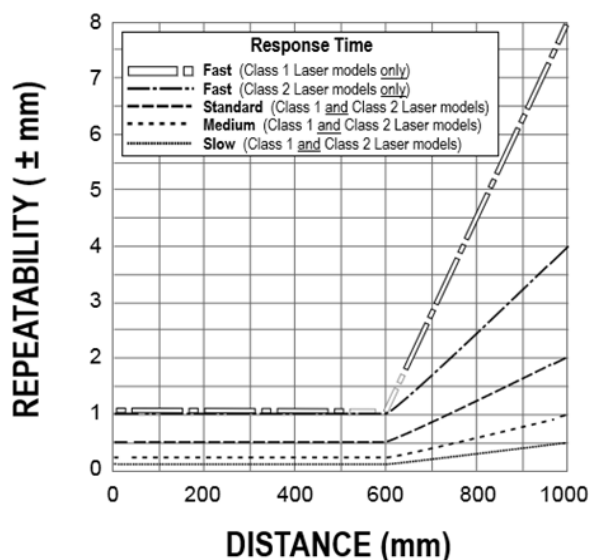


Figura 3.10 Gráfico de repetibilidade do sensor LE550IQ (Banner, 2019).

Estes gráficos permitem analisar o comportamento do sensor com o aumento da distância ao objeto a medir. Tal como é possível observar, a repetibilidade do sistema varia bastante com a velocidade de aquisição imposta. Em todo caso, até 600mm o valor de repetibilidade estará sempre compreendido entre 0 e  $\pm 1$ mm. Porém, estes valores têm de ser testados, uma vez que, neste projeto, o objeto a medir (pneu) se movimenta durante a medição, o que pode provocar erros dinâmicos.

### 3.5.1.2 Sensor laser LM150, da Banner

Um outro sensor analisado, neste projeto, foi o LM150 da Banner (Figura 3.11). Este, apesar de ter uma gama de medição bastante inferior, comparativamente com o sistema de medição apresentado anteriormente, possui uma repetibilidade e uma dimensão de raio laser projetado

inferior. Sendo estas características influentes no resultado obtido em cada medição, será interessante estudar este tipo de equipamento.



Figura 3.11 Sensor laser LM150 da Banner ( Banner Engineering Corp., 2018).

As principais características referentes a este sensor são apresentadas na Tabela 3.2

Tabela 3.2 Características do sensor LM150 da Banner.

|                    | LM150          |
|--------------------|----------------|
| Gama de medição    | 50 a 150 mm    |
| Dimensões do laser | 0,77 x 0,31 mm |
| Repetibilidade     | $\pm 0,002$ mm |
| Tempo de aquisição | 0,25/1/2/5 ms  |

Como é possível ver, este equipamento tem uma repetibilidade de  $\pm 0,002$  mm, e tempos de aquisição bastante mais baixos que os do sensor anteriormente apresentado. Este fator deve-se ao facto do campo de visão deste ser inferior, permitindo uma melhor e mais rápida medição.

Tal como o anterior, este sensor funciona por triangulação. No entanto, neste caso pode ser possível a utilização de um protocolo de comunicação IO-Link, para a obtenção das medições.

Este tipo de comunicação série aberta (IEC 61131-9) permite integrar dispositivos de entrada/saída (I/O), possibilitando a troca de informação entre sensores e atuadores com os respetivos controladores (Banner, 2017).

### 3.5.1.3 Sensor laser IL-300/600, da Keyence

Outros sensores laser de distância estudados foram os sensores analógicos da marca Keyence, IL-300 e IL-600. A Figura 3.12 pretende representar um destes sensores.



Figura 3.12 Sensor laser da Keyence.

Ambos os sensores são da série IL, caracterizada pelo baixo custo de soluções e elevado desempenho para diferentes tipos de materiais, como o caso da borracha preta. Na Tabela 3.3 são apresentadas algumas das características mais relevantes dos sensores IL-300 e IL-600.

Tabela 3.3 Características sensores da série IL da Keyence (Keyence, 2019).

|                    | IL-300        | IL-600        |
|--------------------|---------------|---------------|
| Gama de medição    | 160 a 450mm   | 200 a 1000mm  |
| Diâmetro de laser  | 0,5mm         | 1,6mm         |
| Repetibilidade     | 0,03 mm       | 0,05 $\mu$ m  |
| Tempo de aquisição | 0,33/1/2/5 ms | 0,33/1/2/5 ms |

Como é possível verificar, estes sensores têm melhores características para o sistema a desenvolver do que os apresentados anteriormente, uma vez que têm, para uma gama de medição até 1m, tempos de aquisição mais baixos e melhor repetibilidade.

Os diferentes tempos de aquisição (0,33/1/2/5ms) ao serem inferiores permitem que o sistema demore menos tempo a recolher todos os dados necessários, diminuindo consideravelmente o tempo de ciclo do sistema. A repetibilidade de 30 ou 50  $\mu$ m indica que o sensor garante medições muito consistentes ao longo do tempo para as mesmas condições de medição. Esta característica, tal como estudado anteriormente, é essencial para que sejam cumpridos os objetivos deste projeto.

Ambos os sensores apresentam boas características, diferido apenas no alcance de cada um e, consequentemente, no seu preço. O sensor IL-600, como apresenta elevada precisão repetível no tempo, a distâncias grandes, tem um preço bastante superior ao IL-300, característica que terá muita importância na escolha de um sensor para o projeto.

O sensor IL-300, tem um campo de visão inferior. No entanto, tal como o sensor LM150, o seu preço é bastante baixo, comparativamente com o IL-600. Este tem um custo de, aproximadamente, 4000€ e os restantes sensores têm um custo inferior a 1000€. A sua repetibilidade é inferior, portanto poderá ser também uma solução para a medição.

#### 3.5.1.4 Câmara de visão 3D TriSpectorP1000, da Sick

A câmara de visão analisada foi a TriSpector1000 da Sick. Esta é composta por um laser e uma câmara, que permite inspeção 3D de objetos em movimento e análise de imagem com elevada resolução (700 pixel/polegada).

Existem três modelos desta série sendo que, para esta dissertação, a câmara escolhida foi a TriSpector1030. A Figura 3.13 apresenta os três modelos referidos.



Figura 3.13 Câmaras de visão 3D da Sick.

Este equipamento tem uma elevada resolução, capacidade de processamento e análise de imagens 3D. Para a produção destas imagens, o TriSpector1000 utiliza triangulação laser no objeto. Através da incidência de um feixe laser no objeto e da sua posterior reflexão, a câmara de visão adquire uma imagem correspondente à linha laser incidida. Assim, através do movimento do objeto são adquiridas diferentes imagens que, juntas, permitem criar uma imagem 3D.

De seguida, na Tabela 3.4, são apresentadas algumas das principais características da câmara em estudo.

Tabela 3.4 Características da câmara de visão 3D da Sick (Sick, 2019).

|                     | TriSpector1030                  |
|---------------------|---------------------------------|
| Gama de medição     | 141 mm a 541mm                  |
| Dimensão do laser   | 330 mm a uma distância de 541mm |
| Resolução de imagem | 700 pixel/polegada              |
| Tempo de aquisição  | 2000 perfis/s                   |

Pela análise da Tabela 3.4, é possível constatar que, em comparação com os sensores laser de distância anteriormente apresentados, as câmaras de visão têm melhor resolução com menores tempos de aquisição. Tal irá permitir uma planificação mais pormenorizada e realista do interior do pneu, num menor tempo de ciclo. Este tempo reduzido também é explicado pelo tamanho do feixe laser que, para a distância máxima admitida, é de 330mm de comprimento.

Para uma melhor compreensão das dimensões do laser e como estas variam com a distância do sensor ao objeto, está representado na Figura 3.14 um esquema da sua gama de visão.

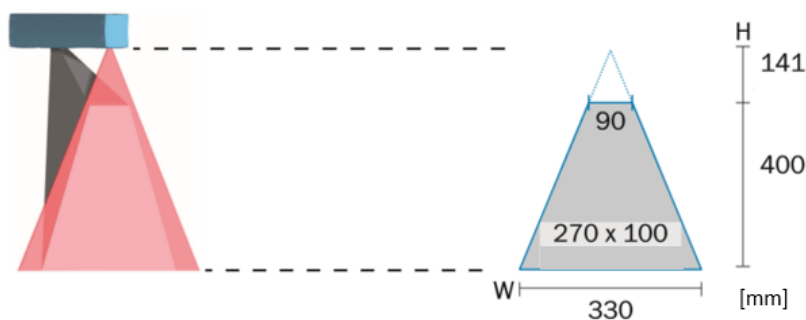


Figura 3.14 Esquema representativo do campo de visão da câmara 3D da Sick.

## 4 Equipamento e ambiente de programação

Este capítulo pretende apresentar os principais equipamentos utilizados para o desenvolvimento de uma solução para o sistema, de forma a que esta corresponda aos objetivos delineados. Assim, é feita uma descrição técnica e de funcionamento de cada componente. Neste capítulo são também apresentados o ambiente de programação e a rede industrial que permite a comunicação entre os equipamentos.

### 4.1 Autómato

Numa primeira fase é essencial definir qual o equipamento responsável pela comunicação e controlo do sistema de movimentação do pneu, do sensor e, por fim, qual a interface (HMI) a utilizada.

Foi, desde logo, determinado que seria um PLC (*Programmable Logic Controller*) o elemento central de todos os componentes, de forma a que o controlo do sistema seja centralizado. Assim, o controlo de movimento do pneu, garantido pelos motores da ferramenta da cabine de pintura, o controlo lógico do sensor e a relação com a HMI são assegurados diretamente pelo PLC.

Para a escolha deste controlador, foram analisados diversos fatores determinantes, como:

- Marca;
- Compatibilidade com todos os restantes equipamentos e a aplicação informática;
- Arquitetura do sistema;
- Desempenho;
- Linguagens de programação;
- Funções de controlo de movimento.

O sistema a desenvolver, será integrado numa cabine de pintura já desenvolvida, por isso o controlador deverá ser compatível com todo o equipamento já existente. Neste sentido, a marca será a mesma - Siemens. Esta tem à disposição diversos controladores SIMATIC, desenvolvidos para as mais distintas funções e recursos, sendo, portanto, necessário especificar o sistema, as suas características e funções para que seja encontrada uma solução de controlo.

Ora, tal como referido, o controlador será colocado no quadro de comando, juntamente com o equipamento da cabine de pintura, o que determina que o seu grau de proteção não tem necessidade de ser superior a IP20, segundo a norma IEC 60529. Esta característica, permite que não tenham de ser considerados alguns equipamentos mais sofisticados da marca.

A Siemens divide os seus controladores em três grupos de desempenho, sendo determinante o seu número de entradas e saídas. Neste caso, o nível será o mais baixo, uma vez que não serão utilizadas mais do que 50 entradas e saídas. Neste sentido também é importante desde já definir quais as linguagens de programação pretendidas, uma vez que existem diversas à disposição. Neste aspeto a Siemens disponibiliza um elevado número de linguagens nos seus controladores, tendo apenas alguns com linguagens de alto nível.

Um ponto também fundamental para a escolha do controlador é a consideração das funções de controlo de movimento a que será submetido, uma vez que tendem a aumentar o tempo de processamento dos controladores. Neste projeto, é exigido que este seja capaz de controlar o movimento de dois eixos e, consequentemente, o seu posicionamento.

Por fim, é possível, tendo por base esta análise, escolher o controlador SIMATIC S7-1500. No entanto, para esta aplicação, também seria possível utilizar um SIMATIC S7-1200, neste caso, a CPU deveria ser uma das melhores desta família, para que seja comparável com o desempenho do controlador S7-1500. A Tabela 4.1 pretende apresentar as principais diferenças entre as duas famílias de controladores da Siemens.

Tabela 4.1 Comparação entre o controlador S7-1200 e S7-1500.

|                           | S7-1200                                         | S7-1500                    |
|---------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
| Linguagens de programação | LAD, FBD e SCL,                                 | LAD, FBD, SCL, Graph e STL |
| Resposta a erros          | Apenas quando tempo de ciclo é excedido 2 vezes | OBs para deteção de erros  |
| Memória retentiva         | 10 Kbytes                                       | 88 Kbytes                  |

Concluindo, o autómato S7-1500 será a melhor escolha, pois permite uma maior flexibilidade de linguagens de programação disponíveis, vem equipado com sistemas de segurança que asseguram operações sem riscos para operadores e máquinas, e contém um número/espaco de memória maior para OBs, independentemente da função. Dependendo dos requisitos propostos, o autómato pode ser expandido com módulos de entradas/saídas para sinais analógicos ou digitais e módulos de tecnologia e comunicação.

Os componentes do SIMATIC são configurados, parametrizados e programados utilizando uma aplicação de engenharia, STEP 7. O TIA Portal (*Totally Integrated Automation*) é a ferramenta que permite estruturar hierarquicamente um projeto, de forma simples e intuitiva, que será a base para toda a programação do projeto (Berger, 2014).

#### 4.1.1 Componentes

Os principais componentes do SIMATIC S7-1500 estão representados na Figura 4.1 e são descritos abaixo:

- Fonte de alimentação - fornece a tensão interna exigida pelo controlador programável, isto é, alimenta eletronicamente os diferentes módulos que constituem a estação.
- *Central Processing Unit* (CPU) - contém o sistema operativo e o programa do utilizador que, por sua vez, é guardado no SIMATIC Memory Card, inserido na CPU. O programa é assim executado na sua memória de trabalho.

- Módulos de sinal (módulos de entrada/saída) - permitem a ligação com a máquina ou o objeto a controlar, neste caso, os diferentes sistemas de medição e os motores. Estes módulos de entrada e saída podem ser de sinal analógico ou digital, com diferentes tensões e correntes.
- Módulos tecnológicos - são responsáveis pela manipulação e pré-processamento das funções que a CPU normalmente não pode executar com rapidez suficiente, como por exemplo, a contagem de impulsos.
- Módulos de comunicação - estabelecem a conexão física e assumem a transferência de dados com a identidade a comunicar. Estes fornecem os serviços de comunicação necessários para a CPU e para o programa.

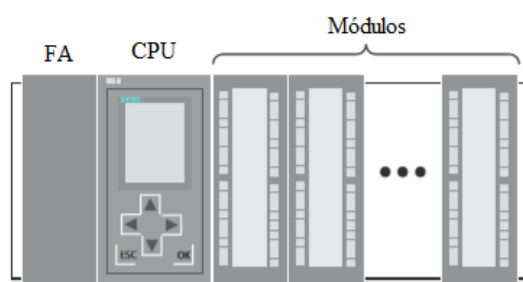


Figura 4.1 Componentes principais de um PLC.

Na presente dissertação, a fonte de alimentação utilizada foi a SITOP FLEXI 120W 24V DC da Siemens, uma CPU 1511-1PN e um módulo de entradas/saídas analógicas e digitais, SIMATIC ET 200SP IM 155-6PN ST, para estabelecer a comunicação com o sensor. Estes estão identificados na Figura 4.2 e são posteriormente analisados.



Figura 4.2 Fonte de alimentação, CPU e Módulo de sinal de entrada utilizado.

Para a escolha destes equipamentos foi essencial avaliar o sistema de aquisição e definir o que seria necessário para a sua programação. Como referido anteriormente, para o controlo do sistema é fundamental um PLC, com os módulos necessários para a aplicação em questão. Neste caso, será utilizado, para além da CPU, um módulo de entradas analógicas, visto que o sensor recolhe valores de distância em tempo real.

Foi utilizado um controlador S7-1500 com uma CPU disponibilizada pela empresa, a CPU 1511-1PN. As suas características principais são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Características da CPU 1511-1 PN.

|                             |                                                             |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Alimentação                 | 24 V DC                                                     |
| Memória                     | 1,15 MB (1MB para memória de dados e 150KB para o programa) |
| Porta de comunicação        | 2 x RJ 45 ( <i>Profinet</i> )                               |
| Tempo por operação booleana | 60 ns /instrução                                            |
| Protocolos                  | <i>Profinet</i> IO                                          |

Este PLC é um dos controladores mais básicos desta família da Siemens. No entanto, para o sistema em estudo e numa fase inicial de testes será suficiente. As principais diferenças entre este controlador e as versões mais sofisticadas da sua família, incidem no tempo de execução das OBs, número de ligações PROFINET e número de blocos.

Esta CPU contém o sistema operativo, responsável por executar o programa, localizado num cartão de memória SIMATIC e que é processado na memória de trabalho da CPU. A ligação ao sistema é centralizada ou distribuída através de comunicação *Profinet* com módulos de entrada e saída. A interface *Profinet* na CPU permite a comunicação simultânea com outros dispositivos, como controladores, HMI, dispositivos de programação e outros sistemas.

A memória disponível na CPU, neste caso, pode não ser suficiente, uma vez que é necessário guardar um elevado número de dados das medições realizadas. No entanto, através de um cartão de memória com maior capacidade é possível expandir facilmente este valor, caso necessário.

Uma das principais características a analisar no PLC é o seu tempo de execução das OBs, uma vez que, neste caso, não só a aquisição de dados no sensor terá de ser rápida como o processamento desta informação no PLC. No entanto, o tempo de ciclo é variável, dependendo do programa, das funções e blocos utilizados.

Assim, para estudar este comportamento, e sabendo que para o sistema serão controlados, pelo menos, dois eixos, foi analisada a influência do número de eixos com o tempo de corrida das OBs e o tipo de controlo necessário. Através da Tabela 4.3 e Tabela 4.4 é possível analisar o efeito provocado pelo controlo de movimento e posição no tempo de corrida das OBs, que por sua vez influencia o tempo de ciclo do PLC.

Tabela 4.3 Tempo de corrida das OBs influenciado pelo controlo de movimento (Siemens AG, 2014).

| Controlo de movimento | Tempo de corrida da OB servo | Tempo de corrida da OB IPO | Somatório do tempo de corrida das OBs |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1 eixo                | 0,15 ms                      | 0,31 ms                    | 0,46 ms                               |
| 2 eixos               | 0,18 ms                      | 0,47 ms                    | 0,65 ms                               |

Tabela 4.4 Tempo de corrida das OBs influenciado pelo controlo de posição (Siemens AG, 2014).

| Controlo de posição | Tempo de corrida da OB servo | Tempo de corrida da OB IPO | Somatório do tempo de corrida das OBs |
|---------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1 eixo              | 0,22 ms                      | 0,47 ms                    | 0,68 ms                               |
| 2 eixos             | 0,27 ms                      | 0,71 ms                    | 0,98 ms                               |

Pela análise das tabelas, é possível afirmar que o tempo para cada OB aumenta com o número de eixos. No entanto, estes valores são baixos, comparativamente com o tempo de ciclo que será obtido no controlo do sistema de medição. Como será estudado no próximo capítulo, o tempo de processamento dos valores analógicos, obtidos pelos sensores, é de 240 ms. Desta forma, é possível afirmar que o tempo de corrida das OBs não tem um impacto elevado no tempo de ciclo. Assim, a utilização das funções que permitem este controlo na aplicação informática TIA Portal, não serão prejudiciais para o tempo de aquisição e processamento dos dados adquiridos pelo sistema de aquisição.

Relativamente à estação remota ET 200SP IM155-6PN ST, esta contém um módulo de entradas analógicas que permite a comunicação com o sensor e uma entrada *Profinet* que permite a ligação ao PLC. Assim, a informação adquirida no sensor pode ser armazenada e analisada no PLC.

Inicialmente, foi estudado um módulo de entradas analógicas, AI 8xU/I/RTD/TC ST, que seria acoplado à CPU 1511-1PN escolhida. Esta também seria uma solução para a comunicação entre PLC e sensor, no entanto, as estações ET 200SP têm diversas vantagens em comparação com este tipo de solução:

- Fácil funcionamento;
- Módulo de alimentação integrado;
- Design compacto.

Esta estação permite ter, não só um módulo de entradas analógicas, como também entradas digitais, o que será bastante útil para o projeto, com uma ocupação otimizada do espaço. Outra grande vantagem destes equipamentos é que o módulo de alimentação já vem integrado no sistema, o que permite que este esteja longe da CPU. Ora, como o sistema a desenvolver será integrado num já existente, esta característica poderá ser essencial. Algumas das características deste equipamento são apresentadas na Tabela 4.5 (Siemens S.A., 2019).

Tabela 4.5 Características do módulo ET 200SP (Siemens, 2017).

|                      |                                           |
|----------------------|-------------------------------------------|
| Entradas             | 4 entradas analógicas/8 entradas digitais |
| Protocolo            | <i>Profinet</i> IO                        |
| Porta de comunicação | 2 x RJ 45 ( <i>Profinet</i> )             |
| Transmissão de dados | 100 Mbit/s                                |

#### 4.1.2 Funcionamento

A execução de um programa num PLC desenrola-se de forma cíclica. Primeiramente são lidos e guardados os valores das entradas, posteriormente é executado o programa, que é composto por diversas instruções lógicas que são executadas sequencialmente. Por fim, são atualizados os valores das saídas. O ciclo volta ao princípio, após a atualização das saídas. O tempo necessário para realizar todas estas etapas, é designado por tempo de ciclo. Este funcionamento está representado na Figura 4.3.

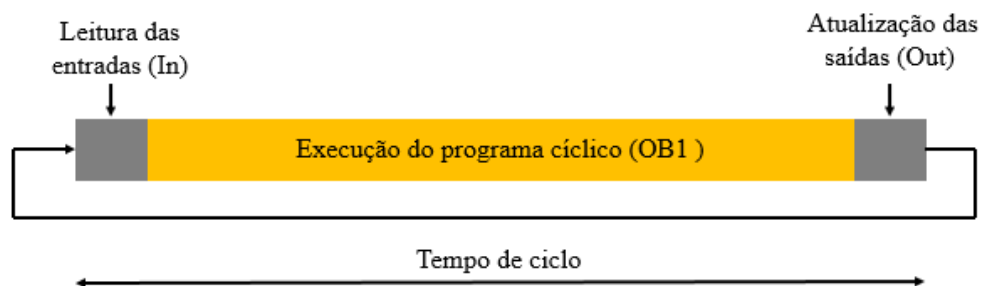


Figura 4.3 Modelo de execução cíclica de um PLC.

Este ciclo pode ser interrompido por outros programas, como OBs de interrupção (OB30 até OB38), ou OBs para controlo de movimento (OB91 e OB92). Estes permitem impor prioridades ao sistema, podendo, por exemplo, ser executados sempre no mesmo espaço de tempo ou com prioridade em relação a outro programa, em caso de emergência, por exemplo. Assim, o tempo de ciclo é influenciado pelas interrupções impostas ao programa. A Figura 4.4 pretende representar o modelo de execução cíclica de um programa com interrupções sucessivas com um intervalo de tempo constante (Siemens AG, 2014).

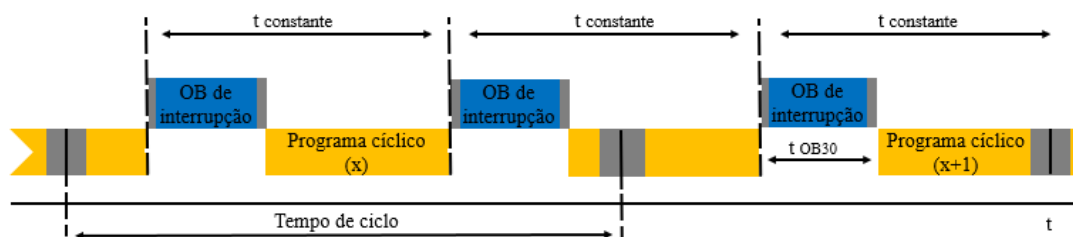


Figura 4.4 Modelo de execução cíclica de um PLC com interrupções.

A utilização de interrupções será interessante neste projeto, uma vez que se pretende ler as entradas sempre a intervalos de tempo constantes, para que não se falhe a deteção de nenhuma emenda. Desta forma, é possível controlar a velocidade linear e de rotação do pneu para que a medição e posterior deteção de uma emenda seja feita segundo os requisitos pretendidos, assim como a aquisição do seu perfil.

O tempo de ciclo é também bastante importante, visto que o objetivo é recolher os dados de medição do sensor de uma forma rápida, uma vez que o sistema se encontra em movimento. Contudo, este tempo depende não só do programa (nº de instruções a executar), como da capacidade do CPU (nº de instruções executadas por unidade de tempo).

## 4.2 Ambiente de programação: TIA Portal

O *Totally Integrated Automation Portal* (TIA Portal) é uma aplicação informática desenvolvida pela Siemens, que pretende realizar a configuração e a programação da maioria dos seus equipamentos numa única plataforma de trabalho. Este permite diminuir o tempo de projeto, através de simulações e monitorização *online*, aumentar a produtividade e flexibilidade do sistema a desenvolver, visto conter funções adicionais tanto de diagnóstico como de gestão. Esta foi a aplicação informática escolhida para a programação do autómato, S7-1500, permitindo assim um avanço para a Indústria 4.0.

Este ambiente de programação permite o desenvolvimento do programa através de cinco linguagens alternativas, *Ladder Logic* (LAD), *Function Block Diagram* (FBD), *Structured Control Language* (SCL), *Statement List* (STL) e *Sequential Control* (GRAPH).

O programa pode ainda ser dividido em diferentes blocos, conforme necessário. Assim, um bloco é uma parte de um programa, sendo definido por uma função, estrutura ou aplicação. A Figura 4.5 pretende representar esta organização na programação.

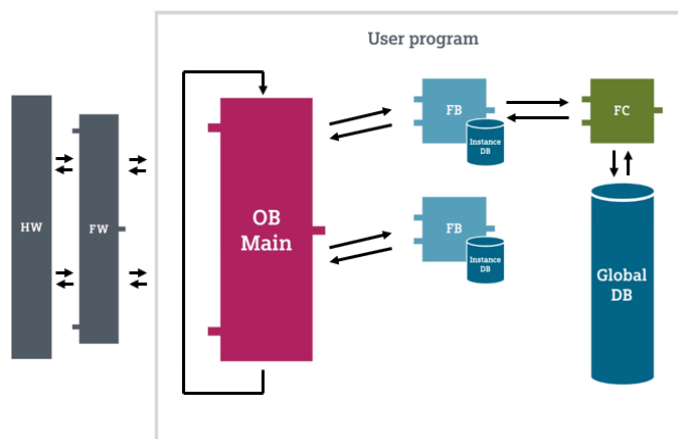


Figura 4.5 Representação dos blocos utilizados na programação (Siemens AG, 2018).

Seguidamente são descritos todos os blocos disponíveis no TIA Portal:

- **Blocos de organização (OB):** são a interface entre o sistema operativo e o programa desenvolvido para a aplicação. O sistema operativo da CPU chama os OB quando ocorrem eventos específicos, interrupções de *hardware* ou interrupções cíclicas. O programa principal, normalmente, está localizado no bloco de organização OB1.
- **Blocos de funções (FB):** fazem parte do programa e possuem memória que permite armazenar determinadas rotinas, que são, posteriormente, chamadas nas OBs. Quando estes blocos são chamados, criam-se blocos de dados, que permitem o armazenamento dos seus dados. Estes dois blocos permitem ao STEP7 a realização de um programa estruturado e modular, dividindo assim o programa em subsistemas.
- **Funções (FC):** são usadas para programar funções que são recorrentes no programa. Estas não armazenam informação e não possuem blocos de dados atribuídos, ao contrário dos blocos de funções.
- **Blocos de dados (DB):** contêm dados do programa, podendo ser gerados como blocos de dados globais ou dados de instância. Os dados globais permitem armazenar qualquer tipo de informação, os dados de instância estão atribuídos a um bloco de função e este é que define os dados que pretende (Berger, 2014).

O número de blocos de organização é definido pelo sistema operativo e os blocos que os constituem podem ser atribuídos conforme desejado dentro do intervalo de memória permitido.

### 4.3 Rede industrial: *Profinet*

A rede industrial utilizada neste projeto é a *Profinet*, uma vez que todos os componentes a utilizar no projeto a suportam, permitindo assim uma comunicação, de forma simples e rápida.

A rede *Profinet* é a primeira *Industrial Ethernet Standard* (IEEE802.3) integrada para automação. Esta utiliza as vantagens da *Ethernet* e dos protocolos TCP/IP para comunicação aberta entre diversos equipamentos de uma empresa, desde os níveis mais baixos de processo até aos níveis altos de gestão na pirâmide de automação. O seu meio de transmissão pode variar desde redes *wireless*, cabos de fibra ótica e cablagem RS485, o que lhe confere elevada flexibilidade de utilização. Dispõe também de diversos perfis de aplicação, como *PROFIsafe* para sistemas de segurança e *PROFdrive* para controlo de movimento.

É possível dividir este tipo de comunicação em três variantes:

- *Profinet* IO RT;
- *Profinet* IO IRT;
- *Profinet* CBA.

Estas diferem no tempo de processamento das aplicações. Este é o tempo necessário para enviar uma mensagem de um dispositivo para outro, sem que ocorram erros, tal como é possível ver na Figura 4.6 (Brown, 2013).

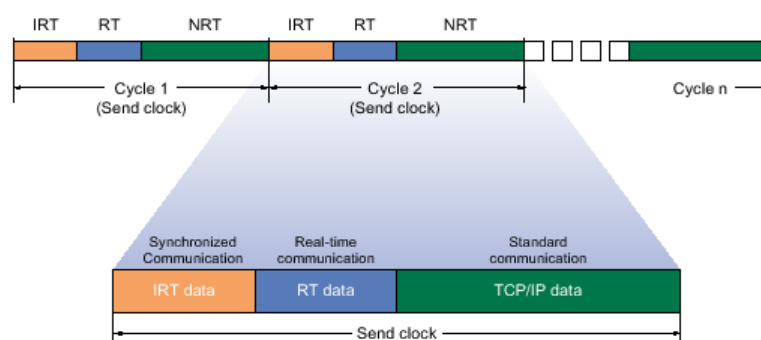


Figura 4.6 Intervalos de tempo dos diferentes ciclos de comunicação *Profinet*.

#### 4.3.1 *Profinet* IO RT (Real Time)

A rede *Profinet* IO RT é normalmente utilizada para interligar o PLC e os dispositivos de campo, para a leitura e escrita das suas entradas/saídas (I/O). Esta comunicação, realizada em tempo real, é rápida e tem capacidade para vários intervenientes, dispensando assim protocolos TCP/IP. O envio de informação é realizado de forma cíclica, num tempo fixo, sendo possível controlar o tempo máximo de chegada de um telegrama (informação a transmitir).

Neste projeto, a ligação entre o PLC, os módulos de sinal e os *drivers* será através deste tipo de comunicação. No entanto, para o controlo de movimento, a comunicação mais indicada é a IRT, isto é, comunicação isócrona.

#### 4.3.2 *Profinet* IO IRT (Isochronous Real Time)

A comunicação *Profinet* IO IRT, tal como a anterior, é realizada em tempo real. No entanto, diferencia-se pelo sincronismo na troca de dados: comunicação isócrona. Assim, neste caso, as entradas e saídas são atualizadas ao mesmo tempo e o sincronismo inicial é garantido por um único sistema de relógio, que referencia todos os intervenientes da comunicação (relógio mestre).

Este tipo de comunicação é especialmente indicado para controlo de movimento, sincronização de eixos e troca de dados a uma velocidade elevada, como apropriado para o caso em estudo. No entanto, para realizar a sincronização do tempo de ciclo é necessário *hardware* específico e altamente preciso, como microprocessadores ERTEC (*Enhanced Real Time Ethernet Controller*), tanto no PLC como nos módulos intervenientes.

Para uma comunicação de elevada performance é imprescindível, no caso dos equipamentos *Siemens*, utilizar CPUs S7-1500. Portanto, neste caso, seria possível utilizar este tipo de comunicação. No entanto, tal como referido, os módulos utilizados deverão também ser indicados para este tipo de comunicação, o que neste caso não se verifica. O módulo ET200SP IM155-6PN ST permite este tipo de comunicação, no entanto, o módulo de entradas analógicas (6EES7134-6GD01-0BA1) não o permite. Por esta mesma razão, não foi utilizada esta comunicação no projeto.

#### 4.3.3 Profinet CBA (Component Based Network)

Por último, a comunicação entre equipamentos inteligentes, como por exemplo, PC, HMI e PLC é garantida por *Profinet* CBA. Esta permite a ligação, não em tempo real, com múltiplos equipamentos, com uma elevada flexibilidade, e a configuração gráfica da comunicação entre módulos tecnológicos. Assim, este tipo de comunicação será utilizado entre o computador e o PLC e entre este e a HMI.

Por fim, na Figura 4.7, estão representados todos os equipamentos utilizados no projeto bem como a comunicação estabelecida entre eles.

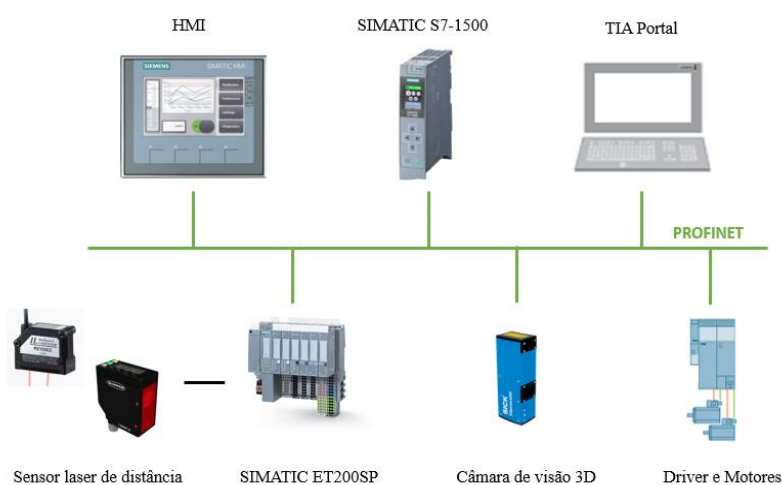


Figura 4.7 Esquema de comunicação industrial utilizada no projeto.

A comunicação entre o sensor LE550IQ da Banner e o módulo de entradas analógicas, assim como as restantes ligações dos equipamentos utilizados e testados, podem ser consultadas no Anexo C. Uma vez que não será possível testar o presente projeto na cabine de pintura, os esquemas elétricos foram colocados neste anexo, para que, posteriormente, seja facilitada a sua montagem e comunicação.

#### 4.4 Drive Sinamics S120

Neste projeto, para o controlo de movimento do pneu, é necessário controlar dois eixos da ferramenta de transporte: rotação e movimento linear (subida/descida). Assim, é indispensável a utilização de um driver responsável pela transmissão de potência elétrica aos motores.

Uma vez que já existe todo o equipamento na cabine de pintura, apenas serão apresentadas as suas principais características e funcionamento. Posteriormente será descrito o seu controlo no ambiente de programação.

O *drive* Sinamics S120 é normalmente constituído por:

- Unidade de controlo (*Control unit*);
- Módulo do motor (*Motor module*);
- Módulo de linha (*Line module*).

A Figura 4.8 permite visualizar os componentes referido anteriormente, numa visão geral do *driver* S120.

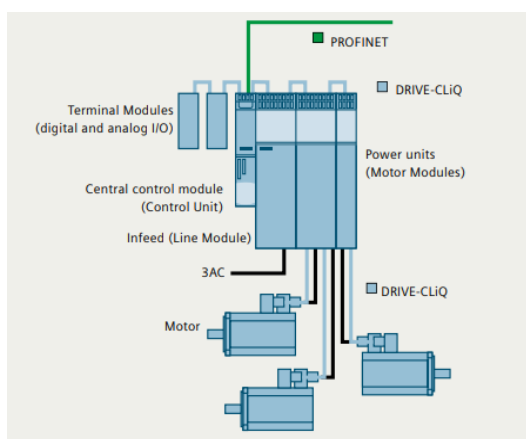


Figura 4.8 Driver S120 e suas ligações (Siemens Industry, 2017).

Neste projeto, o *drive* é composto pela unidade de controlo 6SL3040-1MA01-0AA0, que comunica diretamente com o módulo do motor, via DRIVE-CLiQ. Esta unidade representa o controlo central de todo o sistema, tendo como função a comunicação e controlo da tensão que é transmitida ao motor, isto é, de todas as funções do *driver*, como funções de posicionamento, por exemplo.

O módulo de potência fornece tensão contínua ao módulo do motor, que, por sua vez transforma esta na tensão alternada que é fornecida ao motor. Neste projeto o módulo tem de ser duplo, para que seja possível alimentar os dois motores.

Ora, tal como mencionado, estes dois motores estão colocados na ferramenta de transporte da cabine de pintura e são do modelo 1FK7042.

Estes motores compactos, acoplados ao *drive* S120, permitem criar um sistema de elevada potência e diferentes funcionalidades:

- Alta capacidade de sobrecarga, sem necessidade de refrigeração externa, sendo o calor dissipado nas paredes do motor;
- Resposta dinâmica elevada graças ao baixo momento de inércia no rotor;
- Propriedades de controlo em malha fechada robustas para momentos de inércia de carga elevada ou variável (Siemens AG, 2011).

#### 4.5 Interface TP 900 Comfort

Para que, posteriormente, seja possível visualizar e interagir com o sistema, foi utilizado um painel tátil TP 900 Comfort (HMI- *Human Machine Interface*). Este é representado na Figura 4.9.



Figura 4.9 Painel tátil TP 900 (Siemens AG, 2015).

As suas principais características são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Principais características da interface TP 900 (Siemens AG, 2012).

|                          |                                           |
|--------------------------|-------------------------------------------|
| Tamanho do ecrã          | 9" ecrã tátil                             |
| Resolução do ecrã        | 800 x 480 px                              |
| Número de cores          | 16M cores                                 |
| Alimentação              | 0,85 A @ 24V DC                           |
| Memória de armazenamento | 12 MB e 2 entradas para cartão de memória |
| Protocolos               | <i>Profinet e Profibus</i>                |
| Portas de comunicação    | 2 x <i>Profinet</i> e 2 x USB             |

O painel escolhido foi o TP1200, uma vez que, para demonstrar o perfil do pneu, seria necessário um equipamento com um ecrã suficientemente grande e com elevada resolução, para que se conseguisse visualizar com clareza os resultados. No entanto, como apenas estaria disponível a interface TP900 *Comfort*, foi esta a utilizada no projeto.

A comunicação entre este equipamento e o PLC é garantido, mais uma vez, pelo protocolo *Profinet*. O SIMATIC HMI *Comfort* tem um protocolo *PROFenergy*. Este permite que o ecrã seja desligado por breves intervalos de tempo, caso não esteja a ser utilizado, economizando assim bastante energia. No caso de falha de corrente, este permite finalizar os processos ativos, garantindo a manutenção de todos os dados. Ora, isto é conseguido porque o painel tem a capacidade de armazenar, temporariamente, energia (Siemens AG, 2015).

## 5 Ensaios realizados e resultados obtidos

Neste capítulo, são realizados ensaios com distintos sistemas de medição, para que seja estudado o seu desempenho na presença de uma emenda e a sua capacidade para medir o perfil de um pneu. A principal diferença entre estes sistemas traduz-se na sua repetibilidade, gama de medição, tamanho do laser projetado e o seu custo. Desta forma, pretende-se analisar a sua influência na medição do interior do pneu e consequente identificação do perfil e detecção de emendas.

Assim, são descritos todos os ensaios realizados, os seus resultados e conclusões, de forma a definir um sistema de medição a utilizar no projeto. Após a determinação de uma solução de medição será feita uma análise temporal ao processo.

### 5.1 Especificação dos ensaios com sensores

Os ensaios realizados para estudar a capacidade dos sistemas de medição, consistiram em colocar estes equipamentos no interior de um pneu “em verde”, fixos a uma estrutura. O pneu, por sua vez, está suspenso através de uma ferramenta acoplada a um robô industrial, que é responsável pelo seu movimento linear e de rotação -Figura 5.1.



Figura 5.1 Equipamento utilizado nos ensaios realizados.

Os pneus utilizados, nestes ensaios, não são pneus agrícolas, uma vez que não havia nenhum disponível na empresa. Portanto, foram utilizados pneus ligeiros “em verde”. Estes, tal como

os agrícolas, têm curvaturas bastante acentuadas, características de um pneu “em verde”. Portanto, as medições que são feitas para traçar o perfil do pneu terão um padrão semelhante caso se utilizasse um pneu agrícola.

As sobre-espessuras de um pneu ligeiro são mais pequenas do que as existentes num pneu agrícola, isto é, têm uma menor sobre-espessura e largura. Neste caso, uma vez que se pretende estudar o desempenho e a capacidade dos sistemas de medição, este pormenor é bastante interessante, visto que, caso seja possível detetar uma emenda nestes pneus, é certamente detetada uma emenda num pneu agrícola. Desta forma, será possível garantir o funcionamento do sistema escolhido, tanto em pneus agrícolas como em pneus ligeiros, tornando a solução mais flexível.

O movimento do pneu, tal como referido, será garantido por um robô industrial, uma vez que não é possível testar com a ferramenta da cabine de pintura, que garante o movimento do pneu. Acoplada ao robô, está uma ferramenta que suporta o pneu, idêntica à utilizada na máquina.

### 5.1.1 Movimento do pneu

Para realizar os diversos movimentos, foi necessário utilizar um robô disponibilizado pela empresa, o KUKA KR 240 R2700 *prime*. Para garantir que este seja suficiente para os ensaios pretendidos, é necessário calcular a sua resolução, isto é, verificar se este permite velocidades suficientemente baixas para que seja possível medir uma emenda e traçar o perfil do pneu.

As equações seguintes traduzem estes cálculos, sabendo que o diâmetro exterior do pneu, com maiores dimensões, a utilizar, é de 595 mm:

$$\text{Perímetro do pneu} = \pi * \text{Diâmetro} = 1869 \text{ mm}$$

$$\frac{360^\circ}{\theta} = \frac{1869 \text{ mm}}{1 \text{ mm}}$$

$$\theta = 0,2^\circ$$

O valor de 0,2° indica-nos a resolução mínima que é necessária para que o robô se desloque 1mm. Para que esse mm seja identificado com rigor será necessária uma resolução pelo menos 10x melhor, ao que corresponde uma resolução de 0,02°.

A resolução dos eixos do robô KUKA, está compreendida entre 0,001° e 0,005°. Portanto, comparando com o valor necessário, é possível afirmar que este pode ser utilizado para realizar os ensaios deste projeto. O ângulo máximo de rotação permitido pelo robô no seu eixo de rotação é de 350° e a sua velocidade é 206°/s.

Relativamente ao movimento linear, este robô permite uma deslocação mínima de 1mm/s. Este valor é suficiente para a medição do perfil do pneu e das suas “emendas horizontais”, tal como será comprovado de seguida.

### 5.1.2 Pneus “em verde” utilizados

Para estes ensaios foram utilizados dois pneus ligeiros “em verde”. O pneu da Figura 5.2 a) foi utilizado para os ensaios onde se pretendia recriar o perfil do pneu, porque este contém curvaturas mais acentuadas, tal como os pneus agrícolas “em verde”. O pneu da Figura 5.2 b)

foi utilizado, porque a sua emenda estava bem definida, melhor do que a existente no pneu anterior. Tal deve-se ao facto do primeiro pneu já se encontrar parcialmente vulcanizado, devido ao seu tempo de exposição ao ar.



Figura 5.2 Pneus “em verde” utilizados nos ensaios a) de perfilagem e b) de localização da emenda.

O pneu utilizado para os ensaios do perfil tem, aproximadamente, 290 mm de altura e 595mm de diâmetro. É importante referir que este valor é aproximado porque, sendo o pneu “em verde” e estando suspenso na ferramenta, é de esperar que o seu diâmetro e altura variem um pouco. A emenda do segundo pneu tem, aproximadamente, 2mm de sobre-espessura e 10mm de largura. Este valor é inferior ao esperado para uma sobre-espessura de um pneu agrícola. Portanto, se o sistema de medição for capaz de localizar esta emenda, também será indicado para pneus agrícolas.

### 5.1.3 Requisitos de controlo

Para realizar estes ensaios foi necessário criar diferentes ferramentas para o tratamento dos dados (medições) adquiridos.

#### Sinais Analógicos

Para a aquisição das medições, no ambiente de programação, de um sistema de medição é necessário criar instruções específicas na aplicação informática TIA Portal, uma vez que os sinais obtidos são do tipo analógico. Estes sinais, ao contrário dos digitais que apenas têm dois estados lógicos (0 e 1), registam os valores possíveis dentro de uma determinada gama, ao longo do tempo. Para o sistema de medição da Banner LE550IQ, por exemplo, a gama de medição varia entre 100 e 1000mm.

Os valores medidos no sensor são convertidos em sinais de tensão ou corrente, através de um transdutor, de forma a serem transmitidos. Neste caso, estes são convertidos para valores entre 4 e 20mA, isto é, uma medição de 100mm corresponde a uma corrente de 4mA, e uma medição de 1000mm a 20mA.

Primeiramente, foi necessário normalizar o valor analógico lido num valor numérico (*floating point number*), para que estes sejam processados no PLC. Para tal, é necessário definir a que valores digitais corresponde o intervalo de 4 a 20mA no módulo de entradas analógicas e PLC utilizado. Depois de analisar as tabelas de valores analógicos do PLC, que podem ser consultadas no Anexo A, o valor decimal correspondente a 4mA é 0 e o máximo, correspondente a 20mA, é 27648 (15 bit).

Na Figura 5.3, é possível analisar o bloco que permite a normalização do valor numérico lido no sensor.

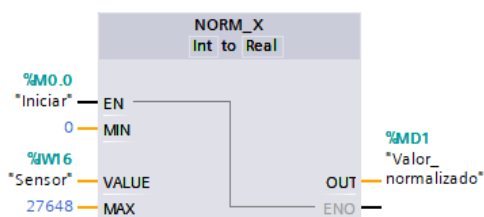


Figura 5.3 Bloco de normalização dos valores medidos.

Posteriormente é necessário converter estes valores para a escala utilizada no sensor, isto é, obter a distância, em milímetros, lida por este. A Figura 5.4 apresenta o bloco utilizado para fazer esta conversão.

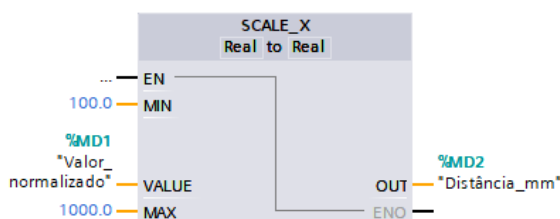


Figura 5.4 Bloco para conversão de escala.

Este procedimento foi seguido para todos os sensores laser de distância, permitindo uma leitura dos dados obtidos de 10 em 10ms, uma vez que foi gerado no programa uma OB de interrupção.

### Deteção de emendas

No subcapítulo 3.5 foi descrito o funcionamento espectável de um sistema de medição e qual deveria ser o seu comportamento na presença de uma emenda. Ora, tendo por base esta forma de medição e os resultados obtidos, foi criado um código lógico que permitisse detetar uma emenda.

Esta deteção é feita comparando dois valores medidos consecutivamente, uma vez que, na presença de uma sobre-espessura, existe uma diminuição abrupta da distância entre o sensor e a superfície, encontrando-se esta mais próxima do sensor. Assim, tal como representado na Figura 5.5, existe uma diferença entre valores medidos, consecutivamente, superior às restantes diferenças entre valores, ao longo da superfície. O sentido positivo do movimento do pneu será o representado na figura abaixo.

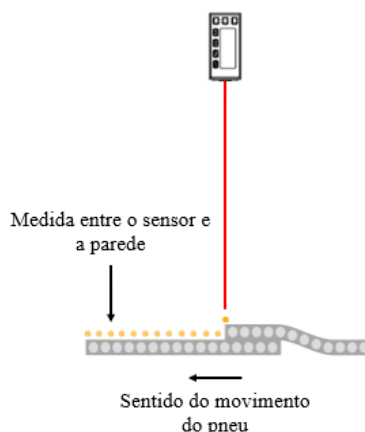


Figura 5.5 Representação da diferença entre medições consecutivas.

Assim, é esperado que para uma volta completa do pneu, o sensor meça continuamente a distância entre este e a superfície interior do pneu – valores que devem variar de forma cíclica, dada a irregularidade da forma do pneu. Na presença de uma emenda o padrão de evolução da medição deve ser algo idêntico ao representado na Figura 5.5.

Tal como referido, para a detecção de uma emenda é necessário calcular a diferença entre duas medições consecutivas ao longo do tempo, isto é, a derivada entre dois pontos consecutivos. De forma a não perder qualquer medição, foi gerado um *Cyclic Interrupt* de 10ms no programa. Portanto, a cada 10ms a medição lida no sensor é guardada e analisada. Desta forma o intervalo de tempo entre duas medições consecutivas, ao longo de um ensaio, é sempre o mesmo -10ms. Assim, para o cálculo da derivada é necessário, apenas, calcular a diferença entre duas medições consecutivas, visto que o tempo é uma constante conhecida. Quando este valor de diferença é superior a um valor de referência, que considera a dimensão da sobre-espessura e a repetibilidade do sistema de medição, será detetada uma emenda. Esta detecção é representada por um pulso positivo.

Por exemplo, o sensor LE550IQ da Banner tem uma repetibilidade de, aproximadamente,  $\pm 0,5\text{mm}$ , caso a distância ao objeto seja inferior a 600mm e o seu tempo de resposta seja 5ms (*Standard*). Neste caso, dado que a espessura da emenda a detetar tem 2mm, o valor de referência, que irá permitir a detecção da emenda, é de 1,5mm. Assim, é de esperar que, quando a diferença entre duas medições consecutivas é superior ou igual a este valor, um pulso é gerado, como representação da detecção da emenda.

#### 5.1.4 Identificação do perfil e medição de uma emenda

Para ser possível traçar o perfil do pneu em estudo, através das medições dos diferentes sistemas de medição, e detetar a sua emenda interior, foram feitos dois ensaios distintos, que correspondem a diferentes rotinas para o robô:

- Descer o pneu, estando o sistema de medição no seu centro, a uma velocidade constante, para que este meça os pontos necessários para traçar o perfil do pneu;
- Descer o pneu até que o sistema de medição esteja a meio da sua altura, aproximar o pneu do sistema (conforme a gama de medição) e, por fim, rodar 360° para que sejam feitas as medições necessárias para detetar a emenda interior.

No primeiro ensaio é assim traçado o perfil do pneu “em verde” (ver Figura 5.6 a). Este permitiu estudar o tempo de aquisição do sistema de medição, analisar a influência da repetibilidade e da velocidade do pneu na aquisição de valores. Através deste ensaio pretende-se calcular a altura do pneu, do seu piso e fazer uma caracterização das paredes laterais, quando o pneu está suspenso na ferramenta. Esta característica, tal como referida ao longo do documento, é fundamental para o processo de pintura, uma vez que, até então, não era conhecida a variação sofrida no pneu, quando este está suspenso.

O sensor, neste ensaio, inicia e termina o seu funcionamento fora dos limites do pneu, tal como é visível na Figura 5.6 b). Esta condição permite garantir a medição de todo o perfil do pneu e guardar apenas as medições da sua superfície, uma vez que estas apenas são guardadas quando o sistema obtém valores dentro da sua gama de medição.



Figura 5.6 a) Condições para obter o perfil de um pneu “em verde” b) Posicionamento inicial dos sensores.

A velocidade imposta ao pneu, foi calculada de acordo com o desempenho de cada sistema de medição. No entanto, foram utilizadas diversas velocidades, para que fosse analisado o comportamento do sistema em condições diferentes:

$$Velocidade\ do\ pneu = \frac{Distância\ entre\ medições}{Tempo\ de\ aquisição}$$

A velocidade do pneu varia com a distância que desejamos ter entre medições e o tempo de aquisição do sistema de medição. Relativamente à distância desejada, esta é calculada, inicialmente, de forma a que em toda a extensão onde é considerada a existência de uma variação de espessura da tela haja sempre, pelo menos, 5 medições. O tempo de aquisição dos sensores foi também estudado, uma vez que, na sua maioria, estes têm diferentes tempos de aquisição disponíveis.

Como foram utilizados pneus ligeiros, não existem “emendas horizontais”. Assim, apenas será analisada a capacidade do sensor para medir “emendas verticais”, de sobre-espessura de 2mm, no segundo ensaio.

Este segundo ensaio consistiu na rotação do pneu, a uma velocidade constante, de forma a estudar a capacidade de medição do sensor, perante uma emenda, Figura 5.7. É esperado que os valores medidos demonstrem a irregularidade da forma característica destes pneus.



Figura 5.7 Condições para a rotação do pneu “em verde”, de forma a detetar uma emenda.

O pneu a utilizar neste ensaio tem apenas uma “emenda vertical” na sua superfície interior. No entanto, é possível ver uma saliência devido, possivelmente, a um defeito provocado por uma sobreposição de uma outra tela que constitui o pneu. Porém, esta não deverá ser detetada, visto que não é uma emenda da tela superficial do pneu, Figura 5.8. Esta não tem as características descritas para a identificação de uma emenda de superfície. No entanto, em alguns casos, pode provocar alguma ambiguidade ou erro.

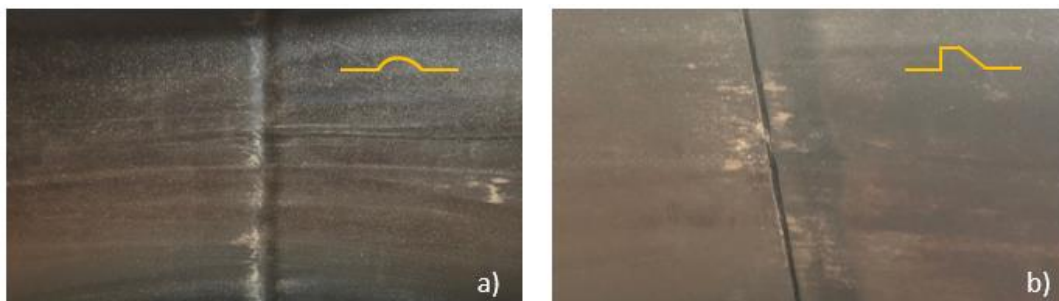


Figura 5.8 Em a) emenda interna e em b) emenda superficial do pneu "em verde" analisado.

## 5.2 Resultados obtidos

Como referido, foram estudados diversos sistemas de medição, no entanto não foi possível testar todos os apresentados no Capítulo 3. Os sistemas de medição ensaiados foram:

- Sensor laser de distância LE550IQ;
- Sensor laser de distância LM150.

O sensor LE550IQ da Banner tem uma repetibilidade entre 0 e  $\pm 1$ mm a distância até 600mm, uma gama de medição entre 100 e 1000mm e uma área laser projetada de 4,9 x 12,1mm. Por outro lado, o sensor LM150 tem uma melhor repetibilidade ( $\pm 0,002$  mm), uma menor área laser projetada (0,77 x 0,31mm), mas uma gama de medição mais pequena (50 a 150mm).

De seguida, será feita uma análise dos resultados obtidos com cada um dos sistemas testados, de forma a estudar a influências destas características no processo de identificação do perfil e deteção de emendas.

### 5.2.1 Sensor laser LE550IQ da Banner

#### ➤ Identificação do perfil do pneu

O primeiro ensaio realizado com o sensor LE550IQ da Banner, foi medir a superfície interior do pneu em estudo, por forma a identificar e recriar o seu perfil. No entanto, primeiramente, é necessário conhecer o tempo de aquisição do sensor quando o pneu se movimenta com uma velocidade linear, visto que os valores apresentados, são apenas para medições estáticas. Por conseguinte será também analisado o tempo de processamento dos valores analógicos (medições).

Após alguns ensaios realizados para avaliar o tempo de processamento do sensor, foi verificado que, qualquer que seja o tempo de aquisição imposto ao sensor (elevada, standard, média ou baixa), o tempo necessário para que fossem lidas duas medições diferentes consecutivamente é, aproximadamente, 240ms, tal como se pode ver na Figura 5.9. Ora, este valor é bastante superior ao esperado, 120x superior no caso de se impor ao sensor um tempo de aquisição de 2ms.

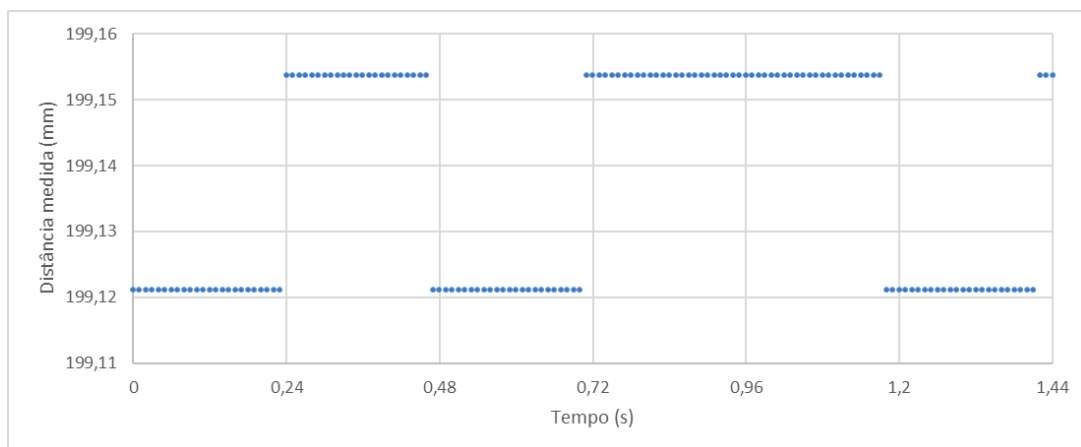


Figura 5.9 Intervalo de tempo entre medições consecutivas.

Pela figura apresentada é possível ver que, a cada 10ms é lida uma medição. No entanto, este valor medido apenas varia após um intervalo de tempo de, aproximadamente, 240ms. Este valor demonstra que o sensor não é o equipamento a limitar o tempo de processamento de uma medição. Neste caso, o tempo de ciclo do módulo de entradas analógicas, provoca um atraso na visualização de um novo valor medido.

O tempo de ciclo de um módulo de entradas analógicas, ou tempo de conversão depende:

- Constante de tempo do processamento do valor medido. Este valor é independente das configurações do módulo;
- Tempo de ciclo do barramento (*Backplane bus cycle*);
- Número de entradas analógicas disponíveis;
- Aplicação de filtros via *Smoothing*.

O tempo de conversão pode ser configurado, neste caso, para 50, 60 ou 180ms. No entanto, este tempo é dispensado para cada entrada analógica, logo, existindo quatro entradas analógicas neste módulo, este valor quadruplica. Por outro lado, as entradas não são todas iguais, portanto, caso sejam ligadas a dois fios é aconselhável o tempo de conversão de 50 ms e a quatro fios de 60ms. Ora, neste caso existe apenas uma entrada a dois fios, que será a utilizada.

As entradas analógicas não utilizadas podem ser desabilitadas. No entanto, não é do interesse da empresa comprar um módulo de entradas analógicas que apenas poderia ser utilizado para um sensor. Assim, os ensaios serão realizados para o pior caso possível. Assim, módulo de entradas foi configurado para um tempo de conversão de 50ms no caso das ligações a dois fios, e 60ms a quatro fios. Não foram aplicados filtros, de forma a minimizar este tempo e o tempo de aquisição imposto ao sensor foi de 2ms.

Tal como referido no subcapítulo 4.3.2, seria mais indicado para este projeto a utilização de uma comunicação isócrona e, por conseguinte, um módulo de entradas de alta performance. Neste caso, seria possível reduzir o tempo de conversão atual. No entanto, o módulo de entradas analógicas utilizado não permite este tipo de comunicação e não estava disponível na empresa um módulo com uma performance superior a este. Assim, o limitador do processo é o módulo de entradas analógicas.

Do ponto de vista do cliente, este tempo foi aceite. Uma vez que o processo de identificação do perfil e detecção das emendas de um pneu agrícola apenas se irá realizar a um pneu de cada família; a solução atual é pouco rigorosa, dependendo do operador; e pode provocar um gasto elevado, caso o desmoldante seja incorretamente aplicado. Assim, uma solução automática,

mesmo com um tempo de ciclo elevado, permitirá otimizar a solução atualmente realizada. No entanto, será também estudado, de forma comparativa, uma solução caso se desabilitasse as restantes entradas, e caso se alterasse o módulo de entradas analógicas.

Os ensaios foram realizados, tendo por base este equipamento e, conseqüentemente, o intervalo de tempo entre medições de 240ms. Para o processo de identificação do perfil do pneu os ensaios foram iniciados com uma velocidade linear do pneu de 8 mm/s. A esta velocidade, a cada 240ms, o pneu movimenta-se 2mm.

Estes ensaios foram realizados em função do tempo, uma vez que não seria possível comunicar com o robô industrial de forma a que este, em tempo real, enviasse a sua posição. No entanto, visto que o pneu se movimenta a uma velocidade constante, foram representados os valores medidos em função do deslocamento do pneu, desde o início da medição.

O primeiro teste, a 8mm/s, está representado na Figura 5.10.

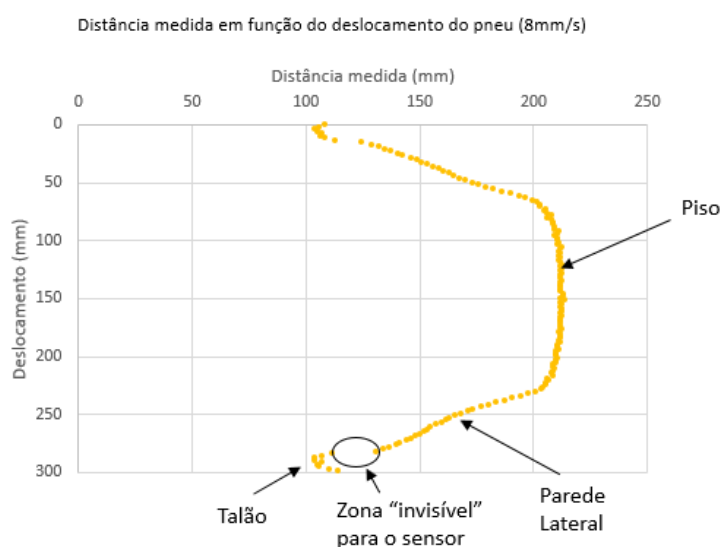


Figura 5.10 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s.

Através da Figura 5.10 é possível identificar e medir as principais zonas que constituem um pneu:

- Talões;
- Paredes laterais;
- Piso.

Nesta análise é também possível conhecer o diâmetro interno e externo do pneu, bem como a sua altura, quando este é suportado na ferramenta. Na Figura 5.10 é visível a deformação vertical do pneu, já que a inclinação da parede lateral superior é diferente da inferior. Estes dados são bastante importantes, para que o posicionamento das pistolas de pintura e o seu ângulo de incidência seja feito de forma rigorosa, permitindo que a pintura seja uniforme, sem desperdício, nem excesso de material.

Para uma análise mais detalhada das medições obtidas neste ensaio e para calcular o alongamento provocado pela suspensão do pneu, foram efetuadas, previamente, diversas medições, através de instrumentos de medição convencionais, para que fosse possível fazer uma comparação, à posteriori, com os valores obtidos nos testes realizados. A Figura 5.11 pretende indicar quais as medições realizadas e estudadas.

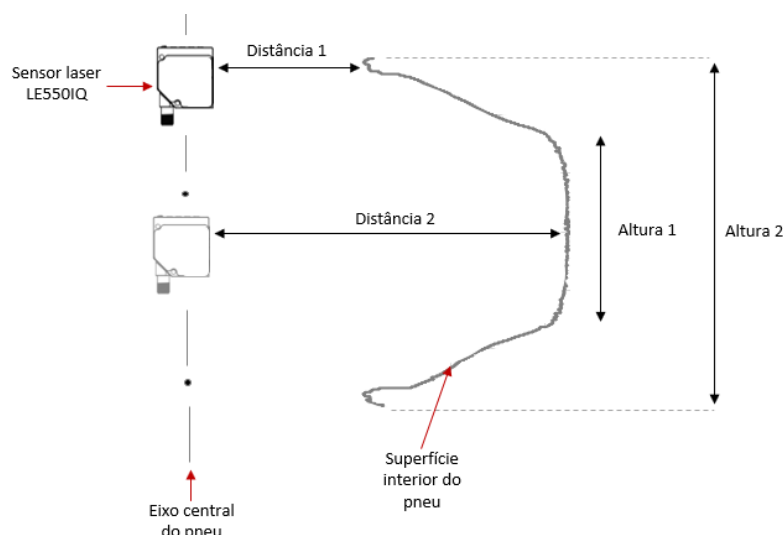


Figura 5.11 Dimensões do pneu estudado e distâncias medidas entre o sensor e a superfície interior do pneu.

A Tabela 5.1 apresenta as diferentes medições obtidas manualmente e com o sensor LE550IQ, assim como uma comparação entre elas.

Tabela 5.1 Medições ao pneu em análise, obtidas pelo sensor LE550IQ e manualmente.

|             | Medição manual (mm) | Medição com sensor (mm) | Diferença entre medições (mm) |
|-------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Distância 1 | 107,41              | 106,38                  | 1,03                          |
| Distância 2 | 210,80              | 211,72                  | 0,92                          |
| Altura 1    | 162,00              | 161,28                  | 0,72                          |
| Altura 2    | 290,00              | 299,52                  | 9,52                          |

Os resultados medidos pelo sensor, apresentados acima, são obtidos pelas medições representadas no gráfico da Figura 5.10.

A diferença entre as medições realizadas manualmente e com o sensor, para as distâncias 1 e 2 é aproximadamente 1mm. Ora, dada a repetibilidade e precisão do sistema de medição, estes valores estão dentro do esperado. Por outro lado, como referido, seria de esperar um alongamento das paredes do pneu quando suspenso através da ferramenta, o que se traduz por uma diferença da altura 2 em quase 10mm e uma diferença quase nula na medição do piso.

Ainda analisando o primeiro teste, existem duas zonas, representadas por um espaço entre medições de maiores dimensões, que seguem os talões do pneu, que não permitem que o sensor meça corretamente a sua distância à superfície. Esta zona “invisível” ao sensor, representada na Figura 5.10, deve-se à baixa refletividade da borracha e, principalmente, às curvaturas acentuadas da superfície nessas zonas, impedindo a sua medição.

Assim, de forma a estudar a sua influência, para os cálculos de posicionamento das pistolas de pintura e para a detecção das emendas, em pneu agrícolas, foram realizados testes com diferentes velocidades de movimento do pneu (3,5, 8, 10 e 20mm/s.) e inclinações do sensor (10 e 12°).

Primeiramente, foi reduzida a velocidade para 3mm/s. Neste teste, representado na Figura 5.12, o número de medições é superior, assim como o tempo de ensaio. No entanto, são feitas medições a cada 0,72mm, portanto o rigor na medição e posterior representação será superior.

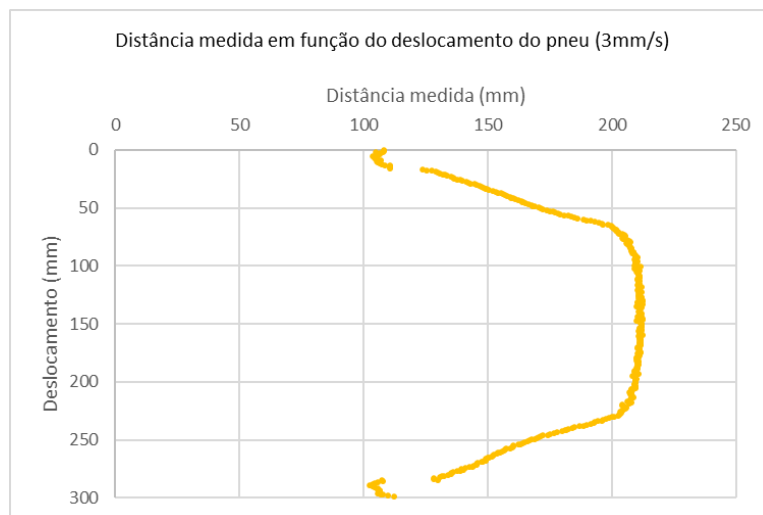


Figura 5.12 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 3mm/s.

Como seria de esperar, neste segundo teste, o número de medição é quase três vezes superior ao primeiro. Por conseguinte, são claramente visíveis duas zonas sem medições, indicando a necessidade de dar uma inclinação ao sensor para que seja feita a medição da superfície.

Analisando, pormenorizadamente o gráfico, foram novamente obtidas as distâncias e alturas representadas na Figura 5.11. Os seus valores são aproximadamente iguais aos registados anteriormente.

Em contrapartida, será interessante estudar o comportamento do sensor e a identificação do perfil caso se movimente o pneu a uma velocidade superior. Assim, na Figura 5.13 está representado o perfil do pneu, quando este se movimenta a 20mm/s.

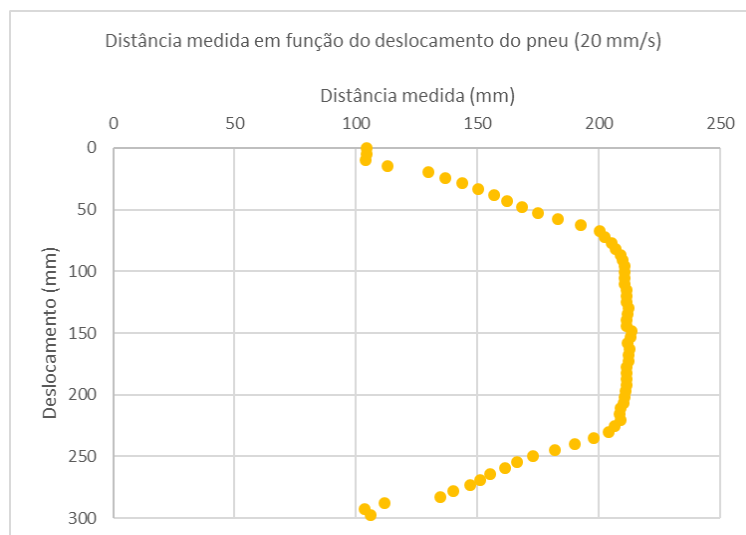


Figura 5.13 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 20mm/s.

Neste teste, o perfil tem um menor número de medições, o que torna o sistema mais rápido (15 segundos), mas com um rigor inferior. A distância entre medições, para esta velocidade, é de 5mm.

A velocidades superiores, como é o caso, particularidades com dimensões mais pequenas, como o talão, já não são facilmente identificadas. No entanto, a medição do comprimento das paredes, do piso e da altura do pneu mantêm-se semelhantes. Assim, dependendo do ângulo

de pulverização, do ângulo da pistola e do rigor exigido à pintura, o sistema pode variar bastante a velocidade com que se movimenta o pneu para que seja identificado o seu perfil.

Mais uma vez, as zonas “invisíveis” ao sensor são notórias, portanto, será de seguida dada uma inclinação ao sensor, para que seja possível medir toda a parede lateral superior e estudar a influência que este erro poderá ter ao traçar do perfil, mas principalmente, futuramente, quando for necessário detetar “emendas horizontais” em pneus agrícolas.

Para este ensaio foi dada uma inclinação de  $10^\circ$ , no sentido anti-horário relativamente ao eixo central do pneu, ao sensor em estudo, de forma a analisar, com maior detalhe, a parede lateral superior do pneu. O perfil traçado, a uma velocidade de 8mm/s, está representado na Figura 5.14.

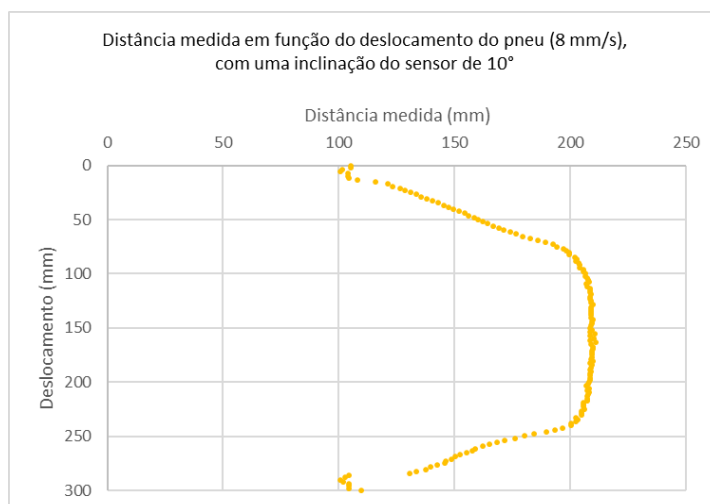


Figura 5.14 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s e com uma inclinação do sensor de  $10^\circ$ .

Através da análise das medições obtidas, concluiu-se que, a existência de uma zona “invisível” ao sensor, não interfere na medição da dimensão das paredes laterais e do piso. Uma vez que, tanto as dimensões como a sua localização em relação ao primeiro ponto de medição, se mantêm iguais, comparativamente com os primeiros ensaios realizados, sem inclinação do sensor. No entanto, para a medição das “emendas horizontais”, em pneus agrícolas, já será necessário colocar o sensor perpendicular à superfície interior do pneu, para que seja corretamente medida. É importante referir que, neste caso, esta zona sem medições não iria influenciar a deteção das emendas, uma vez que se encontra logo a seguir ao talão. Portanto, dado o tamanho de uma tela têxtil, nunca existiria uma emenda a uma distância próxima dos talões de um pneu.

Tal como referido inicialmente, um dos objetivos é traçar o perfil do pneu, para que no processo de pintura, os operadores consigam colocar as pistolas num ângulo que permita uma pintura uniforme do pneu. Ora, para tal, será necessário traçar um perfil onde seja possível ver todas as curvaturas do pneu e as suas respetivas localizações, isto é, a distância destas ao ponto inicial de medição. Neste caso, a medição começa no talão superior do pneu, portanto o zero de deslocamento é a primeira medição do sensor em relação ao pneu.

Nos diferentes gráficos do perfil apresentados, é possível ver que este não é simétrico. Como esperado, devido ao seu peso e a estar suportado por uma ferramenta as suas paredes laterais têm um comportamento distinto. É de esperar, portanto, que a parede lateral inferior não varie tanto de forma, como a parede lateral superior. Assim, é possível dividir o pneu em 3 áreas diferentes, o piso, e cada uma das suas paredes laterais. Dependendo do ângulo de

pulverização das pistolas, das curvaturas detetadas e dos requisitos para a pintura, este ainda pode ser dividido em áreas mais pequenas.

Neste sentido, foi feita a regressão linear das medições obtidas a uma velocidade de 8mm/s, para sejam identificadas as diferentes áreas do pneu - Figura 5.15.

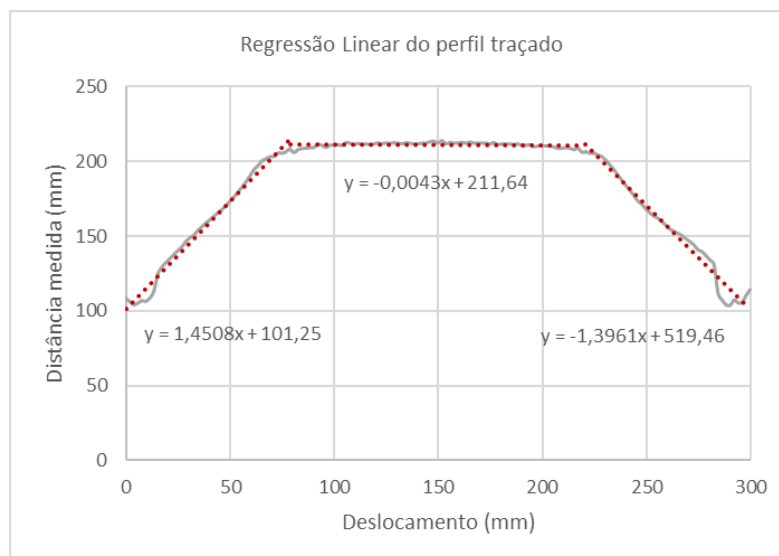


Figura 5.15 Regressão linear do perfil traçado com o sensor LE550IQ, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s.

A aproximação do perfil a três retas divide o pneu de uma forma mais intuitiva para o posicionamento das pistolas de pintura. Assim, dividindo o pneu em três setores, torna-se mais fácil estudar o ângulo necessário de pulverização das pistolas e o seu ângulo com a superfície do pneu.

Esta divisão do pneu pode ser também utilizada caso as curvaturas de um pneu agrícola sejam demasiado acentuadas, existindo várias zonas onde o sensor não é capaz de medir. Assim, dependendo da área a medir, o sensor deverá ser colocado com uma determinada inclinação, dependente do declive da superfície.

Como resumo do ensaio de identificação do perfil, foi criada uma tabela de resultados -Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de identificação do perfil do pneu, com o sensor LE550IQ.

|         | Velocidade (mm/s) | Inclinação | Identificação dos talões | Zona “invisível” ao sensor | Identificação do piso e paredes laterais |
|---------|-------------------|------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Teste 1 | 8                 | Não        | Sim                      | Sim                        | Sim                                      |
| Teste 2 | 3                 | Não        | Sim                      | Sim                        | Sim                                      |
| Teste 3 | 20                | Não        | Não                      | Sim                        | Sim                                      |
| Teste 4 | 8                 | Sim        | Sim                      | Não                        | Sim                                      |

Assim, é possível concluir que, para velocidades elevadas (igual ou superior a 20mm/s), características de menores dimensões como os talões não são rigorosamente medidas, podendo não ser representadas, posteriormente. No entanto, permitem medir as 3 principais áreas do pneu (parede superior, piso e parede inferior) que, como referido, pode ser suficiente para o cálculo das posições da pistola de pintura.

Por outro lado, caso se incline o sensor, toda a superfície pode ser corretamente medida, mesmo se as suas curvaturas forem acentuadas. No entanto, implica realizar o ensaio três vezes, neste caso, para os três declives existentes no pneu (parede superior, piso e parede inferior).

A velocidades inferiores, como 3mm/s, o rigor nas medições é elevado, visto serem feitas medições a cada milímetro percorrido. No entanto, o tempo para o teste é superior.

Concluindo, este sensor, com um elevado tamanho de laser projetado, em comparação com outros equipamentos e uma repetibilidade de  $\pm 1\text{mm}$ , permite traçar o perfil do pneu a diferentes velocidades, garantindo a medição de toda a sua superfície interior.

### Medição de uma sobre-espessura

Para estudar a eficiência do sensor na medição de uma sobreposição, foi realizado o segundo ensaio, descrito no ponto 5.1.4. No entanto, uma vez que este sensor tem uma gama de medição até 1000mm, irá manter-se na posição central do suporte do pneu, não sendo necessária uma aproximação à sua superfície interna.

Tal como no ensaio anterior, as medições foram feitas em função do tempo e igualmente a velocidade constante. O robô industrial no início de cada rotação aumenta gradualmente a sua velocidade e no final diminui-a, automaticamente, até atingir 360°. Esta aceleração e desaceleração permite um movimento mais suave no arranque e paragem. Apesar disso, estas variações de velocidade são realizadas num curto espaço de tempo, não sendo significativas para o processo.

Mantendo-se o tempo de conversão de 240ms, e para a medição de, pelo menos, 5 medições por emenda, de forma a que seja garantida a obtenção de uma diferença de medições consecutivas superior ao valor referência, foi calculada a velocidade de rotação do pneu, tendo por base as limitações do robô. Assim, o primeiro ensaio realizado foi a 2°/s, correspondente a cerca de 10mm/s de velocidade de varrimento da superfície do pneu.

O valor referência, neste caso, será 1 mm, visto que a emenda tem 2mm de sobre-espessura e a repetibilidade do sensor, para um tempo rápido de aquisição, é de  $\pm 1\text{mm}$ .

Na Figura 5.16 estão representados os resultados obtidos a uma velocidade de rotação de 2°/s.

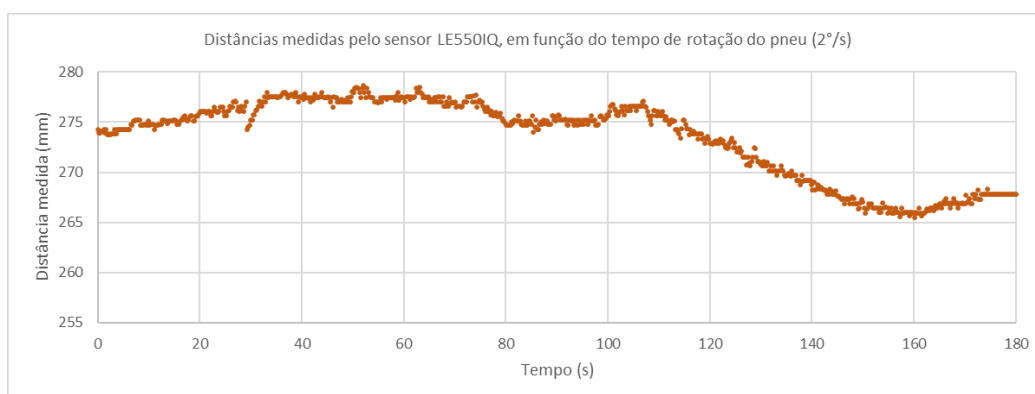


Figura 5.16 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 2°/s.

Pela análise da Figura 5.16, é possível comprovar a irregularidade da forma de um pneu “em verde”, uma vez que, a distância entre o sensor e a superfície interior do pneu varia de forma irregular.

Como referido anteriormente, era de esperar que existisse uma diferença entre duas medições consecutivas muito superior às restantes, ao longo de uma rotação, o que não é evidenciado no gráfico. No entanto, tal como é possível ver ao passar os 30 segundos de medição, existe uma variação do valor medido e um posterior aumento contínuo da distância.

Dada a repetibilidade de  $\pm 1\text{mm}$  do sensor, os valores medidos, a uma mesma distância, podem oscilar entre este intervalo. Apesar disso, a diferença brusca entre duas medições consecutivas existe e permite a deteção da emenda.

De forma a estudar este comportamento, foi calculada a derivada entre duas medições consecutivas, ao longo de toda a rotação -Figura 5.17. A este gráfico foi aplicado um filtro para que apenas as medições significativas fossem observadas. Portanto, será apenas explícita a deteção da emenda. Os resultados são apresentados na Figura 5.18.

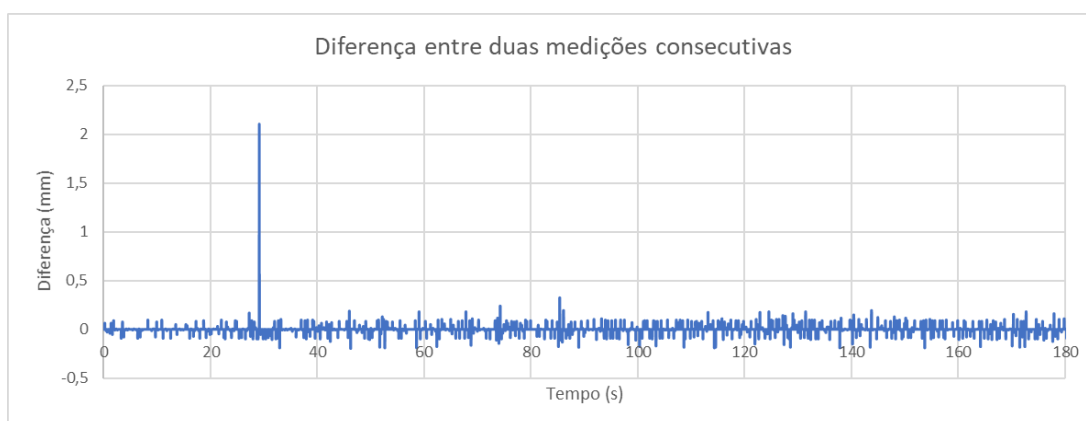


Figura 5.17 Diferença entre duas medições consecutivas, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de  $6^\circ/\text{s}$ .

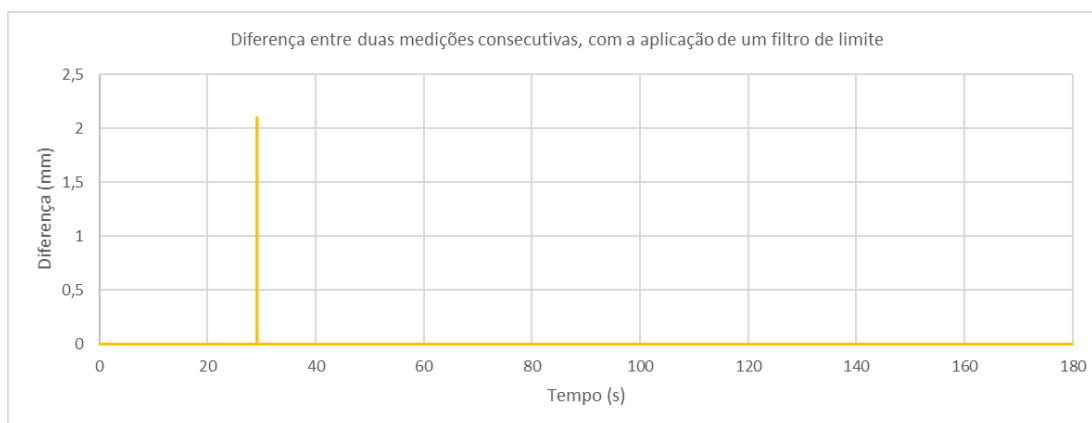


Figura 5.18 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de  $6^\circ/\text{s}$ .

Primeiramente, é necessário indicar que o gráfico da Figura 5.18 não corresponde à derivada do gráfico da Figura 5.16, mas sim ao resultado de uma filtragem desse mesmo gráfico. Isto é, as variações inferiores a  $1\text{mm}$  foram consideradas nulas, para uma melhor interpretação e análise das diferenças, de forma a ser mais intuitiva a deteção da emenda. Este processo foi aplicado em todos os ensaios.

Para a identificação da emenda será apenas necessário localizar a diferença com valor superior ao valor referência. Em sequência, assim que uma emenda é detetada, a posição do

eixo de rotação, neste caso, deverá ser guardada para que, posteriormente, seja feita a localização dessa mesma emenda.

Como é notório pelo gráfico, a diferença com maior valor é apenas referente à emenda, não existindo nenhuma outra diferença com valor superior a 1mm. Portanto, para este caso, a emenda será detetada sem erros.

Posteriormente, dado o bom desempenho na detecção da emenda, foi aumentada a velocidade para 6°/s, que corresponde a, aproximadamente, 33mm/s de varrimento da superfície. As distâncias medidas pelo sensor ao longo de uma rotação e a identificação da emenda de superfície podem ser analisadas na Figura 5.19 e na Figura 5.20.

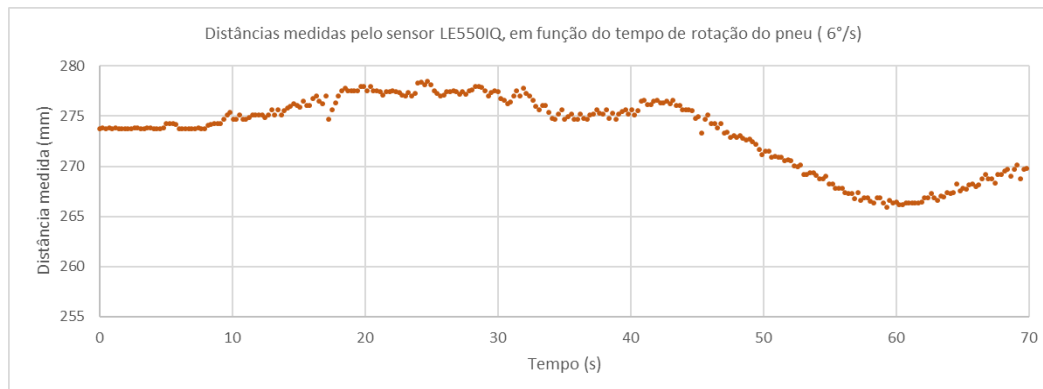


Figura 5.19 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s (sensor LE550IQ).

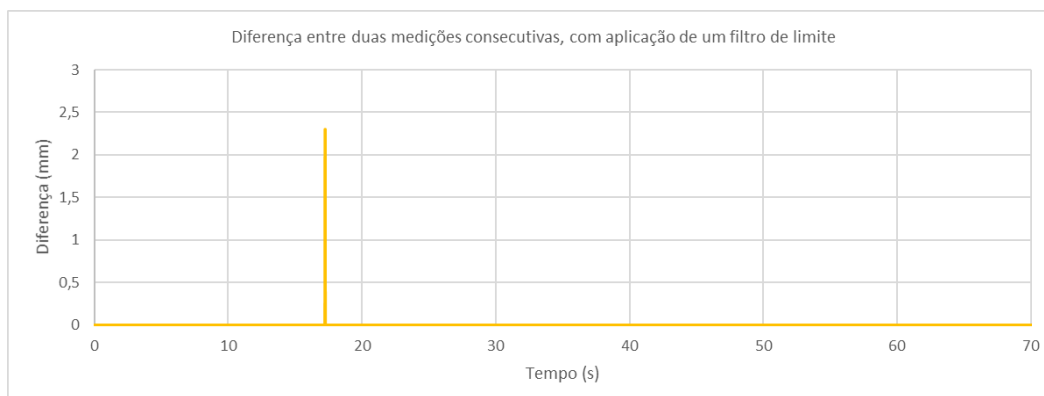


Figura 5.20 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.

Com o aumento da velocidade, o número de medições no perímetro do pneu é reduzido. No entanto, apesar das medições serem menos e não serem precisas, a detecção da emenda é assegurada. O cálculo da diferença entre duas medições consecutivas, ao longo do tempo, garante esta mesma identificação. Assim como o valor referência imposto.

Por outro lado, tal como no ensaio anterior, a irregularidade da forma do pneu é notória no gráfico dos resultados obtidos.

Para uma velocidade de 6°/s, a distância entre medições consecutivas é de, aproximadamente, 8mm. Ora, uma vez que a largura da emenda é de, aproximadamente, 10mm e a repetibilidade do sensor cria uma variação elevada dos valores medidos, esta velocidade será a máxima aconselhável para este processo.

Concluindo, este sistema de medição, permite não só traçar o perfil como detetar as emendas existentes na superfície interior de um pneu. No entanto, a velocidade do processo será limitada devido à precisão das medições

### 5.2.2 Sensor laser LM150, da Banner

O sensor LM150 da Banner tem uma reduzida gama de medição, tornando impossível perfilar o pneu com este equipamento. Assim, apenas foi realizado o segundo ensaio com este equipamento: medição e posterior detecção de uma emenda.

Dada a sua repetibilidade de  $\pm 0.002\text{mm}$ , são esperados ensaios com medições mais precisas, tornando mais evidente a medição de uma emenda.

#### Medição de uma sobre-espessura

À semelhança do sensor anteriormente estudado, também este foi colocado dentro do pneu, a uma distância que permitisse a correta medição do espaço entre o sensor e a superfície interior do pneu. Neste caso, tal é conseguido através da aproximação do pneu ao sensor.

O tempo de processamento, mais uma vez, é de 240ms. A igualdade desta característica comparativamente com o sensor anterior permite confirmar que, o tempo de processamento no módulo de entradas analógicas é o equipamento limitador do processo de medição.

Comparativamente com o sensor anterior, é esperado um melhor desempenho na medição de uma emenda, dada a sua repetibilidade. Neste ensaio, deverá ser visível a elevação, provocada por um defeito no pneu, apresentada no ponto 5.1.2.

Tendo por base o tempo de aquisição mínimo deste sensor (0,25ms) e a sua repetibilidade (20  $\mu\text{m}$ ) foram inicializados os ensaios a uma velocidade de 6°/s, que corresponde à velocidade limite aconselhável para o sensor LE550IQ. Na Figura 5.21 estão representadas as medições ao longo dos 360°.

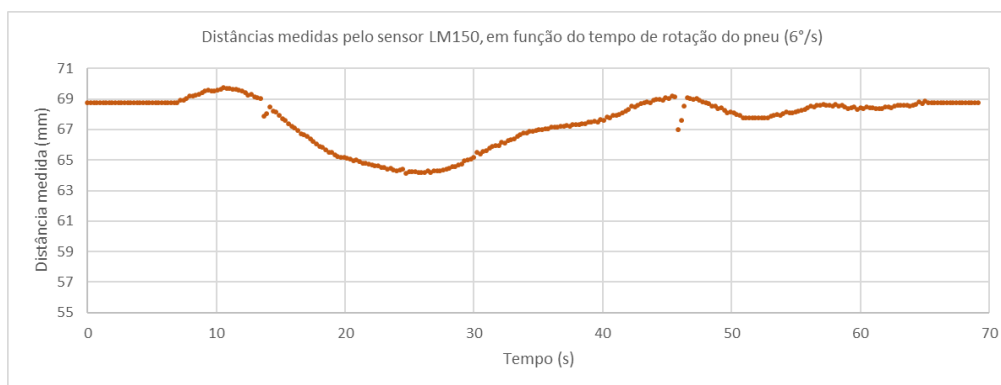


Figura 5.21 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.

Tal como referido nos comentários aos ensaios com o sensor LE550IQ, é notória a irregularidade da forma de um pneu “em verde”. No entanto, neste caso, dada a repetibilidade deste sensor, não existe uma variação elevada e inconstante dos valores medidos. Sendo assim, é possível identificar duas zonas do gráfico onde existe uma elevação na superfície do pneu.

A primeira variação apresentada no gráfico, a 14 segundos do início do ciclo, representa a elevação provocada por um defeito numa sobre-espessura interna. Portanto, não é esperado que, calculando as derivadas, seja detetada como uma emenda de superfície.

A 45 segundos do início do ciclo, onde o sensor mede a sobre-espessura de 2mm, a variação dos valores medidos é bastante acentuada, voltando, posteriormente, à distância anteriormente medida.

Para a análise da detecção da emenda, foi calculada a diferença entre duas medições consecutivas, ao longo de todo o ensaio- Figura 5.22. O valor referência, para este sensor é de 2mm (1,998mm).

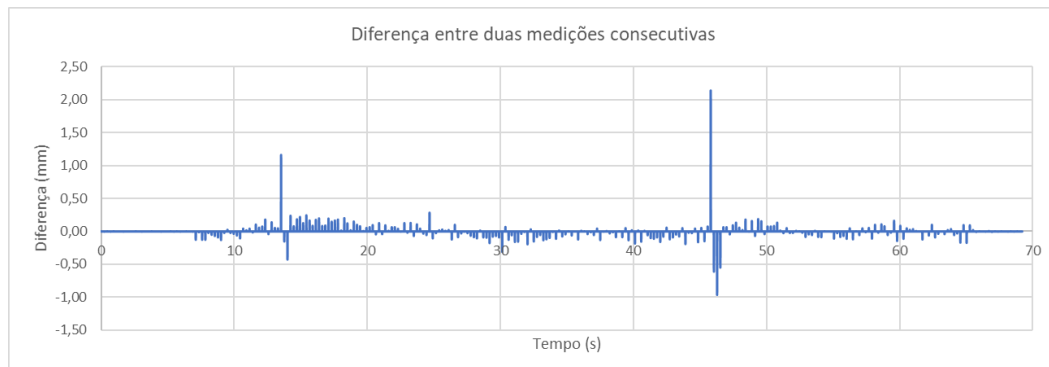


Figura 5.22 Diferença entre duas medições consecutivas, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.

Tal como no ensaio anterior, com o sensor LE550IQ, foi aplicado um filtro de limite ao gráfico apresentado, de forma a visualizar apenas a medição da emenda. Este está representado na Figura 5.25.

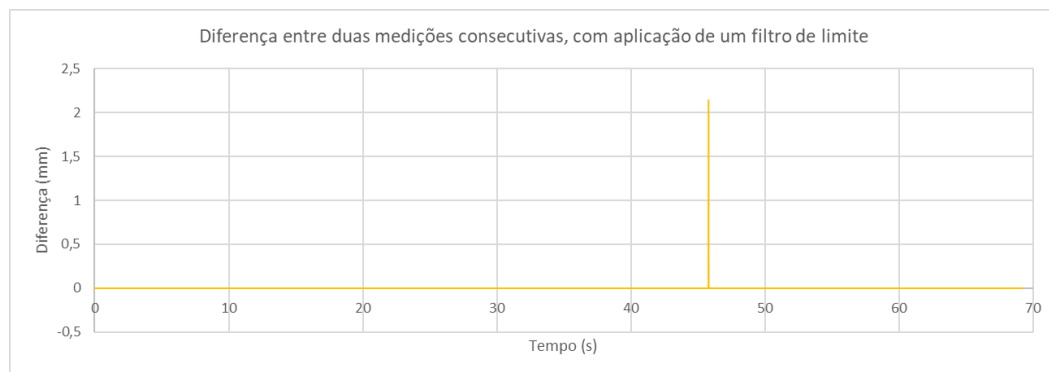


Figura 5.23 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.

Tal como esperado, apenas a emenda foi detetada. Tal deve-se ao facto de a elevação não apresentar um comportamento igual ao que seria esperado na medição de uma emenda.

Uma vez que será necessário localizar a emenda em relação ao código de barras, visto ser essa a posição zero de deslocamento, será ativado um pulso quando se mede uma sobre-espessura. Este pulso permite a comunicação com o motor, guardando assim a sua posição no momento em que é feita a detecção. A Figura 5.24 pretende representar este mesmo pulso, ativado quando se mede a emenda a uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.

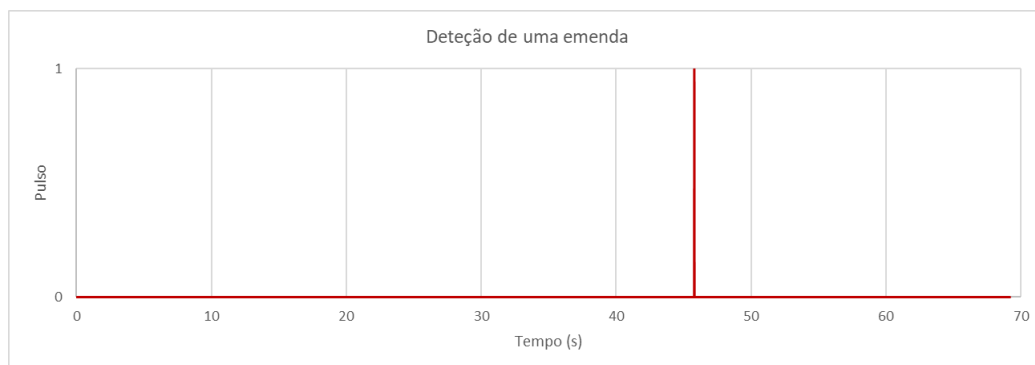


Figura 5.24 Pulso criado para representar a detecção de uma emenda.

Para estudar a velocidade indicada para o processo de detecção de uma emenda, foram realizados ensaios para diferentes velocidades de rotação. Todos estes ensaios são apresentados no Anexo D.

Assim, de forma a aferir a detecção de uma emenda a velocidades superiores, diminuindo assim o tempo de ciclo do sistema. Na Figura 5.25, estão representadas as distâncias medidas pelo sensor, quando o pneu se movimenta a  $10^\circ/\text{s}$ . Neste ensaio, o número de medições será menor e a distância entre elas é de 13mm, portanto, esta velocidade pode não ser suficiente para a medição de uma emenda.

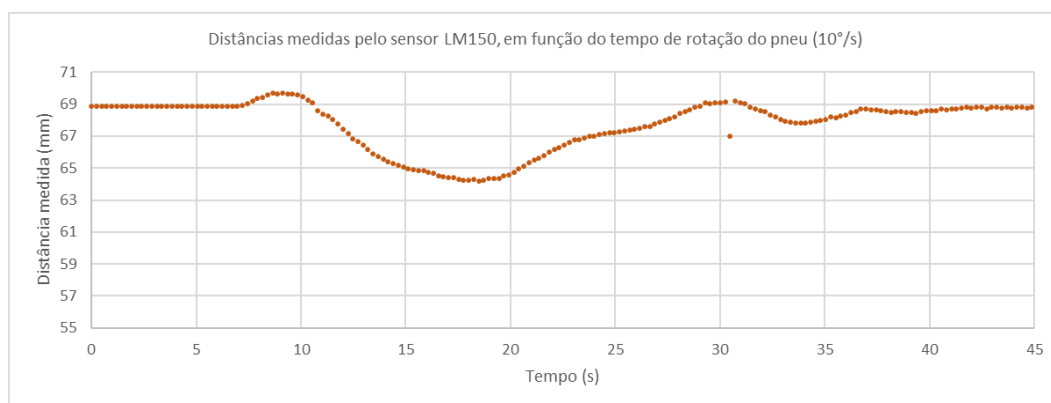


Figura 5.25 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de  $10^\circ/\text{s}$ .

Na Figura 5.26, são apresentados os valores de diferença calculados ao longo do processo de medição.

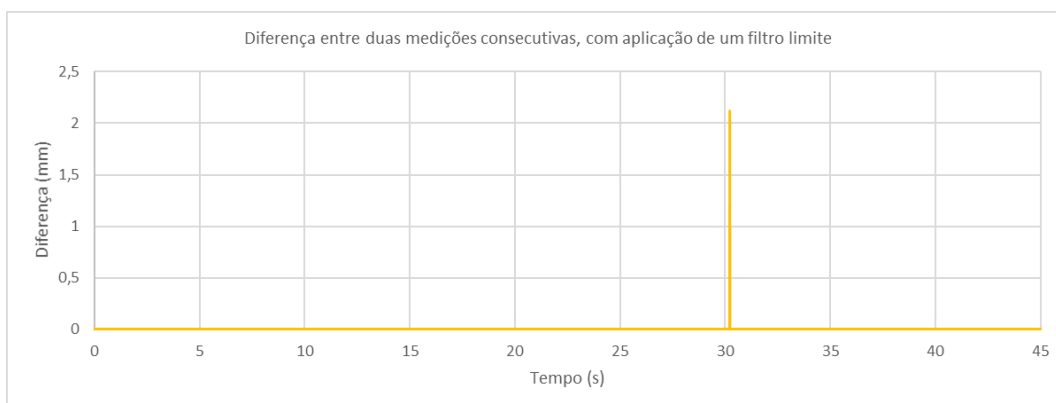


Figura 5.26 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro de limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de  $10^\circ/\text{s}$ .

Pela análise do gráfico apresentado é possível afirmar que a medição da elevação já não é visível e a detecção da emenda é exequível. No entanto, para esta velocidade apenas é obtida uma única medição na emenda, uma vez que é obtida uma medição a cada 13mm. Portanto, esta deverá ser a velocidade máxima a que o pneu pode rodar, que permite a detecção da emenda. No entanto, de forma a comprovar esta afirmação foram realizados mais 4 ensaios a esta velocidade.

Na Figura 5.27 estão representadas as medições obtidas num novo ensaio a esta velocidade, a Figura 5.28 apresenta os valores de diferença calculados ao longo do tempo de ensaio, com aplicação de um filtro limite e a Figura 5.29 sem este mesmo filtro.

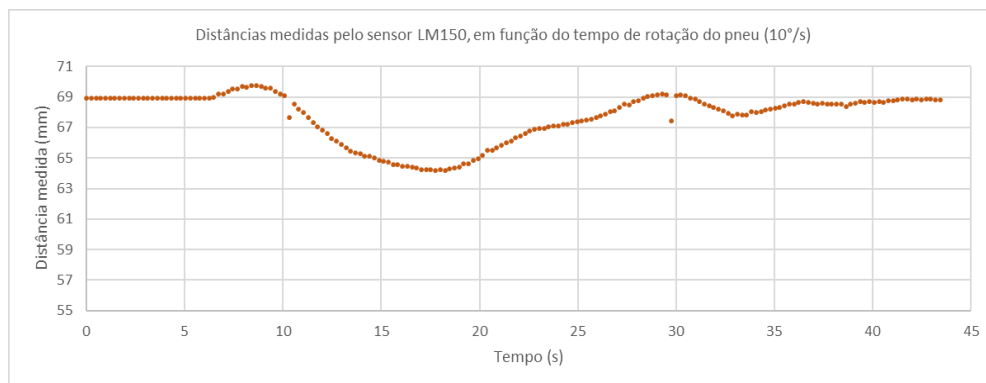


Figura 5.27 Distâncias medidas pelo sensor LM150, no teste 2, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de  $10^\circ/\text{s}$ .

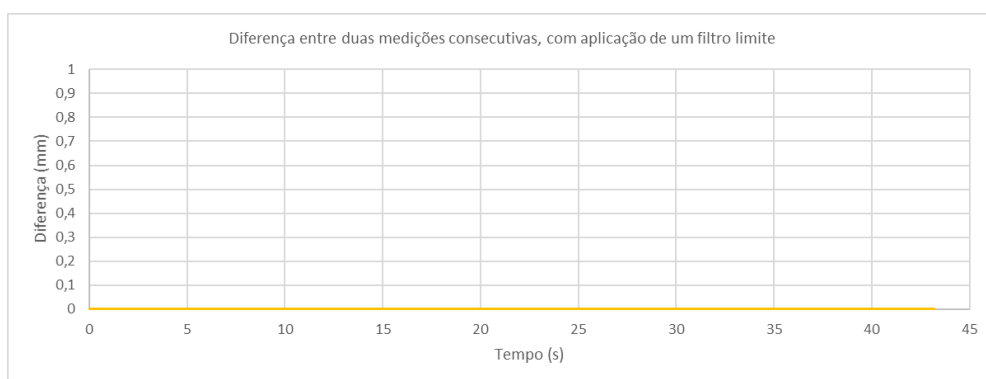


Figura 5.28 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, no teste 2, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de  $10^\circ/\text{s}$

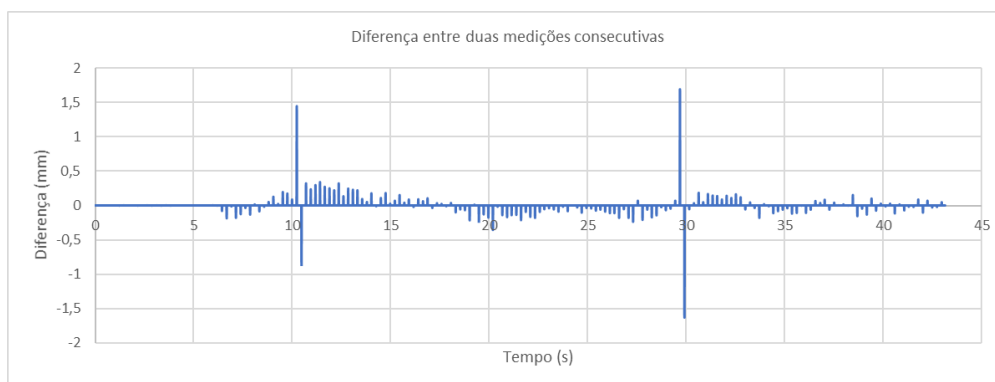


Figura 5.29 Diferença entre duas medições consecutivas, no teste 2, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de  $10^\circ/\text{s}$

Ora, neste segundo teste, a uma velocidade de 10°/s, os resultados obtidos são um pouco diferentes, visto que é visível a elevação e a emenda não é detetada. O valor referência é de 2mm e, neste caso, a medição da emenda foi de 1,7mm, portanto esta não é detetada, Figura 5.28.

Esta velocidade corresponde, portanto, à velocidade máxima que pode ser rodado o pneu, para a detecção desta emenda. No entanto, como confirmado, esta detecção não se verifica em todos os casos. No Anexo D, podem ser consultados os restantes testes.

Concluindo, a repetibilidade do sensor permitiu um aumento da velocidade de rotação do pneu. No entanto, o fator condicionante desta velocidade, neste caso, é a largura da emenda. Assim, apesar do sensor ter uma precisão e repetibilidade melhor, comparativamente com o sensor LE550IQ, a velocidade não será muito superior à definida para o sensor anterior. Como é medida a mesma emenda, para a sua detecção é necessário garantir um número suficiente de medições, o que não se verifica aumentando a velocidade. Portanto, é possível concluir que, caso se pretenda aumentar a velocidade do processo de medição, o tempo entre medições deverá ser inferior. Assim, posteriormente, será estudada a solução de medição para diferentes tempos de conversão.

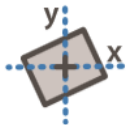
### 5.3 Ensaios com câmara de visão 3D

Este equipamento de visão, diferencia-se dos sensores laser de distância, uma vez que permite a visualização dos resultados de uma medição, através de uma imagem 3D. Por esta mesma razão, o tratamento dos dados recolhidos é feito apenas na aplicação informática da Sick – SOPAS- e, posteriormente, estes são enviados para a aplicação TIA Portal.

O SOPAS, através de ferramentas, permite analisar uma imagem quanto aos seus relevos, defeitos e diferenças. Ora, mais direcionado para o controlo de atributos, esta aplicação informática, neste caso, apenas permite a detecção de emendas. O tamanho do feixe laser projetado não é suficientemente grande para que cubra toda a altura do pneu e, após várias medições, não é possível juntar estas imagens, de forma a recriar o perfil. Portanto, não será aconselhável para este processo.

Para o funcionamento desta câmara é necessário introduzir a velocidade de rotação do pneu, definir o tamanho da imagem que esta irá obter e, posteriormente, através de uma imagem padrão do interior do pneu, são criadas ferramentas para que seja possível detetar uma sobre-espessura - Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Ferramentas da aplicação informática SOPAS (SICK AG, 2019).

|                                                                                     |                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|  | Ferramentas para a localização de objetos, planos ou bordas       |
|  | Ferramentas de inspeção para objetos ou regiões fixas numa imagem |
|  | Ferramentas de medição distâncias ou ângulos entre objetos        |

Tal como referido no Capítulo 3, no ponto 3.5.1, o tamanho do feixe laser projetado varia com a distância a que a câmara se encontra da superfície do pneu, sendo que, quanto mais afastada maior será o tamanho da imagem (maior área medida), mas pior será a sua resolução. Desta forma, serão utilizadas dimensões mais pequenas de imagem e, através do movimento do pneu, garantir que toda a área que queremos analisar é medida pelo laser. A cada imagem captada na aplicação SOPAS são aplicadas as ferramentas utilizadas para identificar uma emenda. De seguida, é transmitida essa informação para o ambiente de programação TIA Portal.

Para efetuar o controlo da câmara através do TIA Portal, foi necessário integrar diferentes funções de forma a garantir a comunicação TCP-IP (protocolo de comunicação Ethernet). Esta comunicação permite enviar e receber informação da câmara 3D, para que seja controlada a aquisição de imagens e localização das emendas. Para uma melhor compreensão das funções utilizadas, estas poderem ser encontradas no Anexo B.

A Figura 5.30 representa uma das imagens obtidas com a câmara de visão, sendo que a imagem a) é a sua representação em três dimensões e a b) a linha laser.

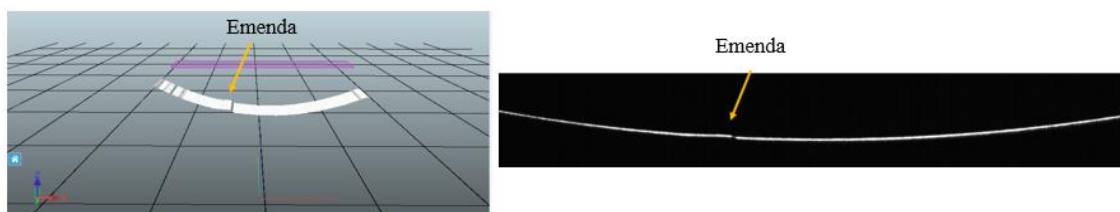


Figura 5.30 Imagens de uma emenda, obtidas com a câmara de visão 3D.

Obtendo uma imagem padrão, sem emenda, e uma imagem onde se identifica uma emenda, é possível garantir a sua deteção. Isto é, a câmara de visão, quando obtém uma imagem, aplica as ferramentas anteriormente programadas e envia para a aplicação informática TIA Portal, a informação da deteção da emenda, caso exista na imagem, e da sua localização. Ora, para tal, será sempre necessário um computador que estabeleça a comunicação, sendo que, apenas será possível visualizar todo o interior do pneu através da aplicação da câmara e de diferentes imagens.

Assim, é possível concluir que, apesar de obter imagens com elevada resolução, possibilitando a deteção das emendas, este equipamento não permite recriar o perfil completo do pneu e tem um custo muito elevado, comparativamente com os restantes sistemas, não acrescentando muitas vantagens para os objetivos requeridos para a solução final.

## 5.4 Solução de medição

Por fim, tendo por base todos os ensaios realizados, são apresentadas três soluções distintas, com os sistemas de medição estudados, possíveis de implementar no presente projeto. Desta forma, pretende-se demonstrar ao leitor as diferentes abordagens que o sistema pode ter, dependendo do custo, precisão dos resultados e tempo de ciclo pretendido.

### Solução 1

Numa primeira abordagem aos resultados obtidos com o sensor LE550IQ, foi possível concluir que este permite traçar o perfil do pneu com uma elevada fiabilidade nas medições.

Relativamente à medição de uma emenda, com sobre-espessuras de 2mm, de igual forma foi confirmado que seria garantida a sua detecção.

Como este projeto será aplicado a pneus agrícolas e estes contêm emendas que podem ter o dobro desta sobre-espessura, este sensor será suficiente para realizar todo processo – traçar o perfil e detetar as suas emendas.

Portanto, esta solução permite:

- Diminuir o custo em equipamentos;
- Diminuir a complexidade da solução de controlo;
- Ser adaptável para qualquer pneu agrícola, uma vez que tem uma gama de medição entre 100 e 1000mm;
- Ser inserido em qualquer máquina ou equipamento, dada a sua dimensão (60x56x26).

Apesar de todos os benefícios, esta solução, dada a sua repetibilidade, caso se pretenda utilizar para a medição de sobre-espessuras inferiores a 2mm, não será a mais aconselhável. O custo deste equipamento é, aproximadamente, 300€.

## **Solução 2**

Uma segunda possível solução seria utilizar dois sistemas de medição. Tal como analisado anteriormente, a repetibilidade de um sistema de medição é essencial tanto para traçar o perfil de um pneu como, e principalmente, para a detecção de uma emenda. Assim, nesta solução, seriam utilizados os dois sensores de distâncias estudados. Desta forma, será garantida a medição de uma emenda, com elevada fiabilidade nas medições, através do sensor LM150 e a medição do perfil será garantida pelo sensor LE550IQ. Neste caso, ao traçar o perfil, não será feita a medição das “emendas horizontais”.

A utilização de dois sensores de distância garante:

- Uma elevada precisão e repetibilidade do processo;
- Diminuição do tempo de ciclo;
- Adaptação a qualquer tipo de pneu.

No entanto, esta solução:

- Aumenta o custo em equipamentos;
- Aumenta a complexidade da solução de controlo;
- Adapta-se menos facilmente a qualquer máquina ou equipamento, uma vez que são necessários dois equipamentos.

Assim, esta solução, apesar de garantir resultados com maior fiabilidade, é bastante mais complexa e tem um custo, aproximadamente, de 1000€.

## **Solução 3**

Por último, é proposta a utilização de um sistema de medição que possua uma gama de medição equivalente ao sensor LE550IQ e uma repetibilidade equiparável ao sensor LM150. Desta forma, apenas com um equipamento será possível obter:

- Elevada fiabilidade nas medições obtidas;
- Diminuição do tempo de ciclo;
- Diminuição da complexidade da solução de controlo;
- Flexibilidade do sistema, uma vez que pode ser utilizado em qualquer pneu;
- Adaptação rápida a qualquer máquina ou equipamento.

Em contrapartida, esta solução é bastante mais dispendiosa do que qualquer uma das anteriores. Para esta solução, poderia ser utilizado, por exemplo, o sensor IL-600 da Keyence, que tem um custo de, aproximadamente, 4000€.

Neste projeto de dissertação, como uma das finalidades é a obtenção de um sistema de baixo custo, aplicável a pneus agrícolas e que cumpra os objetivos propostos, a solução 1 será suficiente. Esta permite traçar o perfil de um qualquer pneu agrícola a diferentes velocidades, assim como detetar uma sobre-espessura, com um custo baixo, comparativamente com outras soluções.

Este procedimento de medição e detecção apenas será utilizado uma vez por cada família de pneus. Portanto, torna-se essencial garantir um baixo custo no equipamento de medição. No entanto, como foi analisado, existem diferentes soluções que tornam a medição e posterior detecção das emendas mais precisa, por um custo superior. É importante realçar que a este custo ainda será somado o custo por todo o equipamento envolvido no sistema, que poderá já existir na cabine de pintura ou necessitar de ser adquirido.

## 5.5 Análise temporal

Após a escolha do sistema de medição mais adequado para o projeto, é importante estudar a velocidade que mais se adequa para o processo de detecção de emendas e identificação do perfil do pneu. Desta forma, tendo por base os ensaios realizados, será estudada a velocidade máxima para o processo, assim como o tempo necessário para o processo de identificação do perfil e detecção das emendas com essa velocidade.

Na Tabela 5.4 é realizada uma análise temporal ao processo de identificação do perfil, tendo por base os ensaios realizados.

Tabela 5.4 Análise temporal do processo identificação do perfil, para  $\Delta t_{\text{entre medições}} = 240\text{ms}$ .

| $\Delta t_{\text{entre medições}} = 240\text{ms}$ |                          |                               |                    |                                 |
|---------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Perfil                                            | Velocidade linear (mm/s) | Distância entre medições (mm) | Número de medições | $t_{\text{perfil}} \text{ (s)}$ |
|                                                   | 3                        | 0,72                          | 417                | 100                             |
|                                                   | 5                        | 1,2                           | 250                | 60                              |
|                                                   | 8                        | 2                             | 157                | 38                              |
|                                                   | 10                       | 2,4                           | 125                | 30                              |
|                                                   | 20                       | 5                             | 63                 | 15                              |
|                                                   | 30                       | 7,2                           | 42                 | 10                              |
|                                                   | 33                       | 7,92                          | 38                 | 9                               |
|                                                   | 40                       | 10                            | 32                 | 8                               |

A identificação do perfil do pneu, tal como analisado, pode ser realizada a diferentes velocidades, dependendo do número de medições necessário para que seja possível ajustar o ângulo de pulverização das pistolas de pintura. No entanto, como o sensor irá medir a superfície interior de um pneu agrícola, que contém “emendas horizontais”, a velocidade irá depender do processo de detecção das suas emendas. A Tabela 5.5 apresenta os resultados do processo de detecção.

Tabela 5.5 Análise temporal do processo de detecção de uma “emenda vertical”, para  $\Delta t_{\text{entre medições}} = 240\text{ms}$ .

| $\Delta t_{\text{entre medições}} = 240\text{ms}$ |                                            |                                 |                               |                          |                |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------|
| Rotação                                           | Velocidade rotação ( $^{\circ}/\text{s}$ ) | Varrimento da superfície (mm/s) | Distância entre medições (mm) | $t_{\text{rotação}}$ (s) | Deteção emenda |
|                                                   | 2                                          | 10,4                            | 2,5                           | 180                      | Sim            |
|                                                   | 4                                          | 20,8                            | 5                             | 90                       | Sim            |
|                                                   | 6                                          | 31,2                            | 7,5                           | 60                       | Sim            |
|                                                   | 7                                          | 36,3                            | 8,7                           | 51,4                     | Sim            |
|                                                   | 8                                          | 41,5                            | 10                            | 36                       | Sim            |
|                                                   | 10                                         | 51,9                            | 12,5                          | 25,7                     | Não            |
|                                                   | 14                                         | 72,7                            | 17,4                          | 22,5                     | Não            |
|                                                   | 20                                         | 103,8                           | 24,9                          | 18                       | Não            |

Através dos ensaios realizados foi verificado que a velocidade de  $10^{\circ}/\text{s}$ , que corresponde a um varrimento da superfície de  $54\text{mm/s}$ , será a velocidade máxima para a detecção da emenda. No entanto, dado que a emenda tem uma largura de, aproximadamente,  $10\text{mm}$  a detecção não é obtida em todos os ensaios realizados. Portanto esta velocidade não pode ser utilizada para detetar a emenda.

Assim, para a correta detecção da emenda, a distância entre medições consecutivas deverá ser inferior a  $10\text{mm}$ , garantindo sempre pelo menos uma medição na área correspondente à emenda. Por outro lado, como em qualquer projeto, o objetivo será realizar o processo de identificação e detecção o mais rápido possível, dentro dos seus limites, garantindo sempre a medição da emenda. Assim, neste caso, para um pneu de  $300\text{mm}$  de altura e  $595\text{mm}$  de diâmetro, a velocidade máxima aconselhável será de  $6^{\circ}/\text{s}$ , portanto,  $33\text{mm/s}$ . Ora, a esta velocidade, o tempo dispensado para a medição do perfil será, aproximadamente,  $10$  segundos, e para a medição do perímetro completo do pneu o tempo dispensado será de  $60$  segundos.

O tempo de conversão, tal como concluído nos ensaios realizados, condiciona a velocidade do processo e, portanto, o seu tempo de ciclo. Como referido no início dos ensaios, existe a possibilidade de desabilitar as entradas que não são utilizadas neste projeto. Assim, foi estudada a velocidade, sabendo que o tempo de conversão é de  $50\text{ms}$ . É esperado que, para uma mesma velocidade, o número de medições seja superior a um tempo de ciclo inferior.

A Tabela 5.6 apresenta a análise temporal do processo de detecção de emendas, tendo por base os valores obtidos nos ensaios, mas sabendo que o tempo de conversão é de  $50\text{ms}$ .

Tabela 5.6 Análise temporal do processo de detecção de uma “emenda vertical”, para  $\Delta t_{\text{entre medições}} = 50\text{ms}$ .

| $\Delta t_{\text{entre medições}} = 50\text{ms}$ |                                            |                                 |                               |                          |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Rotação                                          | Velocidade rotação ( $^{\circ}/\text{s}$ ) | Varrimento da superfície (mm/s) | Distância entre medições (mm) | $t_{\text{rotação}}$ (s) |
|                                                  | 2                                          | 10,4                            | 0,5                           | 180                      |
|                                                  | 4                                          | 20,8                            | 1,0                           | 90                       |
|                                                  | 6                                          | 31,2                            | 1,6                           | 60                       |
|                                                  | 8                                          | 41,5                            | 2,1                           | 45                       |
|                                                  | 10                                         | 51,9                            | 2,6                           | 36                       |
|                                                  | 20                                         | 103,8                           | 5,2                           | 18                       |
|                                                  | 30                                         | 155,8                           | 7,8                           | 12                       |

Como é possível ver, a uma velocidade de  $6^{\circ}/\text{s}$ , a distância entre medições é cinco vezes inferior à obtida com um tempo de conversão de 240ms. Assim, para um tempo de conversão de 50ms, a velocidade será cinco vezes superior à obtida com um tempo de 240ms, para a mesma distância entre medições. Neste caso, o tempo necessário para medir o perfil são, aproximadamente, 2 segundos e o tempo de rotação 18 segundos.

Por outro lado, dado que seria aconselhável, tal como referido ao longo deste documento, utilizar o modo de comunicação isócrono (*Isochronous Real Time*), foi estudada a velocidade caso o módulo de entradas analógicas fosse de uma gama superior. O módulo de entradas analógicas AI 2X I 2/4Wire HF (*High Feature*) foi o equipamento escolhido para esta análise comparativa, uma vez que é da família do módulo utilizado, mas de elevada performance. Este pode ser aplicado no módulo ET200SP, permite comunicação isócrona e um menor tempo de conversão.

As suas características principais, relevantes para este estudo, são apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Características do módulo de entradas analógicas AI 2 X U/I 2, 4Wire HF.

|                                                                |                                                     |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Tempo de integração (ms)                                       | 67.5/22.5/18.75/10/5/2.5/1.25/ <b>0.625</b>         |
| Tempo de conversão básico incluindo o tempo de integração (ms) | 68.03/22.83/19.03/10.28/5.23/2.68/1.43/ <b>0.73</b> |
| Tempo de conversão (ms)                                        | 68.2/23/19.2/10.45/5.40/2.85/1.6/ <b>0.9</b>        |

Sabendo que,

$$\text{Tempo básico de conversão} = \text{Tempo de integração} + \text{Tempo de conversão integral}$$

$$\text{Tempo de conversão} = \text{Tempo básico de conversão} + \text{Tempo de processamento do valor medido}$$

Para o tempo mínimo de conversão disponível de 0,9ms, o intervalo de tempo entre medições será de, aproximadamente, 4ms, uma vez que este módulo tem 4 entradas analógicas disponíveis e todas são configuradas de igual forma.

Após a obtenção do tempo de conversão deste módulo, é possível comparar as duas soluções de módulos de entradas analógicas e o impacto que este equipamento tem no tempo de ciclo do processo de medição do perfil e de uma emenda.

Assim, foi realizada uma análise temporal ao processo de detecção de uma “emenda vertical”, com um tempo de conversão de 4ms. O seu resultado é apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Análise temporal do processo de detecção de uma “emenda vertical”, para  $\Delta t_{\text{entre medições}} = 4\text{ms}$

| $\Delta t_{\text{entre medições}} = 4\text{ms}$ |                                            |                                 |                               |                          |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Rotação                                         | Velocidade rotação ( $^{\circ}/\text{s}$ ) | Varrimento da superfície (mm/s) | Distância entre medições (mm) | $t_{\text{rotação}}$ (s) |
|                                                 | 2                                          | 10                              | 0,04                          | 180,0                    |
|                                                 | 4                                          | 21                              | 0,08                          | 90,0                     |
|                                                 | 6                                          | 31                              | 0,12                          | 60,0                     |
|                                                 | 8                                          | 42                              | 0,17                          | 45,0                     |
|                                                 | 10                                         | 52                              | 0,21                          | 36,0                     |
|                                                 | 20                                         | 104                             | 0,42                          | 18,0                     |
|                                                 | 200                                        | 1038                            | 4,15                          | 1,8                      |
|                                                 | 360                                        | 1869                            | 7,48                          | 1,0                      |

Para uma mesma distância entre medições, garantindo assim a detecção de uma emenda, com o módulo de entradas analógicas de alta performance a velocidade máxima será de  $360^{\circ}/\text{s}$  ( $1869\text{mm}/\text{s}$ ). Com esta velocidade o tempo necessário para identificar o perfil é de 0,15s e 1s para a detecção de uma “emenda vertical”.

É importante referir que este estudo é teórico, portanto, será necessário testar esta solução.

A Tabela 5.9 permite comparar, de uma forma mais clara, a diferença entre o tempo do processo de identificação do perfil do pneu e de detecção de uma “emenda vertical” (rotação), com os diferentes módulos de entradas analógicas.

Tabela 5.9 Comparação da análise temporal com diferentes módulos de entradas analógicas.

|                           | Tempo perfil (s) | Tempo de uma rotação (s) |
|---------------------------|------------------|--------------------------|
| Módulo AI 2xI 2/4-wire ST | 10               | 60                       |
| Módulo AI 2X I 2/4Wire HF | 0,15             | 1                        |

Com esta análise comparativa, conclui-se que, caso se utilizasse o módulo de entradas analógicas AI 2X I 2/4Wire HF o tempo de ambos os processos (identificação do perfil e detecção de uma “emenda vertical”) seria reduzido em 60 vezes. No entanto, o custo deste equipamento é muito superior ao atualmente utilizado. Ora, para este projeto o objetivo será uma solução de custo reduzido. No entanto, caso esteja disponível um módulo de alta performance na cabine de pintura ou caso se verifique que o tempo ganho com esta solução compensa o investimento, este equipamento será uma ótima solução.



## **6 Desenvolvimento da solução de controlo**

O presente capítulo pretende especificar, detalhadamente, o funcionamento da solução final proposta, para que sejam cumpridos os objetivos inicialmente definidos. Portanto, serão apresentadas, primeiramente, as considerações que foram tidas em conta para desenvolver esta solução. Posteriormente, é exposto o desenvolvimento do controlador com a respetiva justificação para a sua aplicação.

Também neste capítulo são descritas as principais funções utilizadas para o controlo do sistema, através do ambiente de programação TIA Portal, assim como a interface Homem-Máquina criada.

### **6.1 Considerações iniciais**

Como tem sido referido ao longo deste documento, as dimensões de um pneu agrícola são elevadas sendo, portanto necessário, antes de idealizar o funcionamento do sistema, ter em consideração diferentes fatores, como:

- Tempo necessário para que o sistema de medição cumpra os objetivos pretendidos;
- Memória exigida ao controlador para que seja possível guardar os dados recolhidos pelo sistema de medição;

De seguida será apresentada a análise realizada, de forma a considerar todos estes fatores e criar a solução mais rápida e eficiente.

#### **6.1.1 *Tempo de ciclo***

Após a escolha do sensor mais indicado para o projeto, será feita uma análise temporal ao processo de medição da superfície do pneu, para que seja estimado o tempo de ciclo da solução a desenvolver. Este estudo é fundamental para a elaboração de uma solução de controlo eficiente.

Uma vez que esta solução tem como objetivo a integração na cabine de pintura, será estimado o tempo de ciclo do processo de identificação do perfil e detecção das emendas de um pneu agrícola. Tendo por base os resultados obtidos nos ensaios elaborados foi calculada, primeiramente, a velocidade e, posteriormente, o tempo de ciclo do sistema. Para tal, foram considerados os parâmetros descritos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Variáveis para o cálculo do tempo de ciclo do processo.

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Diâmetro do pneu          | 2200 mm |
| Altura do pneu            | 1000 mm |
| Largura da emenda         | 15 mm   |
| Sobre-espessura da emenda | 3 mm    |
| Distância entre medições  | 12 mm   |

A largura da sobreposição de uma tela têxtil é um valor parametrizado. No entanto, como não é conhecido o seu valor para pneus agrícolas, foi dado, por defeito, a largura de 15mm. Relativamente à distância entre medições, esta foi estimada tendo por base os ensaios anteriores e sabendo que o tempo entre medições será de 240ms.

Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados obtidos para o cálculo da velocidade e do tempo necessário para o processo de medição da superfície de um pneu agrícola (identificação do perfil e detecção de uma “emenda vertical”).

Tabela 6.2 Tempo de ciclo do processo

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| Velocidade linear do pneu     | 50mm/s    |
| Velocidade de rotação do pneu | 2,6°/s    |
| Tempo perfil                  | 20 s      |
| Tempo uma rotação             | 2:30 min  |
| Tempo para 7 rotações         | 16:12 min |

Com os resultados obtidos acima, o tempo de ciclo da solução, caso seja medida toda a área interior do pneu é extremamente elevado para o objetivo do projeto. Assim, foi estudado onde se poderia diminuir o tempo de ciclo, para que a solução fosse o mais rápida possível, cumprindo os objetivos.

Por conseguinte, foi estudada uma forma onde não seria necessário medir toda a superfície interior do pneu. Ora, entre duas “emendas horizontais” apenas existe uma “emenda vertical” e, para a localização das “emendas horizontais” será suficiente traçar o perfil do pneu a uma velocidade que permita a sua detecção. Assim, após a obtenção do perfil, serão calculadas posições para a colocação do pneu, para que o sensor se encontre sempre entre as duas “emendas horizontais”, de forma a detetar a “emenda vertical”. Este processo é descrito com maior detalhe no ponto 6.2.

Com esta abordagem ao problema, sabendo que um pneu agrícola tem, no máximo 6 “emendas horizontais” (7 “emendas verticais”), o tempo de ciclo máximo, com o sensor LE550IQ será de 18:42 minutos.

### 6.1.2 Memória disponível no PLC

A quantidade de valores analógicos medidos pelo sensor, que serão guardados em cada ciclo no PLC, é bastante elevada. Portanto, é essencial analisar a capacidade de memória do PLC para armazenar esta quantidade de dados recolhidos.

As seguintes equações permitem calcular o número de medições necessárias para recriar o perfil e realizar uma rotação,

$$\text{Número de medições no perfil} = \frac{\text{Altura do pneu}}{\text{Distância entre medições}}$$

$$\text{Número de medições por rotação} = \frac{\text{Perímetro do pneu}}{\text{Distância entre medições}}$$

A memória do PLC está dividida em dois grandes grupos, sendo que 1MB é utilizado para memória de dados e 150kB para memória do programa a desenvolver. Assim sendo, existe um limite máximo de memória para o armazenamento de dados na CPU, quer isto dizer que, há um limite de memória para guardar as medições do sensor.

Uma vez que é essencial armazenar todos os dados obtidos pelos sistemas de medição, torna-se fundamental estudar a capacidade do PLC, caso seja necessário utilizar um cartão SIMATIC com mais capacidade de memória.

Os dados recolhidos pelo sensor são *floating points*, isto é, são valores reais com vírgula flutuante, portanto ocupam um espaço correspondente a 4 Bytes. Caso a análise dos dados seja feita neste formato e sabendo que a memória do PLC tem capacidade para 104 8576 bytes, existe um limite máximo de 262 144 medições a recolher.

Considerando as variáveis utilizadas no ponto anterior (Tabela 6.1), foi calculado o número de medições esperado para as condições apresentadas

Como concluído anteriormente, não será percorrida toda a superfície interior do pneu. Portanto, será considerado que este tem, como pior cenário possível, 6 “emendas horizontais”.

Assim, no caso de existirem 6 emendas, será traçado o perfil do pneu e serão feitas 7 rotações ao pneu para que seja feita a detecção das suas “emendas verticais”. Tendo por base os ensaios realizados e garantindo o pior caso possível, a velocidade linear do perfil a considerar será 50 mm/s, que corresponde a uma velocidade de rotação de 2,6°/s. Assim, o número de medições ao traçar o perfil será, aproximadamente, 84 e por rotação 576, sendo no total guardadas 4116 medições, o que garante que a capacidade atual da CPU é suficiente para analisar os dados como *floating points*.

## 6.2 Desenvolvimento do controlador

O presente projeto não foi testado na cabine de pintura, uma vez que esta já não se encontra na empresa. No entanto, visto que este irá ter continuidade, foi criada uma solução com o intuito de ser testada, no futuro, nesta máquina. Assim, esta considera dois eixos da ferramenta que suporta o pneu na cabine de pintura e o sensor LE550IQ da Banner.

Para o desenvolvimento e programação do controlador que possibilita a comunicação e coordenação entre os dois eixos de movimento e o sensor, foi necessário ter em atenção diferentes requisitos do sistema em causa, como:

- Minimizar o tempo de utilização do sistema de medição, pelas razões apresentadas acima. Portanto, primeiramente será recriado o perfil do pneu, e assim também se obtém a localização das suas “emendas horizontais”. Depois, o pneu será colocado de

forma a que sejam localizadas as suas “emendas verticais”, garantindo assim uma solução rápida e eficiente;

- As velocidades da ferramenta a controlar devem ser fixas e definidas com base nos ensaios realizados. No entanto, como o projeto deverá ainda ser testado na cabine de pintura, no modo manual ou teste será possível variar a velocidade, de forma a possibilitar a realização de mais ensaios com o sensor;
- O controlo do sistema deverá, primeiramente, posicionar a ferramenta em relação ao sistema de medição, fixando um ponto de referência. Assim, o sistema inicia com a ativação dos motores da ferramenta e posterior colocação dos eixos na sua posição zero;
- Após uma rotina, a ferramenta deverá voltar sempre para a posição inicialmente definida.

Quando o sensor é ativado, o sistema deverá:

- Guardar todas as medições que permitem recriar o perfil ou o perímetro do pneu;
- Na deteção de uma “emenda horizontal”, ser guardada a sua posição em relação ao eixo vertical;
- Calcular as coordenadas para a movimentação do pneu, assim como garantir o seu correto posicionamento.
- Na deteção de uma “emenda vertical”, ser guardada a sua posição em relação ao código de barras e a sua posição no eixo vertical;

No caso de ocorrer um erro, ou ser acionado o botão de emergência, o sistema deverá responder da seguinte forma:

- A atuação do botão de emergência deverá parar todo o sistema, desativando assim todas as saídas. Este evento deve ainda ativar uma sinalização na HMI, que apenas é desativada com a identificação da emergência, resolução do problema, seguido da desatuação do botão e posterior ativação do botão de rearme;
- Caso ocorra um erro (ou falha) esta é identificada na HMI. Quando esta é solucionada e identificada o sistema continua a sua sequência. Estes erros são listados e analisados no subcapítulo 6.2.1.

Tendo por base os requisitos descritos, foram desenvolvidos quatro *Grafkets* hierarquicamente diferenciados (Figura 6.1) para especificar o controlo do sistema.

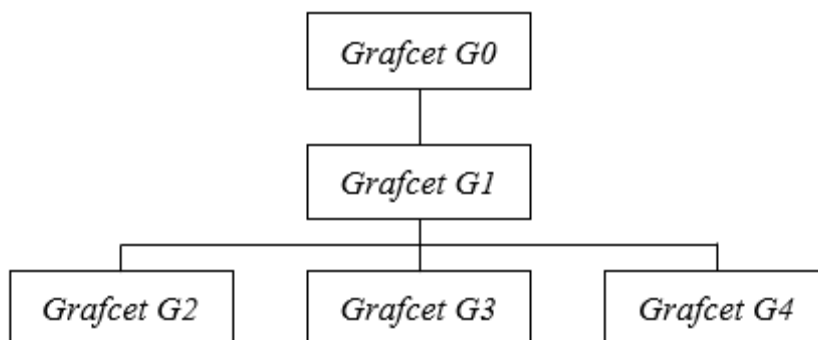


Figura 6.1 Hierarquização dos *Grafkets* que especificam o controlador.

A cada *Grafcet* foi atribuído o controlo sobre uma dada função, que são discriminadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Funções dos diferentes *Grafcets* desenvolvidos.

| <i>Grafcet</i> | Função                                                                       |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| G0             | Supervisão e segurança do sistema                                            |
| G1             | Gestão dos diferentes modos de funcionamento do sistema                      |
| G2             | Controlo do sensor, conversão e filtragem das medições e detecção de emendas |
| G3             | Guardar medições e detetar emendas                                           |
| G4             | Calcular posições do pneu para a medição das “emendas verticais”             |

A hierarquização entre o *Grafcet* 1 e os *Grafcet* 2, 3 e 4 é definida por três variáveis booleanas: “Sensor On”, “GuardarMedições” e “CalcularPosições”. Relativamente aos *Grafcet* 1 e 0, este último permite a inicialização do *Grafcet* 1.

### 6.2.1 Supervisão e segurança

O *Grafcet* G0 é responsável pela supervisão e segurança geral do sistema e pode ser consultado, tal como todos os *Grafcets* elaborados, no Anexo E. Está dividido em quatro etapas/momentos:

1. Inicialização do *Grafcet* 1;
2. Estado de “corrida” do sistema, onde os motores estão habilitados e o processo decorre conforme o configurado;
3. Paragem de emergência, que desativa todas as saídas do *Grafcet* 1;
4. Paragem por erro ou falha, que desativa todas as saídas do *Grafcet* 1;

As condições de emergência e falha são idênticas, apenas variando na sua consequência. Em caso de emergência o sistema deverá reiniciar, inicializando todos os *grafcets*, e em caso de falha tal não será necessário, podendo voltar à etapa onde se encontrava.

### Emergência

Com este *Grafcet* será possível controlar todo o sistema, caso exista uma emergência ou um erro. Como referido anteriormente, não foi possível testar todos os equipamentos intervenientes na solução final, como o caso de um botão da emergência. No entanto, o cenário da sua atuação foi estudado e programado.

Assim, quando for atuado o botão de emergência, todas as saídas do *Grafcet* 1 serão desativadas. Em paralelo, deverá aparecer na interface criada uma janela de aviso de emergência. Esta apenas fechará quando o botão for reposto na sua posição de não atuado e o botão de rearme pressionado. Posteriormente, será feito o reconhecimento do sucedido para que o sistema volte a inicializar. Por segurança, após uma emergência, a situação ideal seria inicializar o sistema com a colocação dos eixos na posição de referência ou *Home*, de forma

manual. No entanto, não foi possível testar um cenário de emergência, apenas de uma forma simulada em ambiente virtual.

## Erros

No caso de uma falha ou erro, as saídas do *Grafcet G1* serão também desativadas. No entanto, após a sua resolução o sistema tem um comportamento diferente. Neste caso, na interface, aparecerá um sinal vermelho a piscar, que indica a existência de um erro assim como a informação da sua causa. Ao pressionar o botão “Erros” será possível analisar a sua causa e, posteriormente à sua resolução, continuar o processo sem que seja necessário colocar os eixos na posição *Home*.

As situações estudadas, que provocam este tipo de alarme, são de seguida enumeradas e descritas:

1. Erro no controlo de movimento – caso seja verificado um erro nos servomotores.
2. Erro no módulo de entradas analógicas – caso haja uma falha no módulo por avaria, erro de ligação elétrica entre outras.
3. Erro na calibração do sensor – caso as medições obtidas não estejam dentro da gama de medição do sensor (entre 100 e 1000mm).
4. Erro de medição - caso seja medida a ferramenta de suporte, quando o pneu se movimentava verticalmente.

Em todos os casos, na interface a desenvolver deverá ser visível o alarme ativado, assim como a sua descrição.

### 6.2.2 Modo de funcionamento

O *Grafcet G1* permite gerir os diferentes modos de funcionamento do sistema. Como não será possível testar a solução final de controlo na cabine de pintura, onde será adicionado o sistema, foram desenvolvidos dois modos de funcionamento distintos para que, posteriormente, sejam feitos novos ensaios ao sensor escolhido e à solução de controlo criada:

- Modo automático;
- Modo manual ou modo teste.

O modo automático foi desenvolvido com uma perspetiva futura, quando todos os equipamentos estiverem na cabine de pintura e o sistema de medição já tenha sido testado nesta máquina. Portanto, foi criado para que funcionasse de forma automática (sem a intervenção do utilizador). Através do controlo dos servomotores da ferramenta, da análise e do tratamento das medições obtidas. As velocidades, neste caso, são um parâmetro da máquina e têm por base os ensaios realizados. Assim, neste modo será traçado o perfil, a medição e posterior detecção de todas as suas emendas, de uma forma contínua. Neste modo o utilizador interage com o sistema da seguinte forma:

- Ordem de início ou pausa;
- Acesso aos resultados obtidos (perfil, localização das emendas e dimensões do pneu).

Em contrapartida, o modo manual foi pensado para refazer os ensaios anteriormente analisados, mas no ambiente onde será inserido o sistema (cabinas de pintura). Assim, será

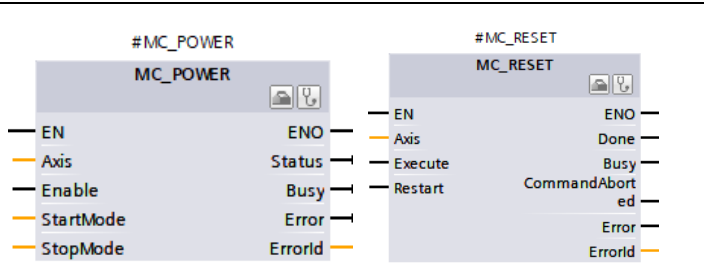
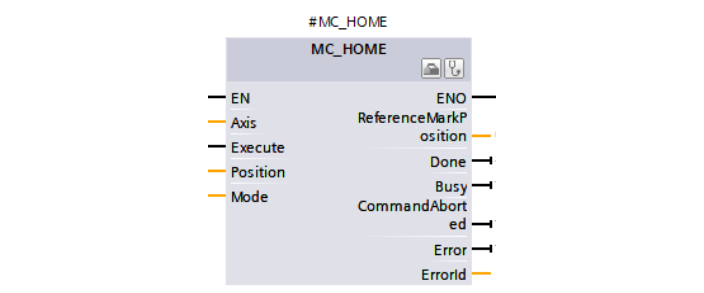
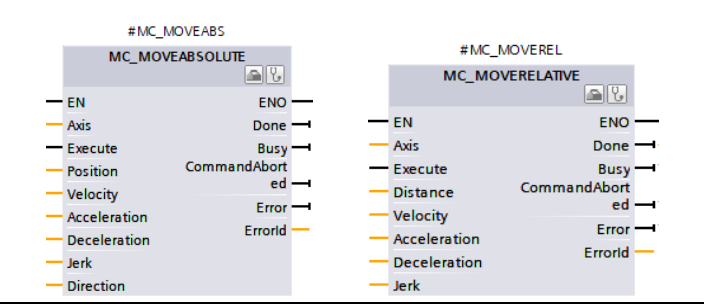
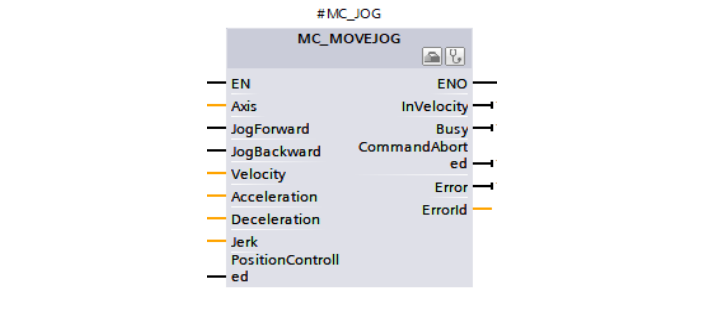
possível testar a solução de controlo de movimento e de medição. No entanto, de forma a garantir que este modo realiza o pretendido foi simulado com o equipamento disponível.

É importante referir que antes de escolher o modo de funcionamento do sistema será sempre necessário definir a posição zero (*Home*) do eixo linear e o de rotação. Esta definição é feita através da interface desenvolvida, que será descrita posteriormente. Este *Grafset G1* pode ser consultado no Anexo E.

Dado que o tempo de aquisição e processamento das medições é superior ao esperado, foi criada uma solução que permite reduzir o tempo de ciclo do processo, cumprindo com todos os objetivos.

Para criar esta solução de controlo foi necessário estudar, primeiramente, as ferramentas disponíveis na aplicação informática da Siemens para o controlo de movimento. Estas estão disponíveis em: “*Instructions*” > “*Tchnology*” > “*Motion Contro*”. Estas são apresentadas e descritas na Tabela 6.4 .

Tabela 6.4 Instruções utilizadas para o controlo dos servomotores.

|                                                                                                                                                                                      |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>MC_Power: permite habilitar e desabilitar um eixo.</p> <p>MC_Reset: faz reset e reconhece todos os erros associados ao eixo.</p>                                                  |   |
| <p>MC_Home: define um ponto de referência. Desta forma o sistema de posicionamento mecânico do eixo é sincronizado com o sistema de coordenadas do controlador.</p>                  |  |
| <p>MC_MoveAbsolute: posiciona o eixo numa posição absoluta, em relação à posição <i>Home</i>.</p> <p>MC_MoveRelative: inicia o movimento do eixo em relação à sua posição atual.</p> |  |
| <p>MC_MoveJog: controlo do eixo através de diferentes parâmetros.</p>                                                                                                                |  |

O modo manual possibilita traçar o perfil do pneu, a uma velocidade introduzida pelo operador, dentro dos limites impostos para o servomotor, assim como localizar uma “emenda vertical”. Neste caso, será necessário colocar o pneu, de forma manual, numa posição superior em relação ao sensor. Este posicionamento é feito através da interface desenvolvida.

Este modo foi pensado para concretizar os ensaios realizados, isto é, fazer os mesmos ensaios, mas guardando as medições para cálculos de posição, dimensionamento do pneu em estudo, identificando o seu perfil, localizar as suas emendas e analisar o controlo de movimento desenvolvido. Este controlo é essencial, visto que, depende das medições obtidas, e permite cumprir com os requisitos propostos.

Neste modo, é possível realizar estes dois processos de forma independente. Assim, por um lado pode ser realizado o processo de identificação do perfil, que consiste no movimento descendente do pneu, desde uma posição zero, até ser realizada a última medição do perfil.

O movimento do pneu deve parar por uns segundos, quando é feita a primeira medição, e a sua posição deverá ser guardada como a posição inicial para a medição do perfil do pneu. De seguida, o pneu volta a descer linearmente e o sensor faz as medições necessárias para identificar o seu perfil e detetar as suas “emendas horizontais”. Este movimento descendente termina quando o sensor deixa de medir - a sua gama de medição é ultrapassada - e o pneu volta à sua posição inicial. De seguida, o ensaio pode ser realizado novamente, ou realizar o processo de deteção de uma “emenda vertical”.

Caso se pretenda medir uma emenda, como este modo é direcionado para realizar ensaios ao sensor de distância, de seguida, o pneu deve ser colocado de forma a que o sensor esteja na altura do pneu que permita a medição de uma emenda. Colocando o eixo de rotação na sua posição zero, é ativado o sensor. Posteriormente, o pneu roda 360° permitindo a medição de todo o seu perímetro. Desta forma é feita a deteção de uma “emenda vertical”. Caso se pretenda realizar outro ensaio, o pneu deverá ser movido manualmente para uma outra posição, onde o sensor consiga realizar a medição do seu perímetro ou iniciar o processo de identificação do perfil.

No modo automático a identificação do perfil e deteção das “emendas horizontais” é idêntica à do modo manual. No entanto, após este processo, são calculadas as posições nas quais o pneu deve ser colocado para a medição e deteção das “emendas verticais”. Este cálculo tem em consideração a localização das “emendas horizontais”, uma vez que, entre duas “emendas horizontais”, obrigatoriamente, existe uma “emenda vertical”. Estes cálculos são expostos e explicados no ponto 6.2.3. Após este cálculo, o pneu desloca-se, automaticamente para a primeira posição calculada e roda 360°. Este processo repete-se até à última posição calculada.

Tal como referido anteriormente, este *Grafset* comportamental está representado no Anexo E.

### **Ensaio realizados – simulação eixo linear e de rotação**

Para estudar, detalhadamente, a solução de controlo de movimento foi utilizado o simulador disponível no TIA Portal (PLC SIM). Através desta ferramenta será possível analisar a dinâmica do motor e o tempo despendido entre as ordens de ativação e paragem de um movimento e a sua realização.

O comportamento dinâmico do motor é uma característica bastante importante para este projeto, uma vez que é exigida uma velocidade exata e constante ao longo da medição do perfil e perímetro de um pneu. Apenas desta forma é garantida a medição de toda a superfície e a deteção de todas as emendas.

Assim, para analisar o tempo de aceleração, desaceleração e qual o impacto que estes podem ter ao traçar o perfil de um pneu e detetar as suas emendas, foi traçado o perfil de velocidade linear em função do tempo, para uma velocidade de 60 rpm - Figura 6.2.

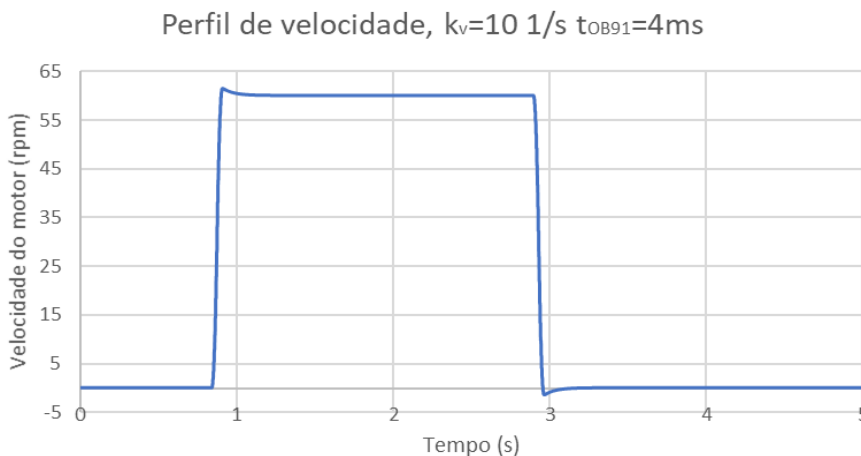


Figura 6.2 Perfil de velocidade obtido para os valores predefinidos.

Este ensaio foi obtido mantendo os valores predefinidos pela aplicação informática para o controlo de movimento dos eixos dos servomotores:

- Ganho ( $K_v$ ) de  $10 \text{ s}^{-1}$ ;
- Tempo de ciclo da OB91 de 4ms - OB associada ao controlo de movimento.

O ganho é definido pela equação:

$$K_v = \frac{\text{Velocidade}}{\text{Posição atual} - \text{Posição real do servomotor}}$$

Como é possível observar, o tempo despendido para a aceleração e desaceleração do servomotor até que este chegue à velocidade pretendida é de, aproximadamente, 0,2 s. Este valor é inferior ao intervalo de tempo entre duas medições consecutivas. Portanto será desprezável.

O perfil de velocidades do eixo de rotação é em tudo semelhante ao apresentado para o eixo linear, portanto será também desprezável o tempo despendido na aceleração e desaceleração deste servomotor.

O intervalo de tempo entre a leitura de uma entrada e a atualização de uma saída (tempo de ciclo do autómato) é um outro parâmetro importante a ser estudado, uma vez que o controlo de movimento, neste projeto, é dependente dos valores medidos pelo sensor. Esta temática pode ser recordada no ponto 4.1.2 O tempo de ciclo depende:

- Programa;
- Tempo de ciclo do barramento;
- Tempo de ciclo dos módulos de entrada/saída;
- Tempo de aquisição do sistema de medição.

Para a análise do intervalo de tempo entre uma ordem, neste caso, dependente do valor medido pelo sensor, e a ativação/paragem efetiva de um servomotor, foi simulado o processo de identificação do perfil de um pneu.

Para tal, foi traçada a posição do pneu ao longo de um ciclo de perfilagem, assim como a distância medida pelo sensor. Este ensaio está representado na Figura 6.3.

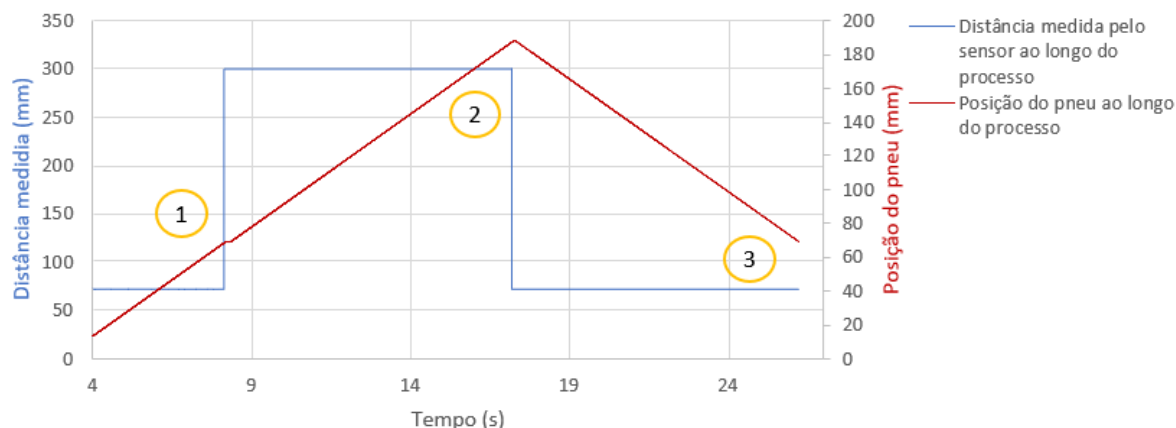


Figura 6.3 Posição do pneu e distância medida pelo sensor, ao longo do processo de identificação do perfil de um pneu.

No gráfico apresentado acima, é possível analisar as diferentes etapas do processo de identificação do perfil de um pneu, desenvolvido pelo autor. Primeiramente, tal como explicado acima, o pneu inicia o seu movimento, a uma velocidade constante, até que o sensor concretize a sua primeira medição, ponto 1. Neste ponto, existe uma alteração nas medições obtidas pelo sensor, passando do seu valor de *overflow* (71mm) para um valor dentro da sua gama de medição, neste caso 300mm. É neste instante que começa a medição do perfil.

O intervalo de tempo entre a primeira medição do sensor e a paragem efetiva do movimento do pneu é de, aproximadamente, 80ms (ponto 1). Ora, este intervalo de tempo corresponde a um dado deslocamento do pneu, dependente da velocidade imposta. No entanto, tal como analisado no início do capítulo, a distância entre medições será sempre próxima de 10mm, sendo que este valor corresponde a um tempo de 240ms. Portanto, para 80ms, o erro na medição do pneu será menor que 10mm. Uma vez que os pneus em estudo são agrícolas, com alturas até 1m, a não medição de 10mm de um extremo do seu perfil não é significativa.

Após a medição de todo o perfil, ponto 2, o sensor torna a estar fora da sua gama de medição. Portanto, o pneu deverá movimentar-se no sentido oposto, para que alcance a posição inicial (ponto 3), obtida no ponto 1. Mais uma vez, o intervalo de tempo entre a resposta do sensor e o início do movimento do pneu é de 80ms.

Concluindo, o intervalo de tempo de 80ms entre uma ordem e a ativação/paragem efetiva de um servomotor, não irá influenciar os resultados finais de identificação do perfil de um pneu agrícola.

### 6.2.3 Controlo sensor e deteção de emenda

O *Grafcet G2* é responsável pela ativação do sensor, garantir a normalização dos valores medidos, o seu escalonamento, posterior derivação e, conseqüentemente, a deteção de emendas.

Primeiramente é feita a normalização e escalonamento da medição através das seguintes equações:

$$Valor\ normalizado = \frac{Medição - MIN}{MAX - MIN}$$

$$Distância\ medida\ [mm] = [Valor\ normalizado \times (MAX' - MIN')] + MIN'$$

Os valores mínimos e máximos presentes nas equações são os utilizados nos blocos descritos no subcapítulo 5.1.3.

Para calcular a derivada das medições, foi feita a diferença entre os dois valores medidos, uma vez que o intervalo de tempo entre todas as medições é sempre o mesmo e imposto na programação.

Ora, após o cálculo da diferença, este valor será sempre comparado com um valor de referência:

$$Valor\ referência = Sobre-espessura\ da\ emenda - Repetibilidade\ do\ sensor$$

Caso a diferença seja superior a este valor de referência é detetada uma emenda, quer seja uma “emenda vertical”, quer seja horizontal.

O valor referência poderia ser simplesmente a dimensão da sobre-espessura da primeira tela a ser colocada. No entanto, como qualquer sensor tem associado um valor de repetibilidade, que provoca um erro de medição, este tem de ser considerado.

Neste Grafset é também considerada a possibilidade de o sensor medir a ferramenta que suporta o pneu. Assim, caso a diferença seja superior a 10mm, um alarme deverá ser ativado.

Para a programação desta solução de controlo, foi necessário introduzir algumas particularidades, como a interrupção do ciclo do PLC em intervalos de tempo constantes, de forma a que as medições do sensor fossem sempre analisadas e guardadas.

Esta interrupção periódica no tempo, é obtida através de um *Cyclic Interrupt* – temática descrita no subcapítulo 4.1.2.

#### 6.2.4 Procedimento medições obtidas

Garantir que todas as medições obtidas durante um ciclo de funcionamento são guardadas é fundamental. Estes valores irão permitir o posicionamento do pneu durante os diferentes momentos do processo, o cálculo das dimensões do pneu e a localização das suas emendas. Assim, foi criado um *Grafset* que garante que todas estas medições são guardadas em *Arrays*.

Para o cálculo das dimensões do pneu, quando suspenso numa ferramenta, são utilizados os valores medidos para traçar o perfil do pneu e as suas posições ao longo do processo:

$$Diâmetro\ interno = Primeira\ medição \times 2$$

$$Diâmetro\ externo = Medição\ no\ centro\ do\ pneu \times 2$$

$$Altura = Posição\ inicial\ do\ pneu - Posição\ final\ do\ pneu$$

### 6.2.5 Cálculo de posições

Por fim, após traçar o perfil de um pneu é necessário, tendo em consideração a localização das suas “emendas horizontais”, calcular as posições a que deverá ser colocado o pneu. O sensor irá medir todo o perímetro, nessa posição, detetando assim as “emendas verticais” do pneu. Para tal, foi desenvolvido o Grafcet G4.

Este cálculo, tal com referido, depende do número de “emendas horizontais” e da sua localização. No entanto, a primeira e última posição a calcular diferenciam-se das restantes, uma vez que dependem também da posição inicial e final do pneu.

Considerando que,

$$\text{Número de posições} = n$$

$$1 \leq i < n$$

Para o cálculo da primeira e última posição, são aplicadas as seguintes equações:

$$\text{Posição}[1] = (\text{Posição Emenda Horizontal}[1] - \text{Posição Inicial})/2$$

$$\text{Posição}[n] = \frac{\text{Posição Final} - \text{Posição Emenda Horizontal}[n-1]}{2} + \text{Posição}[n-1]$$

Para o cálculo das restantes posições,

$$\text{Posição}[n-i] = \frac{\text{Posição Emenda Horizontal}[n-i+1] - \text{Posição Emenda Horizontal}[n-i]}{2} + \text{Posição Emenda Horizontal}[n-i+1]$$

Todas as posições são calculadas para que o movimento do pneu seja relativo, isto é, será sempre dependente da sua posição atual. Assim, a primeira posição é calculada sabendo que o pneu se encontra na posição inicial, a segunda posição irá depender da primeira calculada e assim sucessivamente até à última posição.

## 6.3 Desenho e programação da interface

Na sequência do desenvolvimento e explicação do comportamento do sistema e, visto que, diversos comandos são obtidos pela interação do utilizador, através da HMI, será agora descrita a programação desta interface, assim como o seu desenho.

### 6.3.1 Especificações

Inicialmente, para a criação da interface foi necessário cumprir com diversas exigências, segundo a norma ISO 11064-5, como:

- Utilizar sempre as mesmas cores e estas devem ser neutras, como cinza, por exemplo;
- Cumprir código de cores;

- Manter fixa a posição dos elementos padrão do *template*, como logótipos e título do sistema;
- Manter consistente os comandos de navegação, como por exemplo, ecrã de erros, principal ou de motores.

Posteriormente, tal como no desenvolvimento dos *Graficets* comportamentais apresentados, é essencial descriminar os requisitos pretendidos nesta interface:

- Introduzir dados essenciais ao sistema, como a sobre-espessura da emenda a medir;
- Possibilitar a habilitação e colocação na posição zero dos servomotores;
- Permitir a seleção do modo de funcionamento que se pretende utilizar;
- Inicializar o sistema (*Start*);
- Após traçar o perfil de um pneu este ser visível no ecrã para análise;
- Apresentar as dimensões do pneu e localização de emendas, após cada ciclo de funcionamento;
- Possibilitar a visualização de informação relativa aos servomotores;
- Ter janelas de informação que descriminem o pretendido em diferentes situações;
- Visualizar o estado dos motores e sensor;
- Incluir mensagens, de forma a tornar mais intuitiva a utilização da interface;
- Sinalizar, apropriada, em caso de emergência ou erros;
- Histórico de erros;

De forma a cumprir com todos os requisitos apresentados foi desenvolvida a interface, tal como apresentado na Figura 6.4.

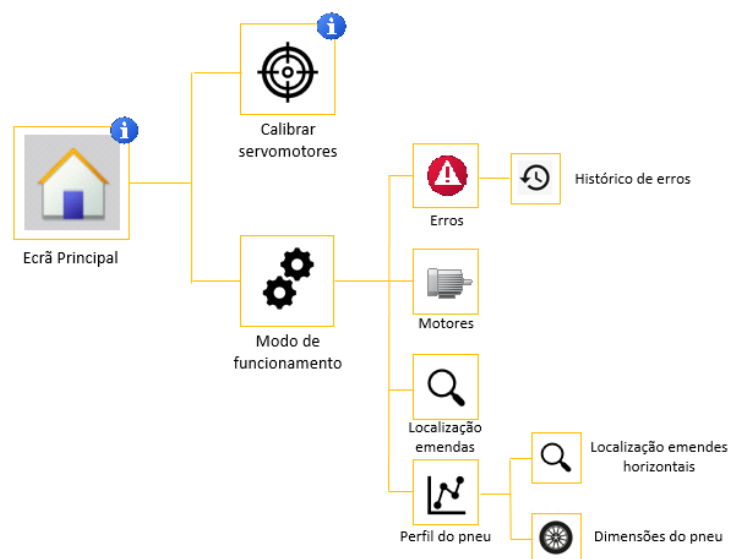


Figura 6.4 Árvore de ecrãs da interface desenvolvida.

A árvore representada expõe os ecrãs desenhados, assim como as *pop-up* criadas, de forma a cumprir os requisitos apresentados anteriormente. Os ecrãs são desta forma dispostos, uma vez que, para um primeiro ciclo é sempre necessário definir a posição zero dos eixos e a cada ciclo de funcionamento são obtidas variadas informações, como medições e localizações. Estas, de forma a tornar a interface mais organizada, são observáveis em diferentes ecrãs.

Foi também idealizada uma janela de emergência, para quando for ativado o botão de emergência, que se sobrepõe a qualquer outra.

### 6.3.2 Programação

Toda a interface foi programada e desenhada em *WinCC* (*TIA Portal*). Este permite a criação de diversos objetos, elementos e controlos, disponíveis na *toolbox* do programa, que possibilitaram o desenvolvimento de toda a interface.

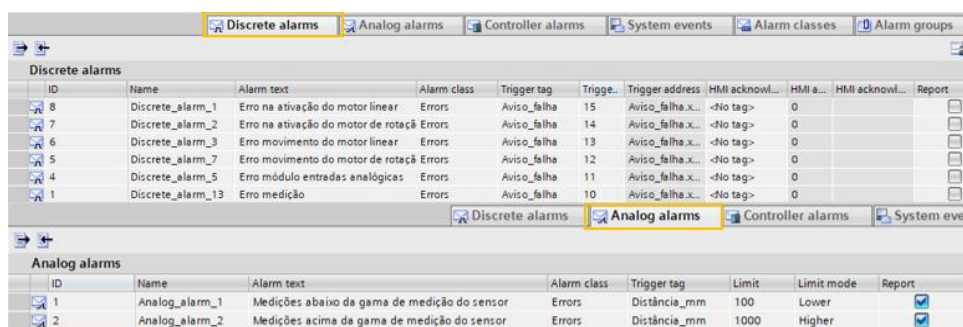
### Sincronização data e hora

Dado que a HMI utilizada não inclui relógio, será necessário sincronizar a data e hora do PLC com este equipamento. Esta sincronização é conseguida através de diferentes ferramentas disponíveis tanto do lado do PLC como da HMI.

A comunicação é feita de forma cíclica, portanto, a cada 2s a HMI adquire os valores de data e hora do PLC.

### Declaração de alarmes

O *WinCC* contém também uma função para supervisão de erros e posterior alarme, o que foi utilizado para definir os erros discriminados no subcapítulo anterior. Desta forma, e como o programa permite a divisão dos alarmes em discretos ou analógicos, aqueles que serão referentes às medições obtidas pelo sensor são do tipo analógicos e os restantes digitais. Estes são apresentados na Figura 6.5.



The screenshot shows the 'WinCC' alarm declaration interface. It has two main tabs: 'Discrete alarms' (selected) and 'Analog alarms'. The 'Discrete alarms' tab contains a table with columns: ID, Name, Alarm text, Alarm class, Trigger tag, Trigg., Trigger address, HMI acknowl..., HMI a..., HMI acknowl..., and Report. The 'Analog alarms' tab contains a table with columns: ID, Name, Alarm text, Alarm class, Trigger tag, Limit, Limit mode, and Report.

| ID | Name              | Alarm text                           | Alarm class | Trigger tag | Trigg. | Trigger address  | HMI acknowl... | HMI a... | HMI acknowl... | Report |
|----|-------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|--------|------------------|----------------|----------|----------------|--------|
| 8  | Discrete_alarm_1  | Erro na ativação do motor linear     | Errors      | Aviso_falha | 15     | Aviso_falha.x... | <No tag>       | 0        |                |        |
| 7  | Discrete_alarm_2  | Erro na ativação do motor de rotação | Errors      | Aviso_falha | 14     | Aviso_falha.x... | <No tag>       | 0        |                |        |
| 6  | Discrete_alarm_3  | Erro movimento do motor linear       | Errors      | Aviso_falha | 13     | Aviso_falha.x... | <No tag>       | 0        |                |        |
| 5  | Discrete_alarm_7  | Erro movimento do motor de rotação   | Errors      | Aviso_falha | 12     | Aviso_falha.x... | <No tag>       | 0        |                |        |
| 4  | Discrete_alarm_5  | Erro módulo entradas analógicas      | Errors      | Aviso_falha | 11     | Aviso_falha.x... | <No tag>       | 0        |                |        |
| 1  | Discrete_alarm_13 | Erro medição                         | Errors      | Aviso_falha | 10     | Aviso_falha.x... | <No tag>       | 0        |                |        |

| ID | Name           | Alarm text                                   | Alarm class | Trigger tag  | Limit | Limit mode | Report                              |
|----|----------------|----------------------------------------------|-------------|--------------|-------|------------|-------------------------------------|
| 1  | Analog_alarm_1 | Medições abaixo da gama de medição do sensor | Errors      | Distância_mm | 100   | Lower      | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2  | Analog_alarm_2 | Medições acima da gama de medição do sensor  | Errors      | Distância_mm | 1000  | Higher     | <input checked="" type="checkbox"/> |

Figura 6.5 Declaração de alarmes no *WinCC*.

Todos os alarmes declarados são da classe *Errors*, uma vez que esta apenas permite a eliminação de um alarme, caso o utilizar tome conhecimento da causa. Isto é, nesta classe, apenas após a eliminação da causa referente ao erro, será possível eliminá-lo, garantindo assim o reconhecimento, por parte do utilizador.

Como é possível observar, pela Figura 6.5, a declaração dos alarmes analógicos e digitais é um pouco diferente. No caso dos alarmes analógicos, as variáveis a declarar podem ser do tipo *Real*, *Int* ou *Time* e, caso o seu valor seja superior ao limite imposto, o alarme é ativado.

Neste caso, se a distância medida, por intermédios dos cálculos de normalização, for maior ou igual a 1000mm ou menor ou igual a 100mm, um aviso deverá surgir na interface.

No caso dos alarmes digitais, apenas é declarada uma variável do tipo *Int* ou *Word*. Por sua vez, cada alarme é associado a um bit dessa mesma variável, que será responsável por fazer o *trigger* de cada alarme. Para fazer a distribuição dos alarmes por cada *bit* foi necessário analisar o método de contagem do bit mais significativo feito pelo WinCC faz - Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Contagem de bits no WinCC.

|       | Byte 1 (menos significativo) |     |     |     |     |     |     |     | Byte 0 (mais significativo) |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Bit   | 1.7                          | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 0.7                         | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.0 |
| Step7 | 7                            | 6   | 5   | 4   | 3   | 2   | 1   | 0   | 15                          | 14  | 13  | 12  | 11  | 10  | 9   | 8   |

### Programação dos ecrãs

A interface criada para o sistema é composta por diversos ecrãs, que permitem o cumprimento dos requisitos propostos.

Tal como referido, o sistema, para iniciar, necessita de alguns dados importantes que deverão ser introduzidos pelo utilizador, como o valor da sobre-espessura. Neste caso, apenas é possível introduzir valores compreendidos entre 2 a 4mm. Por conseguinte, o primeiro ecrã foi desenvolvido com esta intenção, estando representado na Figura 6.6.

Neste ecrã inicial são possíveis 4 situações distintas, uma vez que é obrigatório introduzir a medida da sobre-espessura e, posteriormente, ativar os motores. Assim, neste ecrã são visíveis diferentes mensagens e informações de apoio ao utilizador.

No futuro, este ecrã pode ser também utilizado para que sejam inseridas as credenciais do utilizador. No entanto, neste momento, em fase de testes, não se justifica essa abordagem.

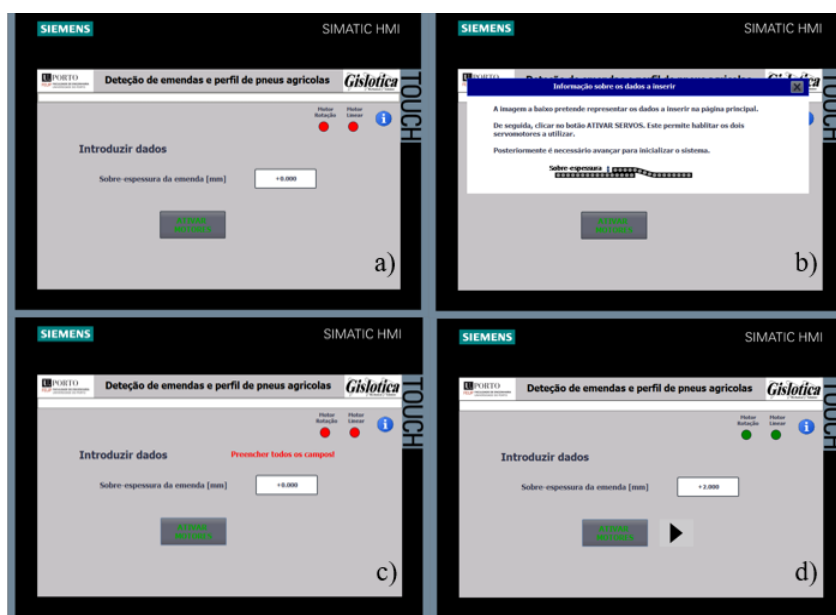


Figura 6.6 Ecrã inicial em 4 situações diferentes: -a)servomotores desabilitados -b)informação referente à introdução de dados -c)dados não introduzidos -d)servomotores habilitados e dados introduzidos.

Após este ecrã, segue-se o ecrã principal (Figura 6.7), onde é dada a indicação para a colocação dos eixos na posição *Home* de cada servomotor e, apenas posteriormente, a escolha do modo de funcionamento pretendido pelo utilizador, caso seja a primeira utilização da interface.



Figura 6.7 Ecrã principal.

Como descrito no ecrã principal, caso seja a primeira abordagem ao sistema com um dado pneu agrícola, inicialmente os eixos de movimento deverão ser colocados na sua posição zero. No caso do eixo linear, a posição zero deverá ser uma posição superior ao sensor. A posição zero do eixo de rotação é atingida quando o sensor está alinhado com o centro do código de barras. É importante referir que, dada a altura da cabine de pintura, a posição *Home* do eixo vertical deve ser definida através de um sensor.

Na Figura 6.8 está representado o ecrã que permite o controlo dos servomotores, assim como a informação necessária para tal. Neste é possível visualizar a posição atual do eixo, garantindo assim que o utilizador consegue ver quando este está na posição zero. Este tipo de movimento é perigoso, portanto, o botão *JOG* deve ser continuamente pressionado até que o eixo, quer linear quer de rotação, chegue à posição zero. Caso a velocidade escolhida seja demasiado elevada, o utilizador apenas deve deixar de pressionar este mesmo botão.

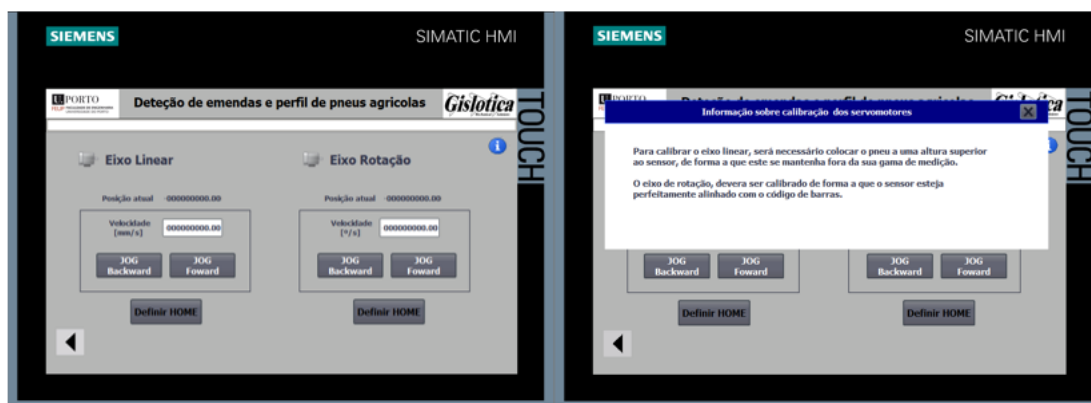


Figura 6.8 Ecrã para calibração da posição *Home* dos servomotores.

Segue-se a escolha do modo de funcionamento. Dependendo deste, a interação do utilizador aumenta ou diminui, portanto, o número de comandos varia proporcionalmente. No entanto, os resultados obtidos são os mesmos, sendo possível analisar o perfil do pneu, a localização das suas emendas, a *Status Word* dos servomotores, erros e, caso necessário, iniciar um novo ciclo com um novo pneu. Os diferentes ecrãs estão representados na Figura 6.9

No ecrã de modo manual ou testes (Figura 6.9 a) existe a possibilidade de introduzir a velocidade com que ambos os eixos se movimentam. Tal é permitido, porque se pretende repetir os ensaios com o sensor LE55IQ da Banner na cabine de pintura. Ou seja, variar de

novo a velocidade dos eixos até se alcançar valores otimizados para este projeto. Estes serão, posteriormente, utilizados como parâmetros do sistema no modo automático.

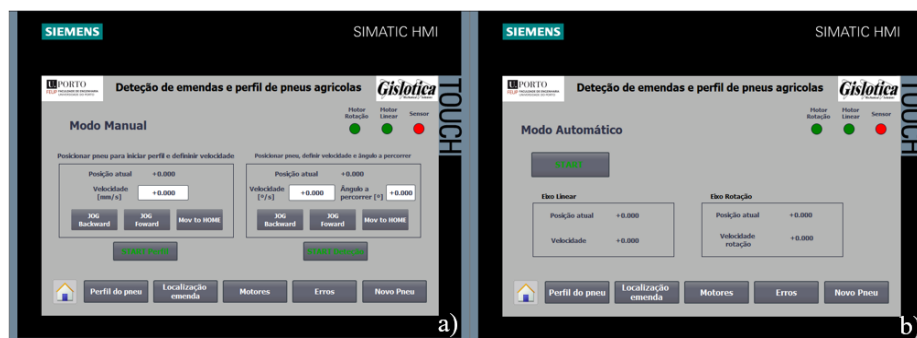


Figura 6.9 Ecrã modo de funcionamento: -a) modo manual ou testes -b) modo automático.

O ecrã que permite a visualização do perfil do pneu foi idealizado de três diferentes formas, dada a complexidade exigida e as ferramentas disponíveis. Estas são apresentadas na Figura 6.10.



Figura 6.10 Ecrã de visualização do perfil traçado: -a) primeira abordagem, -b) segunda abordagem, c) solução final.

Numa primeira abordagem, Figura 6.10 a), foi utilizado um gráfico, disponível no Win CC, para traçar as medições obtidas em função do deslocamento do pneu. No entanto, após testes, foi verificado que o gráfico obtido apenas estaria visível no ecrã durante o ensaio, portanto não era possível fazer uma análise posterior ao perfil.

Por conseguinte, foi criado um gráfico, Figura 6.10 b), através das ferramentas disponíveis no programa, com as mesmas variáveis:

- Distância medida [mm];
- Deslocamento do pneu (posição) [mm].

É importante referir que, para o desenho de uma interface no Win CC, todos os elementos que a irão constituir devem, previamente, ser colocados no ecrã.

Para que o perfil fosse visualizado, foi necessário:

- Criar um filtro que reduzisse o número total de medições, após a etapa de medição do perfil, em função do tempo de aquisição/processamento;
- Calcular o intervalo entre medições, tendo em consideração o número de pontos possíveis de visualizar no gráfico criado. Este, por sua vez dependerá da dimensão da interface.
- Garantir a visualização da posição dos pontos no gráfico, de uma forma precisa, para tal este deverá ser pressionado;

- Os botões apenas se tornam visíveis após a etapa de perfilagem de um pneu.

No entanto, ao desenhar o gráfico, uma vez que os pontos (botões) a utilizar devem permitir a sua atuação, estes terão de ser de maiores dimensões, sendo apenas garantidas 32 medições/32 botões, para a interface TP900. Ora, uma vez que, este sistema será aplicado numa máquina para pneus agrícolas e dadas as suas dimensões, apenas 32 pontos não será suficiente para visualizar o seu perfil.

Tal como calculado no ponto 6.1.2, caso seja analisado o pneu agrícola de maiores dimensões, são obtidas 84 medições. Ora, neste caso, o número de pontos para recriar o perfil seria reduzido para mais de metade, portanto não seria garantida uma boa representação do perfil. Concluindo, para obter esta solução de visualização do perfil, será necessária uma HMI de maiores dimensões, como a TP1200, por exemplo. Esta é a interface de maiores dimensões desta família.

Uma última solução desenvolvida, tendo por base a anterior, foi utilizar elementos circulares sem possibilidade de atuação, substituindo os botões anteriormente utilizados, Figura 6.10 c). Desta forma, é possível colocar 50 pontos, garantindo uma maior aproximação da realidade. No entanto, a localização dos pontos representados será feita, através da escala definida e representada.

Uma outra solução possível, mas que não foi desenvolvida, seria exportar os valores de medição obtidos e analisar estes dados numa página *excel*. No entanto, para tal, seria necessário sair da interface desenvolvida e, através de um computador, transferir os dados obtidos. Ora, este processo requer um conhecimento prévio do processo e do equipamento por parte do operador, o que não é o objetivo neste projeto.

Neste ecrã, destinado à visualização do perfil, é também possível conhecer:

- Dimensões do pneu, calculadas através dos resultados obtidos;
- Localização das “emendas horizontais”;

A Figura 6.11 representa estes diferentes ecrãs.

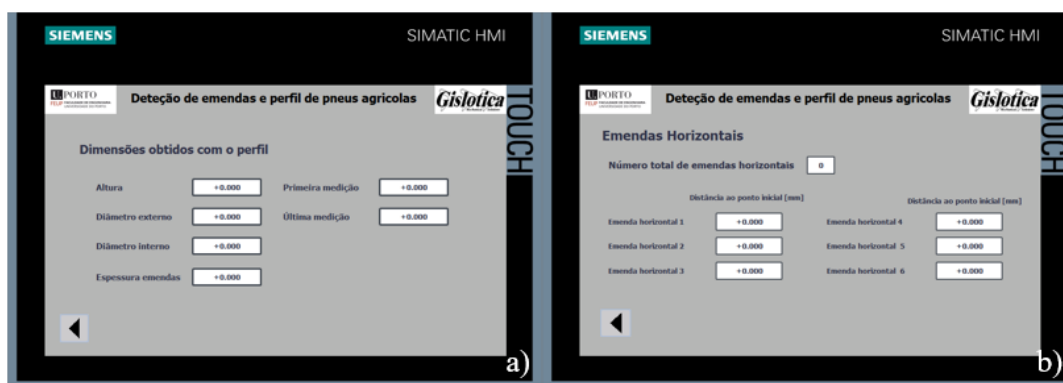


Figura 6.11 Ecrãs disponíveis após a identificação do perfil do pneu: -a) dimensões pneu -b) localização das “emendas horizontais”.

O ecrã representado na Figura 6.12, permite a visualização da localização de todas as emendas, após um ciclo de funcionamento.



Figura 6.12 Ecrã que indica a localização das emendas detetadas.

Para a visualização dos erros sinalizados e as suas causas, foi criado um ecrã apenas com estas funcionalidades. Por conseguinte, de forma a melhorar a performance do sistema aquando de uma paragem por erro ou falha, foi inserido o seu histórico num outro ecrã. Estes são representados na Figura 6.13.

Numa situação de erro, o botão que permite abrir este ecrã muda a sua cor para vermelho, de forma a que o utilizador reconheça a situação. Nos restantes ecrãs, que não possuem este botão, foi colocada uma barra informativa, na parte superior do ecrã, que assinala esta mesma situação.

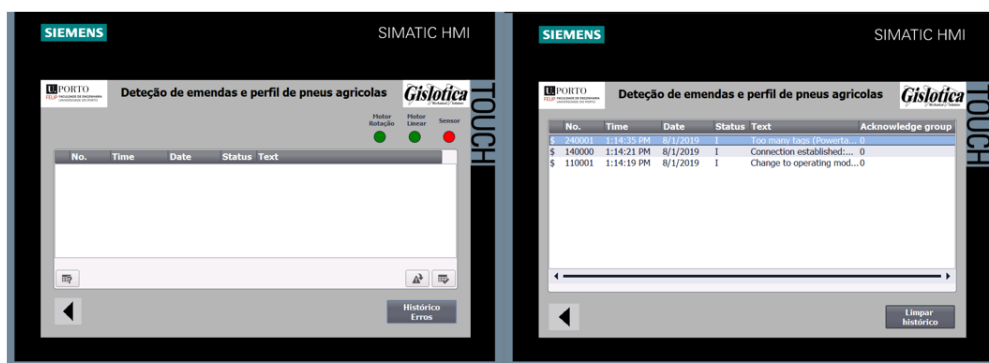


Figura 6.13 Ecrã de erros: -a) erros -b) histórico de erros.

Por último, em caso de emergência, tal como referido, foi criado um ecrã que se sobrepõe a qualquer outro, Figura 6.14.



Figura 6.14 Ecrã de emergência.

Concluindo, todos os ecrãs foram pensados e desenhados para serem simulados na interface TP900 Comfort da Siemens. No entanto, estimando o número de medições requeridas para o processo de identificação do perfil de um pneu agrícola, rapidamente foi comprovado que as suas dimensões seriam demasiado pequenas para desenhar este perfil. Assim, será interessante utilizar uma interface maior, para que o perfil seja representado com todas as medições obtidas.

## 7 Conclusões e trabalhos futuros

O processo de pulverização de um material desmoldante na superfície de um pneu é essencial para o processo de vulcanização.

O reconhecimento do perfil dessa superfície de uma forma rigorosa permite evitar desperdícios de desmoldante durante a pulverização.

O principal objetivo do projeto foi desenvolver um sistema automático capaz de reconhecer a superfície interior de um pneu agrícola “em verde”, quando suspenso e na condição de ser pulverizado.

Neste sentido, foram estudados diferentes sistemas de medição laser, sendo selecionado o mais adequado a integrar no processo produtivo.

Com esta solução de medição foi possível testá-la na identificação do perfil interior de um pneu, quando suspenso na ferramenta de suporte de uma cabine de pintura automatizada.

Por outro lado, este equipamento de medição possibilitou a deteção das emendas de construção de uma forma adequadamente rigorosa. Assim, o processo de medição torna-se mais eficiente, melhorando, consequentemente, a qualidade do pneu vulcanizado, uma vez que a pulverização indevida sobre as emendas é uma das principais causas de defeitos em pneus, na etapa de vulcanização.

O estudo de uma solução de controlo, permitiu criar uma forma rápida e eficiente de realizar o processo de identificação do perfil de um pneu e deteção das suas emendas, através do controlo de movimento dos eixos da ferramenta inserida na cabine de pintura. Desta forma, é eliminada a perigosidade do processo atual de medição.

Este projeto revelou ser bastante versátil, capaz de ser inserido noutras máquinas de pintura ou outro tipo de equipamento desenvolvido pela empresa, devido à sua viabilidade económica e performance.

Para além da solução de medição selecionada, foram estudadas outras possíveis soluções, com custo, repetibilidade e gama de medição distintas. Assim, caso se pretenda uma solução que permita a identificação do perfil e a deteção das emendas de um pneu agrícola, de uma forma mais precisa e, consequentemente, a um custo superior o sensor IL-600 será o mais indicado. Caso se pretenda aplicar esta solução de medição automática a pneus ligeiros, o sensor IL-300 será uma boa solução, para além da selecionada (sensor LE550IQ).

Assim, na Tabela 7.1 é feito um resumo das principais características dos sensores estudados para a identificação do perfil e deteção das emendas de pneus agrícolas, caso se pretenda aplicar esta solução automática a diferentes equipamentos desenvolvidos pela empresa, em diferentes condições.

Tabela 7.1 Principais características dos sensores estudados.

|         | Custo aproximado | Repetibilidade       | Gama de medição | Identificação do perfil de pneus agrícolas | Deteção de emendas |
|---------|------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------------|--------------------|
| LE550IQ | 300€             | $\pm 1\text{mm}$     | 100 a 1000 mm   | Sim                                        | Sim                |
| LM150   | 700€             | $\pm 0.002\text{mm}$ | 50 a 150 mm     | Não                                        | Sim                |
| IL-300  | 1000€            | $\pm 0,03\text{ mm}$ | 160 a 450mm     | Sim                                        | Sim                |
| IL-600  | 4000€            | $\pm 0,05\text{ mm}$ | 200 a 1000mm    | Sim                                        | Sim                |

Concluindo, a solução de medição encontrada é eficiente e de baixo custo, permitindo à Gislotica ter uma oferta tecnológica para um seu potencial cliente. Por outro lado, este projeto permitiu também o estudo de outras soluções, caso as condições impostas pelo cliente sejam distintas ou se pretenda implementar o sistema noutro equipamento.

### Trabalhos futuros

Como concluído, o sistema desenvolvido permite, não só, cumprir com os objetivos propostos para esta dissertação, como também criar novas ideias a implementar noutras máquinas desenvolvidas pela empresa. No entanto, o sistema não foi testado nas condições existentes na cabine de pintura. Portanto, são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros, de forma a que o seu desempenho se mantenha nestas condições:

- A aplicação de desmoldante pode provocar a contaminação do sensor, criando assim erros de funcionamento. Desta forma, é importante criar uma proteção para este equipamento, caso seja fixo na cabine de pintura, e monitorizar esta variável ao longo de vários ensaios. Será também necessário estudar a melhor forma de colocar o sensor na cabine de pintura;
- Caso se pretenda uma solução mais rápida, uma solução será alterar a rede industrial para *Profinet IO IRT* (comunicação isócrona) e, consequentemente, alterar o módulo de entradas analógicas. Desta forma é otimizado o tempo de processamento das medições. Tal como analisado, 240ms é um intervalo de tempo elevado para o que seria de esperar com este equipamento;
- Realizar novos ensaios com o sensor escolhido, desta vez com diferentes pneus agrícolas “em verde”, para que seja comprovado que este é adequado para o processo de identificação do perfil e a deteção das emendas interiores deste tipo de pneus;
- Realizar ensaios com a solução de controlo criada, com vista a melhorá-la ou mesmo modificá-la;
- Numa fase posterior, seria interessante fazer a comunicação entre a solução de controlo e a base de dados da empresa. Assim, os resultados obtidos são armazenados juntamente com toda a informação referente ao pneu em estudo.

## Referências

- Ammeraal Beltech. (2019). *Tire Manufacturing*. Obtido em Março de 2019, de <https://www.ammeraalbeltech.com/en-sg/industries/tire/tire-manufacturing/ply-and-steel-belt-cutting/>
- Banner. (2019). *Sensor LE550IQ*. Obtido em Março de 2019, de <https://www.bannerengineering.com/us/en/products/part.86746.html>
- Banner Engineering Corp. (2018). *L-GAGE® LM Series Laser Sensor: Instruction Manua*.
- Berger, H. (2014). *Automating with SIMATIC S7-1500 : Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional*. Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich. Obtido em Abril de 2019
- Bosch, R. (2004). *Bosch Automotive Handbook, 2ª Edição*.
- Brown, P. (2013). *PROFINET Network*, Siemens AG. Manchester.
- Caetano, M. (2014). *Ciência e Tecnologia da Borracha*. Obtido em Março de 2019, de <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/>
- Continental. (2019). *History of the Passenger Tire*. Obtido em Março de 2019, de <https://www.continentaltire.com/content/history-passenger-tire>
- Goodyear. (2016). *How tires are made*. Obtido em Março de 2019, de <https://www.goodyear.co.in/learn/how-tires-are-made>
- Instituto Português da Qualidade. (2012). *Vocabulário Internacional da Metrologia*. Caparica, Portugal. Obtido de <http://www.spmet.pt/conceitos.html>
- ISO. (1994). *ISO 5725-1:1994 Accuracy of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions*.
- ITW Akron Standard. (2001). *Tire Uniformity*. Obtido de Hunter Engineering Company: <https://www.hunter.com/wheel-balancers/road-force-elite>
- Jazar, R. N. (2008). *Vehicle Dynamics Theory and Application*. Springer.
- Jornal de Notícias. (2016). Gislotica MechanicalSolutions: um impulso de inovação. *31ª Guia Empresarial*, 12-13.
- Keyence. (2019). *Keyence*. Obtido de <https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/il/models>
- Mayer, A. (2017). *Smithers Rapra*. Obtido em Fevereiro de 2019, de <https://www.smithersrapra.com/resources/2017/april/tire-industry-in-boom-cycle>
- Michelin. (2019). *Marcações do pneu*. Obtido em Março de 2019, de <https://m.michelin.pt/learnShareDetail/marcacoespneus>

- Michelin. (2019). *Tudo sobre o pneu*. Obtido em Março de 2019, de <https://www.michelin.pt/pneus-turismo/conselhos/tudo-sobre-o-pneu/quais-as-funcoes-de-um-pneu>
- Nexen Tire. (2017). *Functions of Tire*. Obtido em Março de 2019, de [https://www.nexentire.com/international/information/tire\\_information/basic\\_sense/role.php](https://www.nexentire.com/international/information/tire_information/basic_sense/role.php)
- Pinheiro, A. L., Paulo F. de Almeida, & Luiz Guilherme P. Soares. (2017). *Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria Vol. 4 : Princípios fundamentais dos lasers e suas aplicações*. Blucher.
- Rockwell Automation. (2013). *Tire Building Machine*. Obtido em Março de 2019, de [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/tire-wp002\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/tire-wp002_-en-p.pdf)
- SICK AG. (2019). *Pneus*. Obtido em Março de 2019, de [https://www.sick.com/br/pt/ramos-industriais/pneus/c/g291154?fbclid=IwAR0zFcE2mGZNOBVVdED1zrSyPv5Koxwk bq\\_-C5Qj\\_QpED8wCzwSAd\\_3Lsow](https://www.sick.com/br/pt/ramos-industriais/pneus/c/g291154?fbclid=IwAR0zFcE2mGZNOBVVdED1zrSyPv5Koxwk bq_-C5Qj_QpED8wCzwSAd_3Lsow)
- Siemens. (2017). *Manual SIMATIC: ET 200SP*.
- Siemens. (2019). *SIMATIC S7-1500 Software Controller*. Obtido em Março de 2019, de [https://www.nexentire.com/international/information/tire\\_information/basic\\_sense/role.php](https://www.nexentire.com/international/information/tire_information/basic_sense/role.php)
- Siemens AG. (2011). *Synchronous motors 1FK7, Generation 2: Configuration Manual*. Germany.
- Siemens AG. (2012). *SIMATIC HMI devices: Operating Instructions*. Germany .
- Siemens AG. (2013). *SINAMICS S120 Booksize Power Units: Manual*.
- Siemens AG. (2014). *Motion Control with SIMATIC & SINAMICS: Speed & Positioning axis*. Germany.
- Siemens AG. (2015). *SIMATIC HMI Panels: Efficient to a new level*. Germany.
- Siemens AG. (2015). *Workshop Technology/Drives*.
- Siemens AG. (2018). *TIA Portal - Tutorial Center*. Obtido de [https://support.industry.siemens.com/dl/dl-media/707/106656707/att\\_961750/v6/106656707\\_TIA\\_Portal\\_-\\_Tutorial\\_Center\\_web/start.htm#!/en/4472](https://support.industry.siemens.com/dl/dl-media/707/106656707/att_961750/v6/106656707_TIA_Portal_-_Tutorial_Center_web/start.htm#!/en/4472)
- Siemens Industry. (2017). *SINAMICS S120: The flexible drive system for high-performance motion control applications*.
- Siemens S.A. (2019). *A nova geração de estações remotas*. Lisboa.
- Standard, I. A. (2001). *Tire Uniformity*. Obtido de Hunter Engineering Company: Disponível em: <http://www.gsp9700.com/technical/itw.pdf>
- Statista. (2018). Obtido em Fevereiro de 2019, de <https://www.statista.com/statistics/225677/revenue-of-the-leading-tire-producers-worldwide/>
- U.S. Tire Manufacturers Association. (2018). *How a tire is made* . Obtido em Março de 2019, de <https://www.ustires.org/howatireismade>
- United States Environmental Protection Agency. (1981). *Rubber Tire Manufacturing Industry: Background Information for Proposed Standards*.

Walter, J. D., & Gent, A. (2005). *The Pneumatic Tire*. The University of Akron.



## ANEXO A: Representação de valores analógicos em intervalos de medição de corrente e tensão

As tabelas seguintes apresentam os valores decimais e hexadecimais dos possíveis intervalos de medição de tensão e corrente.

| Values |      | Current measuring range |                 |                  |
|--------|------|-------------------------|-----------------|------------------|
| dec    | hex  | 0 to 20 mA              | 4 to 20 mA      |                  |
| 32767  | 7FFF | >23.52 mA               | >22.81 mA       | Overflow         |
| 32511  | 7EFF | 23.52 mA                | 22.81 mA        | Overshoot range  |
| 27649  | 6C01 |                         |                 |                  |
| 27648  | 6C00 | 20 mA                   | 20 mA           | Rated range      |
| 20736  | 5100 | 15 mA                   | 16 mA           |                  |
| 1      | 1    | 723.4 nA                | 4 mA + 578.7 nA |                  |
| 0      | 0    | 0 mA                    | 4 mA            |                  |
| -1     | FFFF |                         |                 | Undershoot range |
| -4864  | ED00 | -3.52 mA                | 1.185 mA        |                  |
| -32768 | 8000 | <- 3.52 mA              | < 1.185 mA      | Underflow        |

Figura A.1 Intervalo de valores de corrente: 0 a 20 mA e 4 a 20 mA.

| Values |      | Voltage measuring range |               |              |               | Range            |
|--------|------|-------------------------|---------------|--------------|---------------|------------------|
| dec    | hex  | ±10 V                   | ±5 V          | ±2.5 V       | ±1 V          |                  |
| 32767  | 7FFF | >11.759 V               | >5.879 V      | >2.940 V     | > 1.176 V     | Overflow         |
| 32511  | 7EFF | 11.759 V                | 5.879 V       | 2.940 V      | 1.176 V       | Overshoot range  |
| 27649  | 6C01 |                         |               |              |               |                  |
| 27648  | 6C00 | 10 V                    | 5 V           | 2.5 V        | 1 V           | Rated range      |
| 20736  | 5100 | 7.5 V                   | 3.75 V        | 1.875 V      | 0.75 V        |                  |
| 1      | 1    | 361.7 $\mu$ V           | 180.8 $\mu$ V | 90.4 $\mu$ V | 36.17 $\mu$ V |                  |
| 0      | 0    | 0 V                     | 0 V           | 0 V          | 0 V           |                  |
| -1     | FFFF |                         |               |              |               |                  |
| -20736 | AF00 | -7.5 V                  | -3.75 V       | -1.875 V     | -0.75 V       |                  |
| -27648 | 9400 | -10 V                   | -5 V          | -2.5 V       | -1 V          | Undershoot range |
| -27649 | 93FF |                         |               |              |               |                  |
| -32512 | 8100 | -11.759 V               | -5.879 V      | -2.940 V     | -1.176 V      |                  |
| -32768 | 8000 | < -11.759 V             | < -5.879 V    | < -2.940 V   | < -1.176 V    | Underflow        |

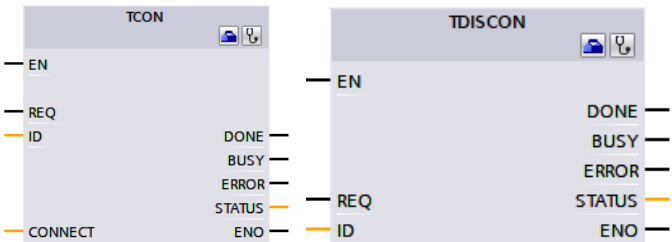
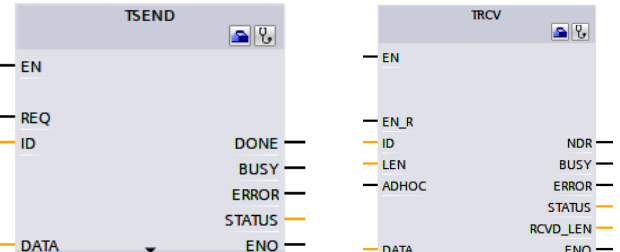
Figura A.2 Intervalo de valores de tensão: ±10 V, ±5V, ±2,5V e ±1V.



## ANEXO B: Instruções utilizadas no ambiente de programação TIA Portal

A comunicação TCP-IP entre o controlador e qualquer outro equipamento, neste caso a câmara de visão 3D, é garantido através de algumas funções específicas existentes no TIA Portal. Estas são descritas na Tabela B.1 Instruções utilizadas para comunicação TCP-IP. e disponíveis em: “Instructions” > “Communication” > “Open user communication”

Tabela B.1 Instruções utilizadas para comunicação TCP-IP.

|                                                                                          |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>TCON: estabelece a comunicação.</p> <p>TDISCON: termina a comunicação.</p>            |   |
| <p>TSEND: envia a informação a transmitir.</p> <p>TRCV: recebe a informação enviada.</p> |  |



## **ANEXO C: Esquemas elétricos**

O Anexo inclui os esquemas elétricos relativos a:

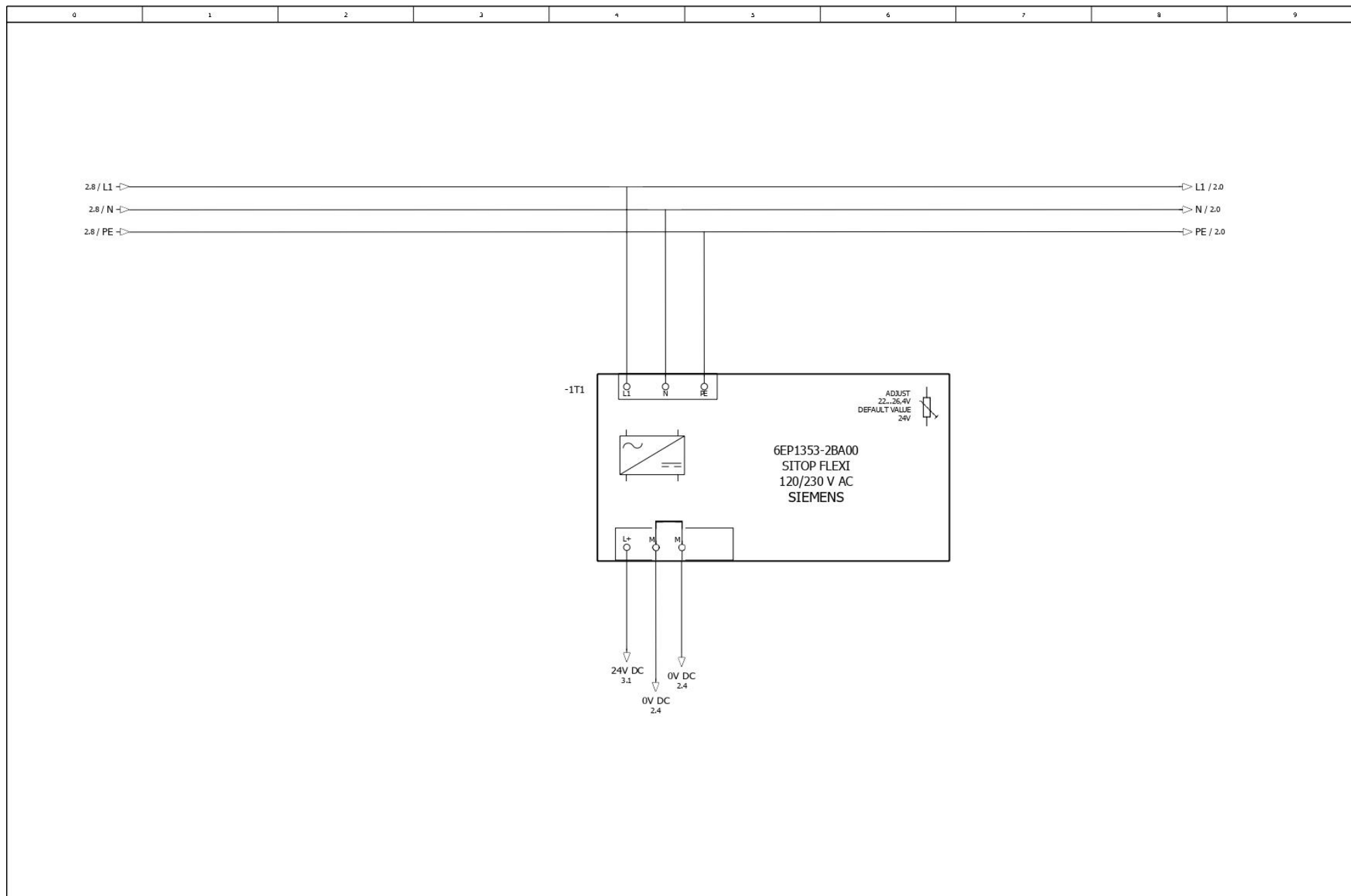
- Fonte de alimentação
- PLC e HMI
- Módulo de entradas analógicas/digitais e sensor

|                      |                                                                                    |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa / Cliente    | Gislótica- Projeto e Fabrico de Sistemas Mecânicos                                 |
| Descrição do projeto | Deteção de emendas e perfil de um pneu "em verde" através de um sistema de medição |
| Número de projeto    | 20190120                                                                           |

|                           |                                                                 |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Fabricante (Empresa)      | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto                |
| Nome do projeto           | Identificação do perfil e deteção de emendas em pneus agrícolas |
| Tipo                      | Projeto de Dissertação                                          |
| Localização de instalação | -                                                               |
| Responsável pelo projeto  | Maria Soares                                                    |

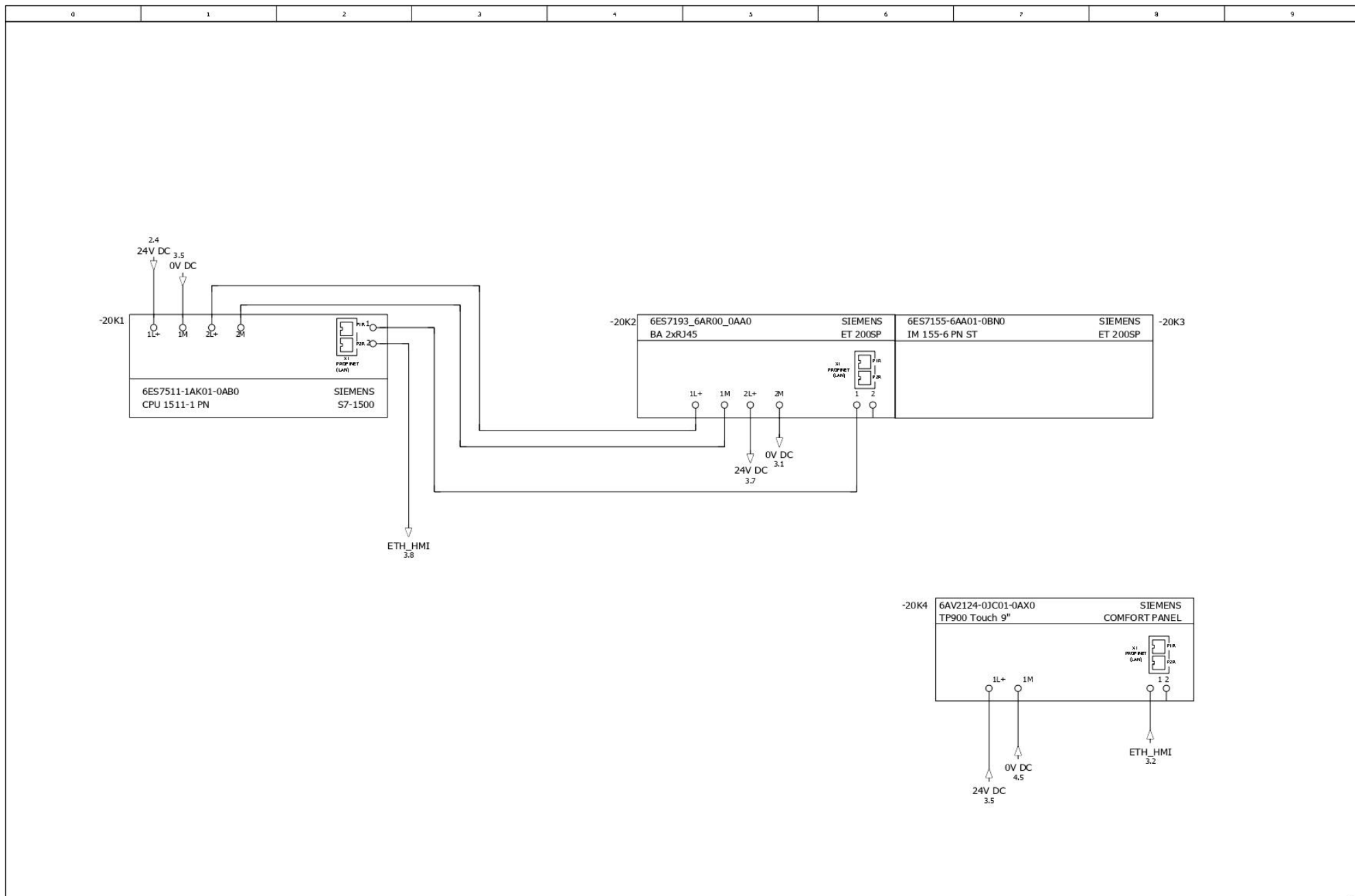
|           |            |
|-----------|------------|
| Criado em | 22/08/2019 |
|-----------|------------|

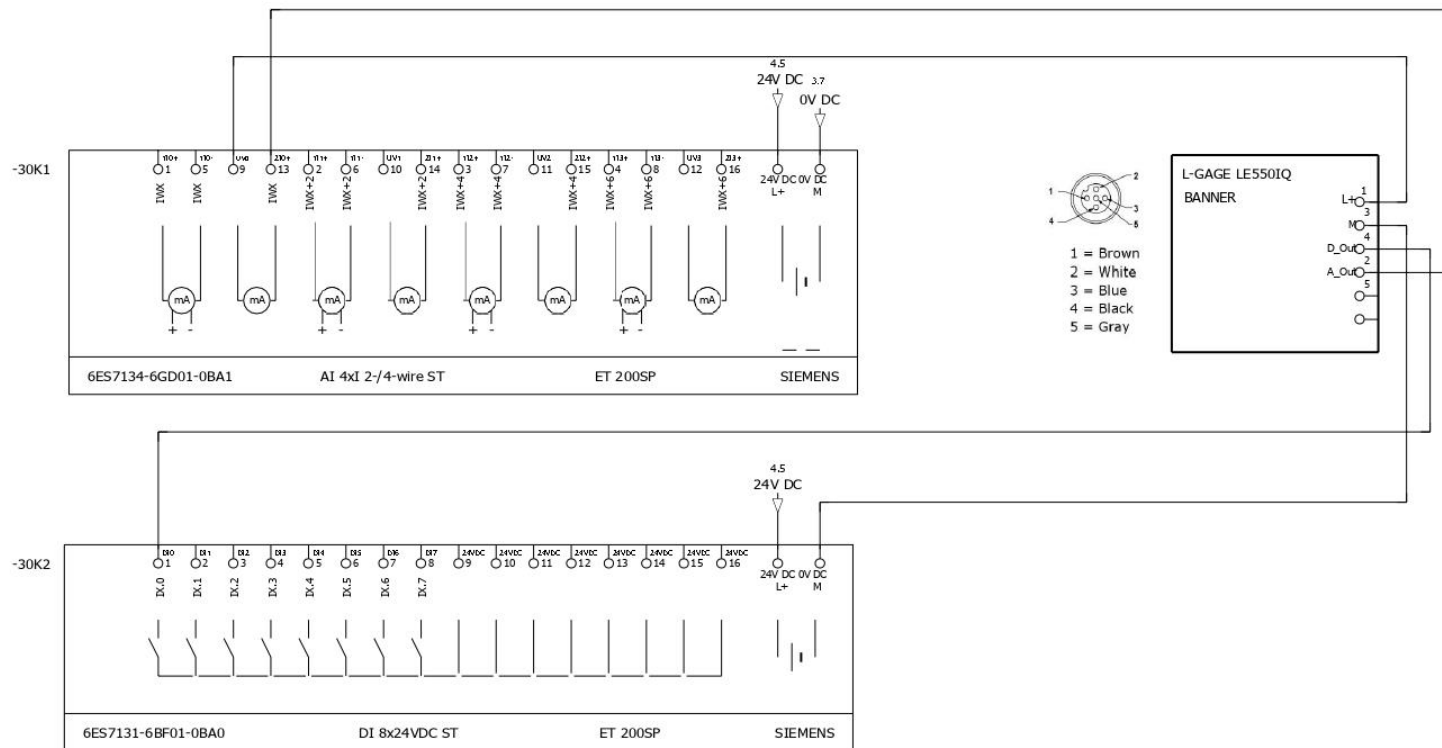
|                       |   |
|-----------------------|---|
| Quantidade de páginas | 5 |
|-----------------------|---|



|          |              |
|----------|--------------|
| Projeto: | 20190120     |
| Desenho: | 002          |
| Data:    | 30/08/2019   |
| Auto:    | Maria Soares |

|                      |   |
|----------------------|---|
| Local de Instalação: | = |
| Local de Montagem:   | + |
| Página anterior:     | 1 |
| Página seguinte:     | 3 |







## ANEXO D: Resultados obtidos com sistemas de medições

### D.1 Resultados obtidos no processo de identificação do perfil de um pneu, com o sensor LE550IQ.

- Ensaio a uma velocidade do pneu de 5mm/s:

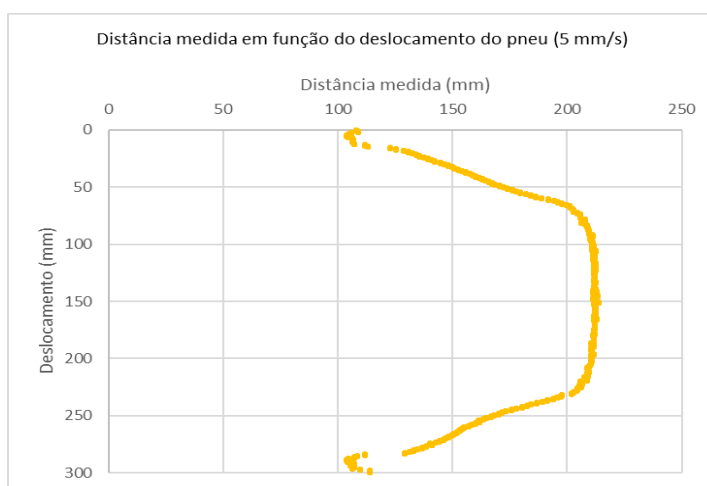


Figura D.1.1 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 5mm/s.

- Ensaio a uma velocidade do pneu de 8mm/s e uma inclinação de 12°:

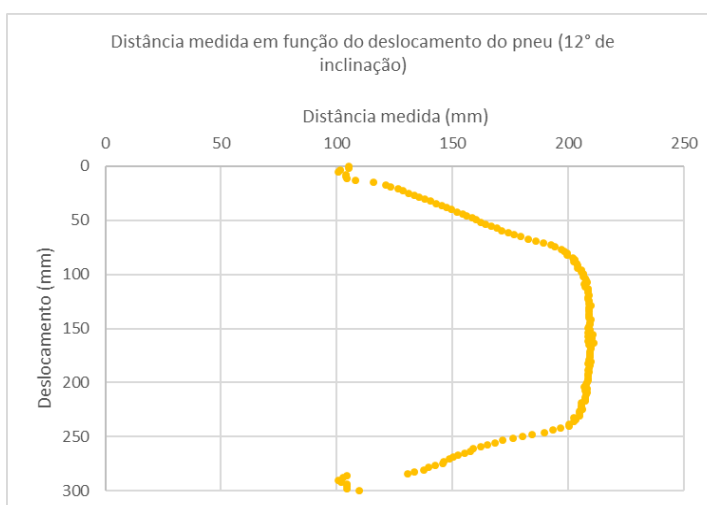


Figura D.1.2 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 8mm/s e uma inclinação do sensor de 12°.

➤ Ensaio a uma velocidade do pneu de 10mm/s:

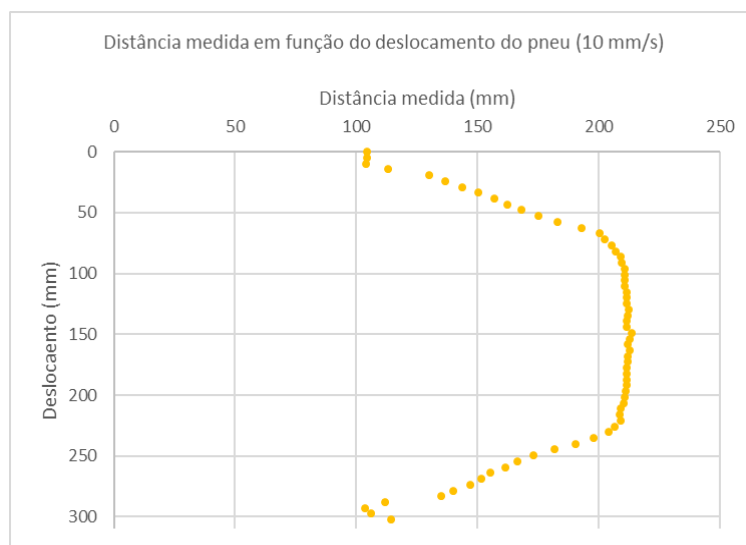


Figura D.1.3 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do deslocamento, a uma velocidade linear do pneu de 10mm/s.

## D.2 Resultados obtidos no processo de detecção de uma emenda, com sensor LE550IQ.

➤ Ensaio com uma velocidade do pneu de 6°/s:

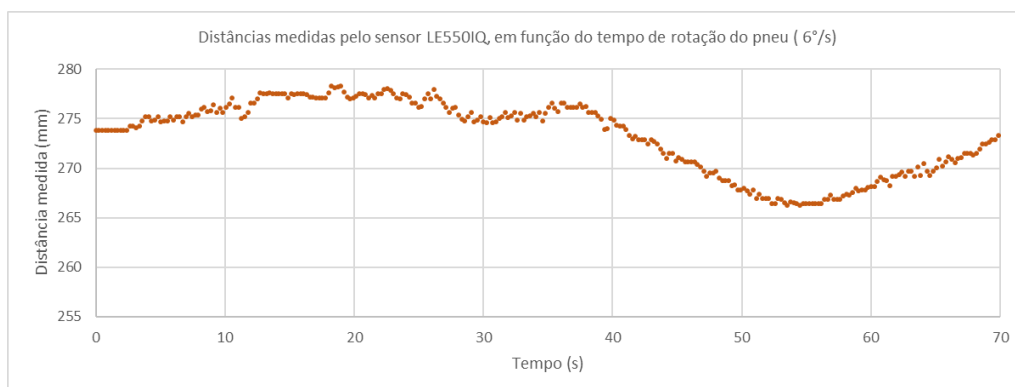


Figura D.2.1 Distâncias medidas pelo sensor LE550IQ, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s.

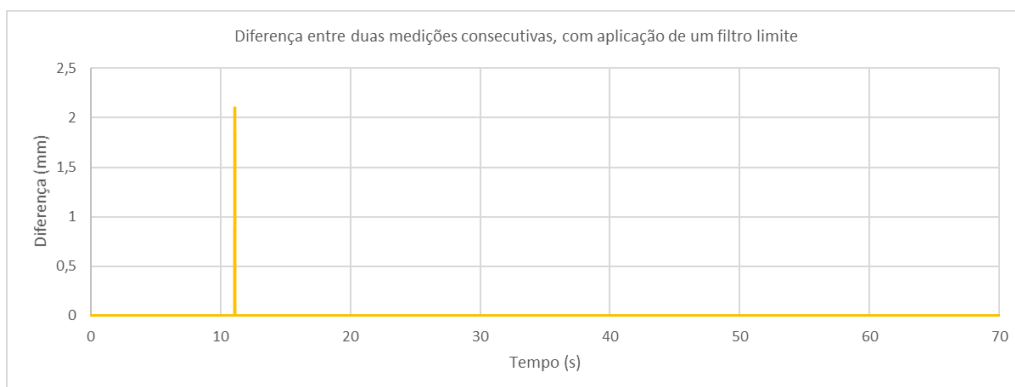


Figura D.2.2 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 6°/s

### D.3 Resultados obtidos no processo de detecção de uma emenda, com o sensor LM150

➤ Ensaio com uma velocidade do pneu de 2°/s:

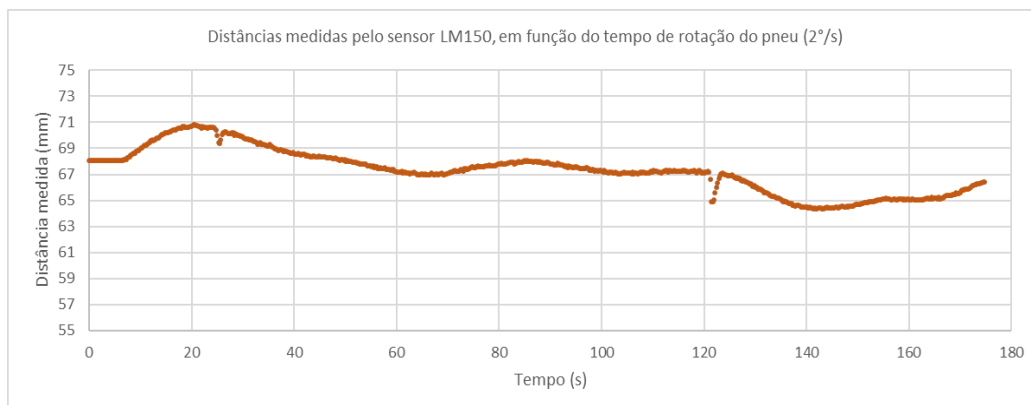


Figura D.3.1 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 2°/s.

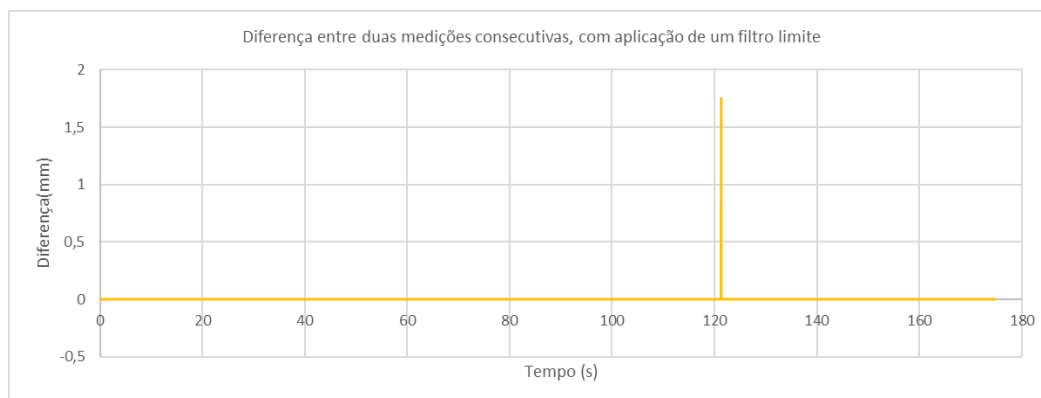


Figura D.3.2 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 2°/s.

➤ Ensaio com uma velocidade do pneu de 4°/s:

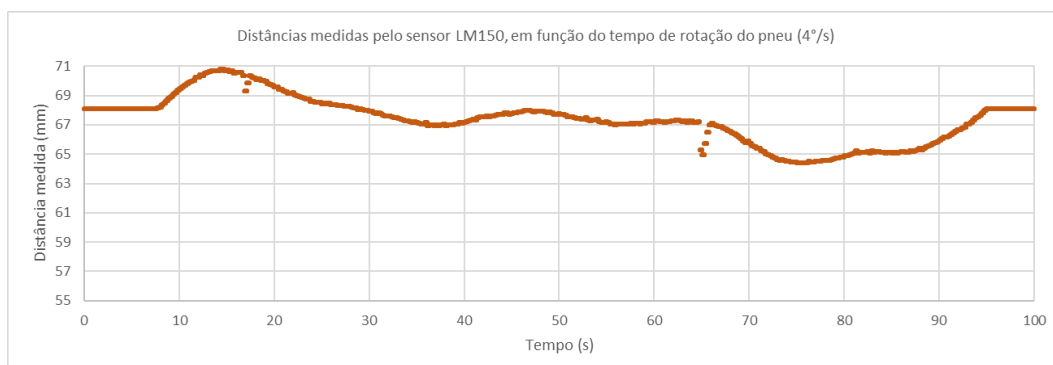


Figura D.3.3 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 4°/s.

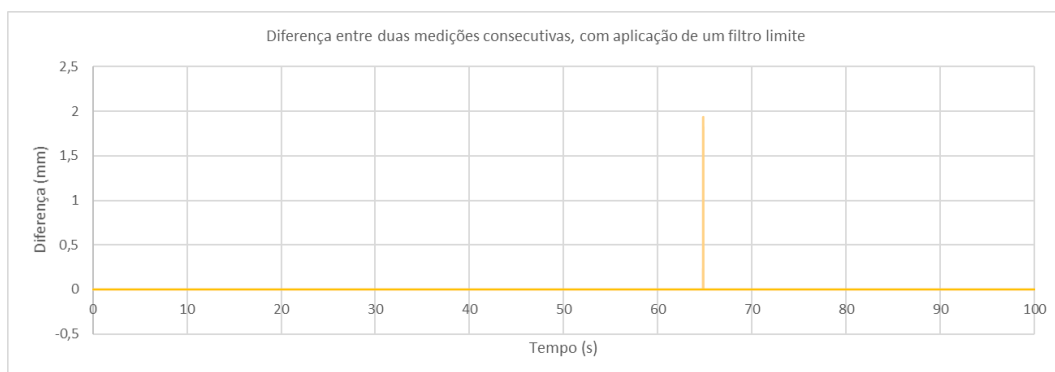


Figura D.3.4 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 4°/s

Neste caso, a rotação foi realizada também no sentido contrário, demonstrando assim que é independente o sentido de rotação para a medição de uma emenda. No entanto, para obter o posicionamento da emenda, em relação ao código de barras, uma vez que este processo será feito em tempo real, a detecção deverá ser realizada no início da emenda, diminuindo possíveis erros devido ao tempo de comunicação.

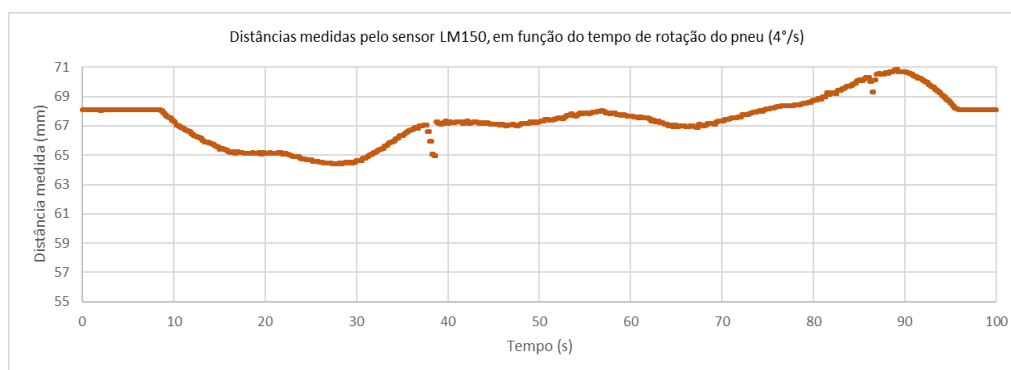


Figura D.3.5 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 4°/s no sentido contrário de rotação.

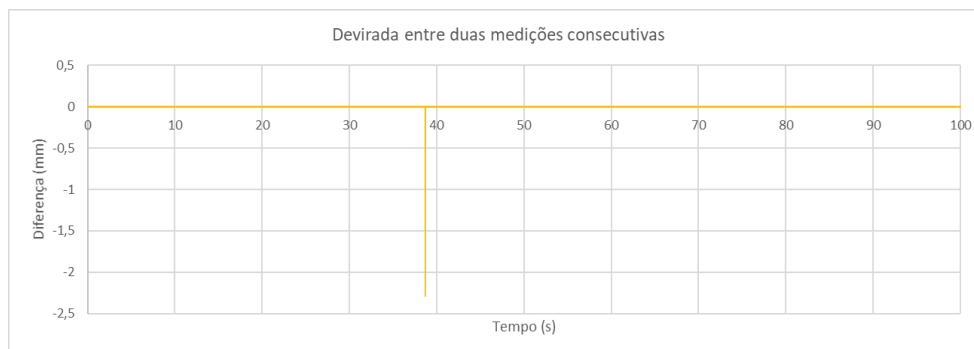


Figura D.3.6 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 4°/s no sentido contrário de rotação.

➤ Ensaio com uma velocidade do pneu de 10°/s:

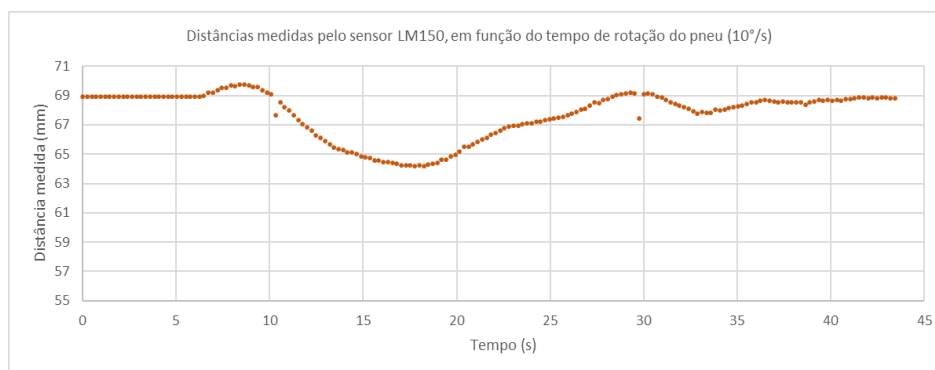


Figura D.3.7. Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s.

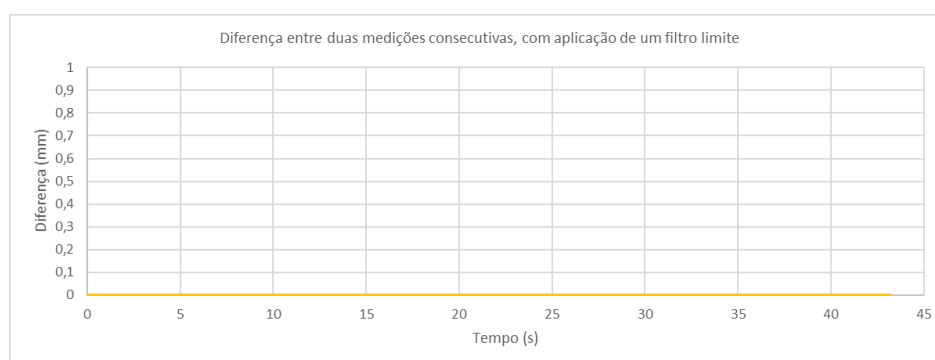


Figura D.3.8 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s.

Dado que esta velocidade corresponde à velocidade máxima que permite a detecção da emenda, foram realizados 3 ensaios.

- Ensaio 2 com velocidade de 10°/s:

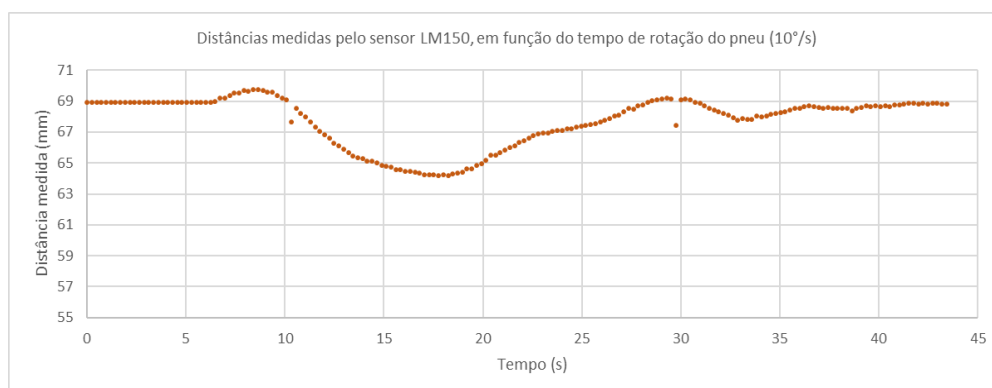


Figura D.3.8 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s.

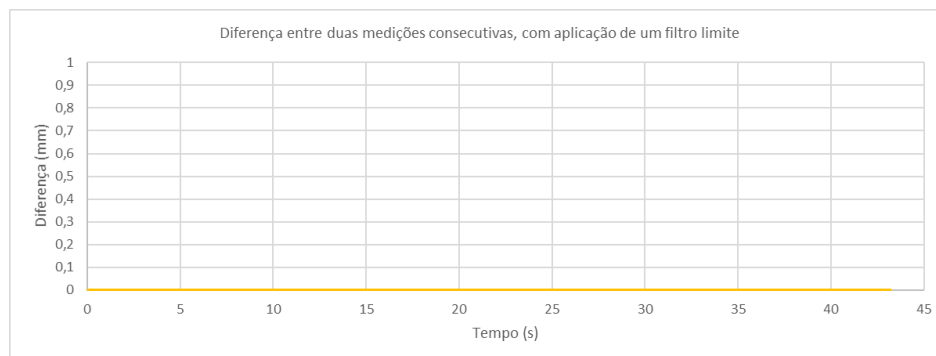


Figura D.3.9 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s.

- Ensaio 3 com velocidade de 10°/s, no sentido oposto:

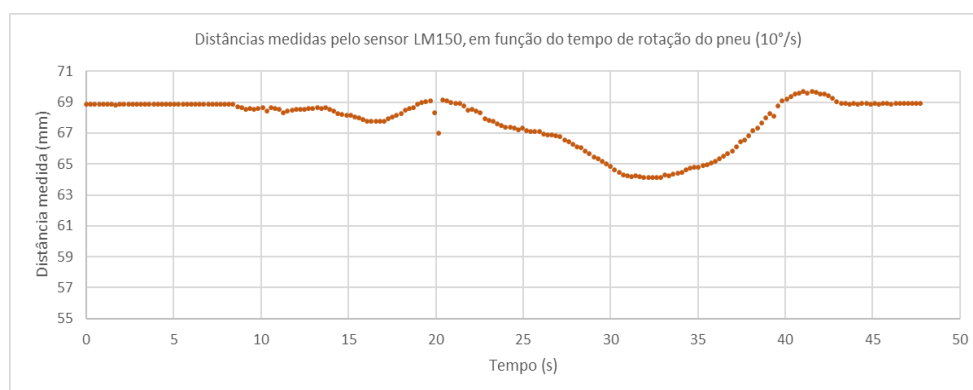


Figura D.3.12 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s.

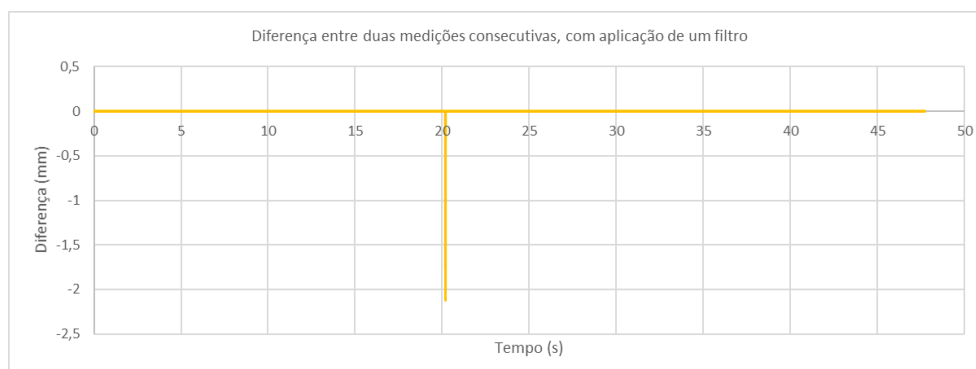


Figura D.3.13 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 10°/s.

➤ Ensaio com uma velocidade do pneu de 14°/s:

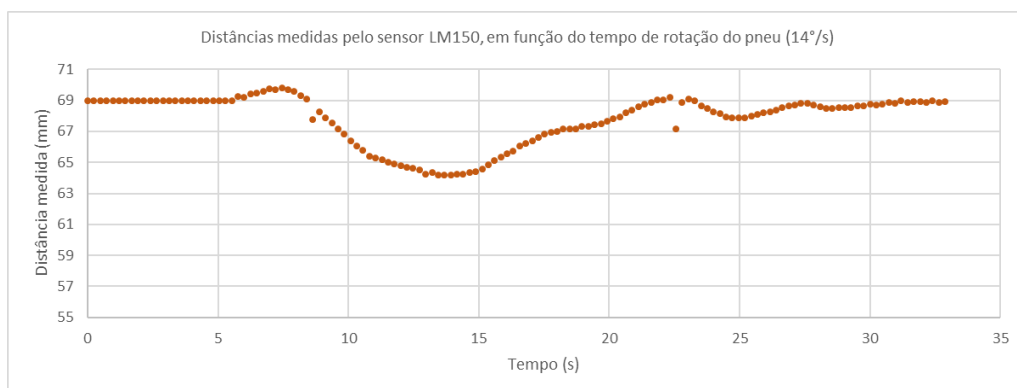


Figura D.3.14 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

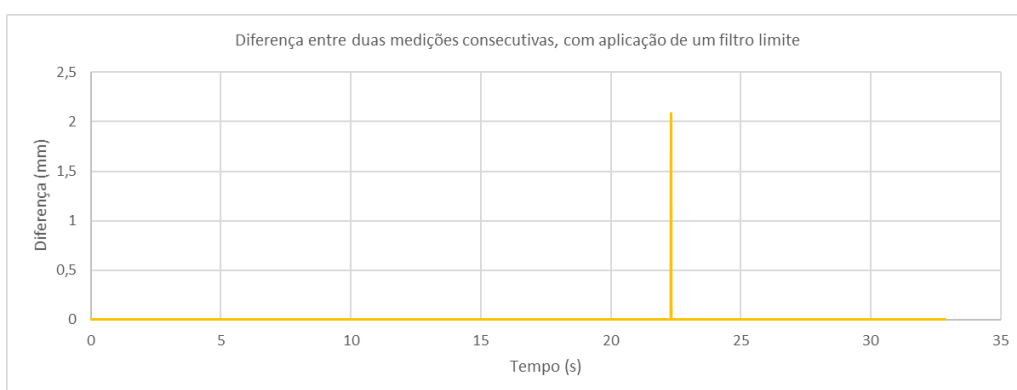


Figura D.3.15 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

• Ensaio 2 com velocidade de 14°/s

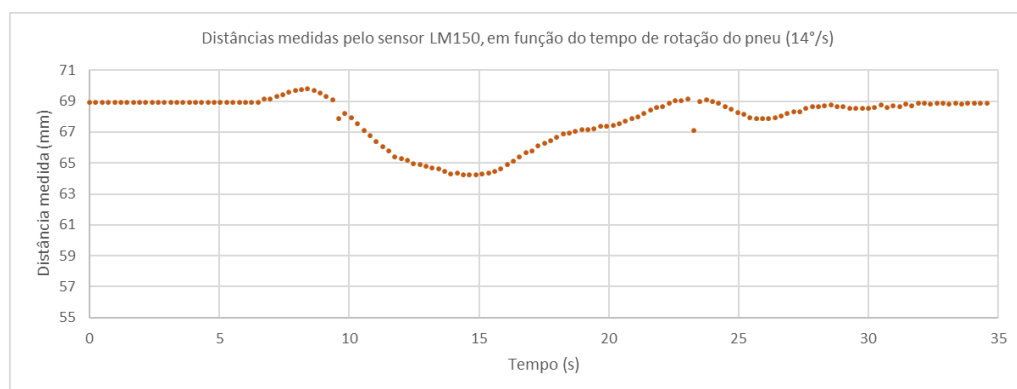


Figura D.3.16 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

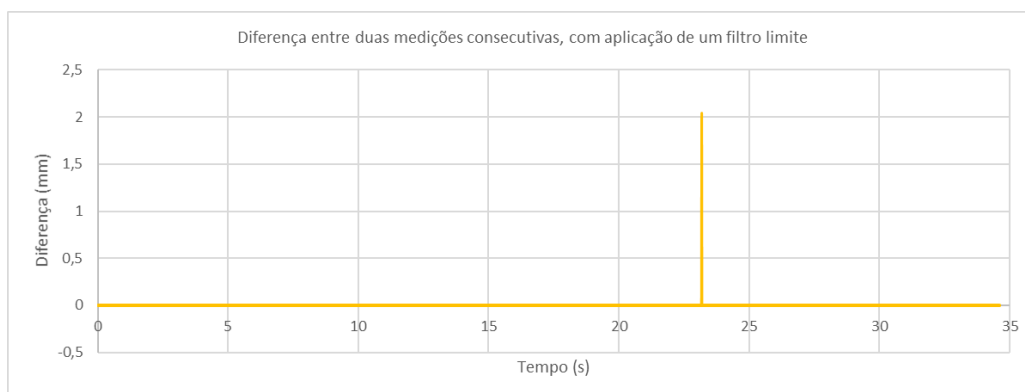


Figura D.3.17 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

- Ensaio 3 com velocidade de 14°/s, no sentido contrário

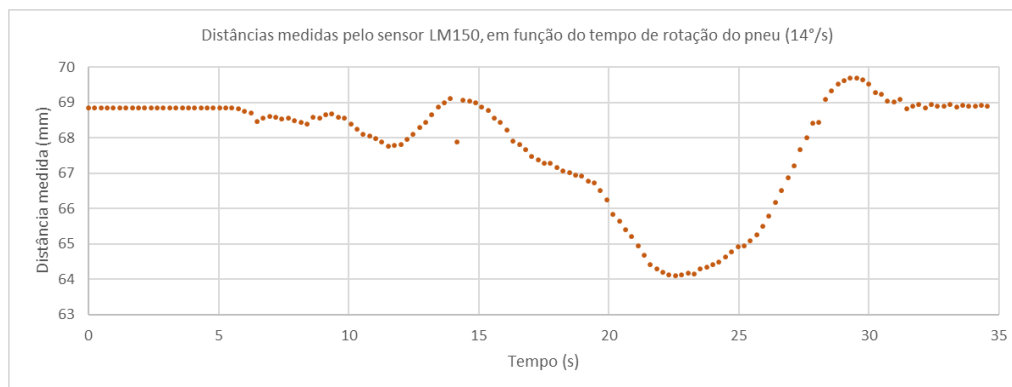


Figura D.3.18 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

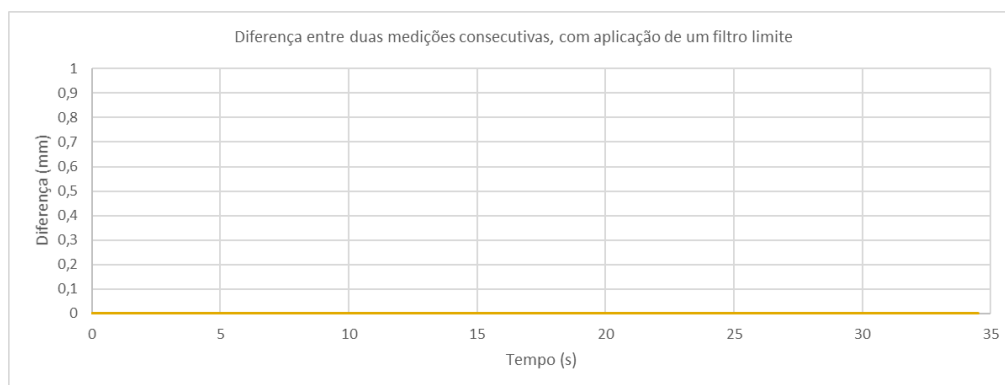


Figura D.3.19 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

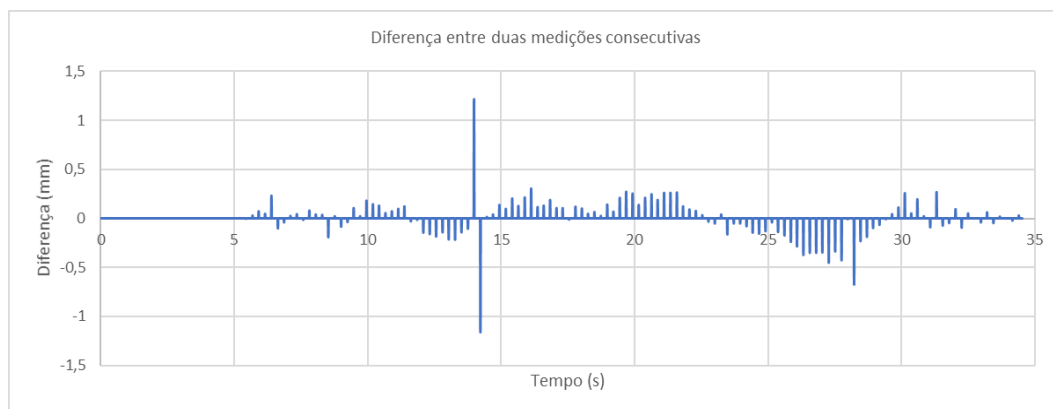


Figura D.3.20 Diferença entre duas medições do sensor LM150, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 14°/s.

➤ Ensaio com uma velocidade do pneu de 16°/s:

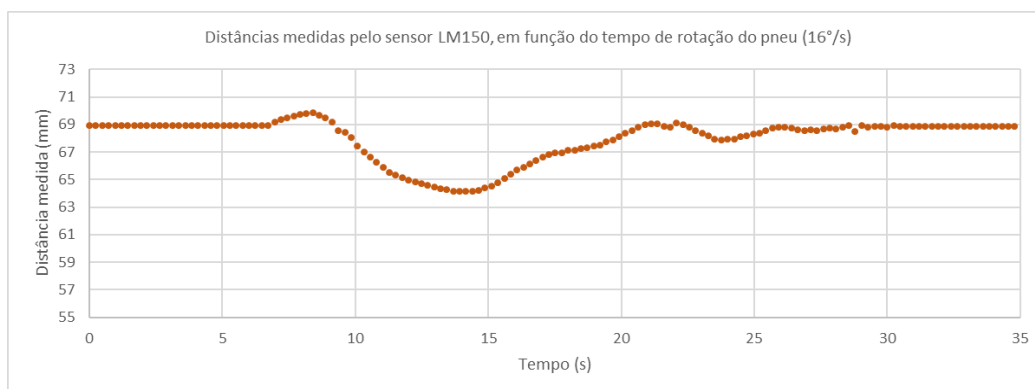


Figura D.3.21 Distâncias medidas pelo sensor LM150, em função do tempo, a uma velocidade de rotação do pneu de 16°/s.

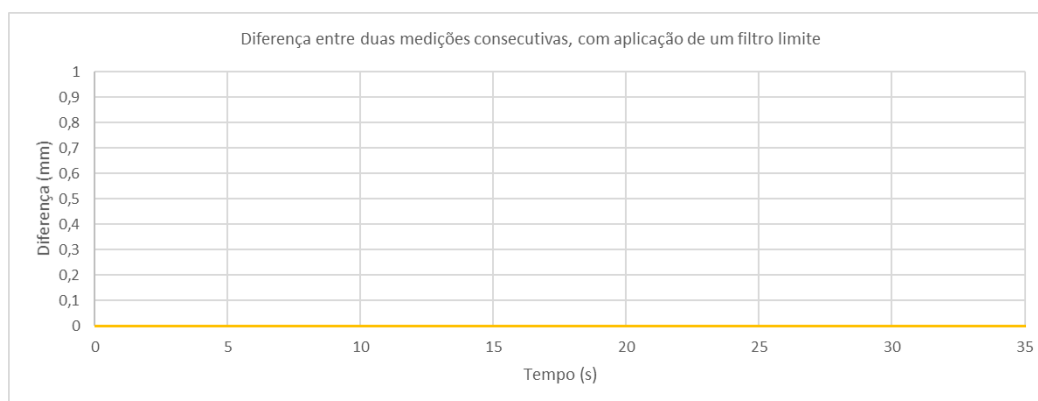


Figura D.3.22 Diferença entre duas medições consecutivas com aplicação de um filtro limite, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 16°/s.

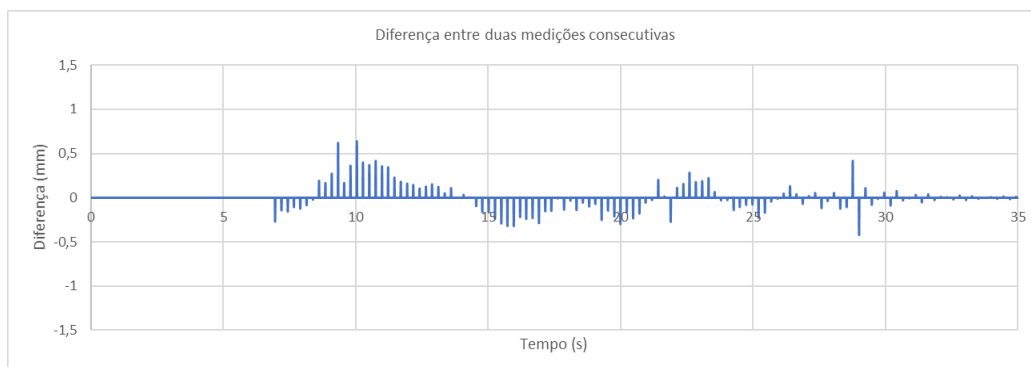


Figura D.3.23 Diferença entre duas medições do sensor LM150, em função do tempo, para uma velocidade de rotação do pneu de 16º/s.

## ANEXO E: *Grafcets* comportamentais

### E.1. Grafcet 0: Supervisão e segurança

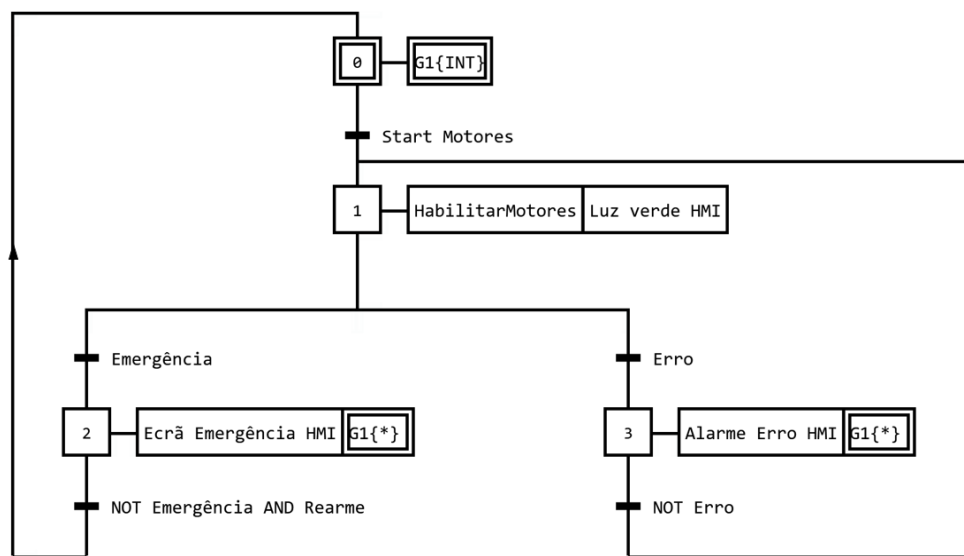


Figura E.1 *Grafcet* G0.

## E.2. Grafcet G1: Modo de funcionamento do sistema

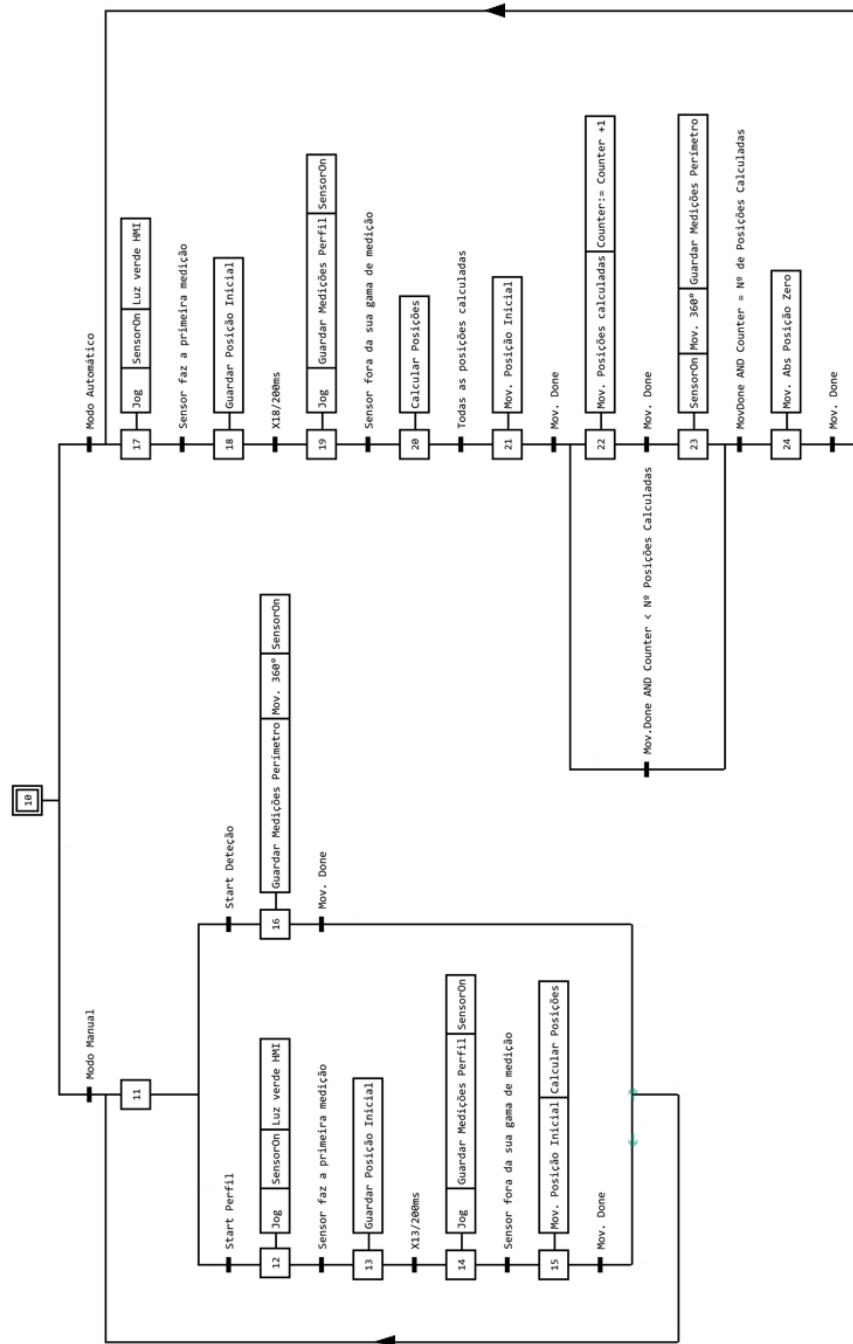


Figura E.2 *Grafcet* G1.

### E.3. Grafcet G2: Controlo sensor

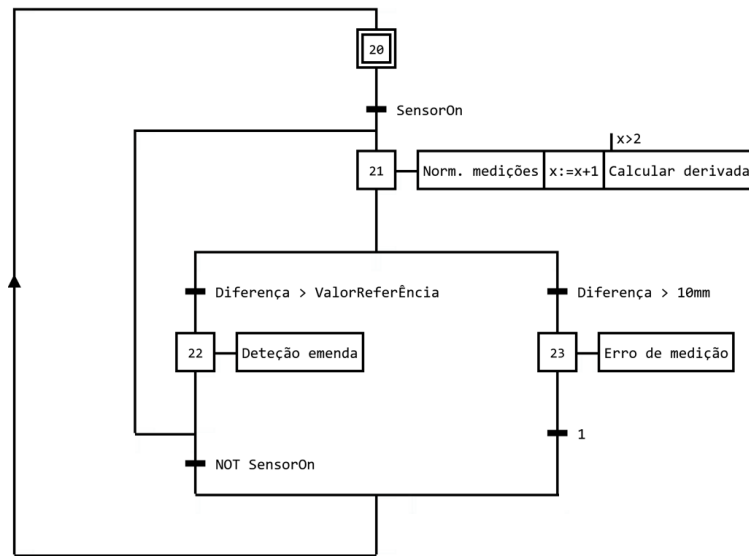


Figura E.3 Grafcet G2.

### E.4. Grafcet G3: Tratamento medições

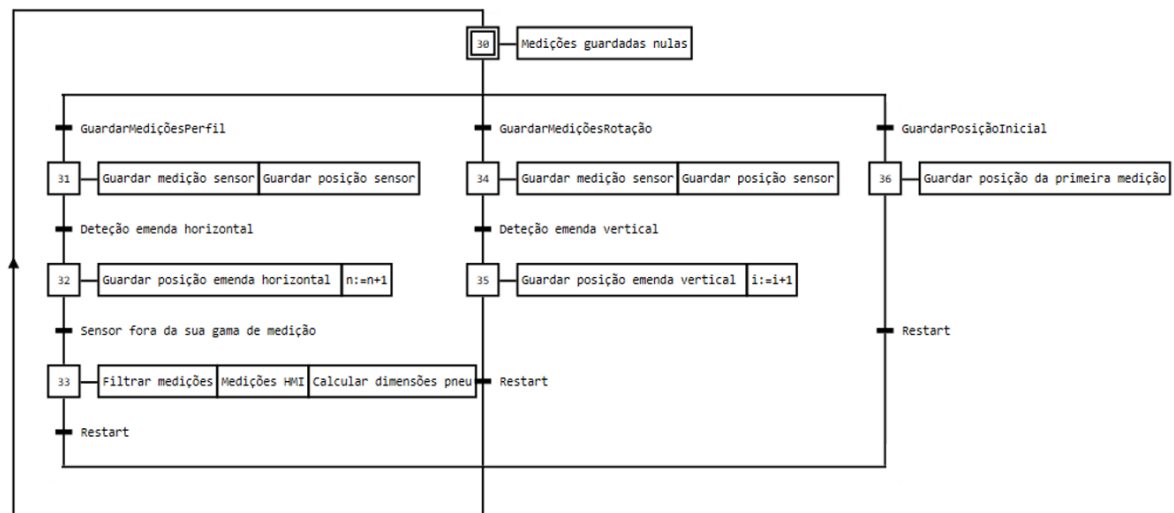


Figura E.4 Grafcet G3.

### E.5. Grafcet G4: Cálculo das posições do pneu

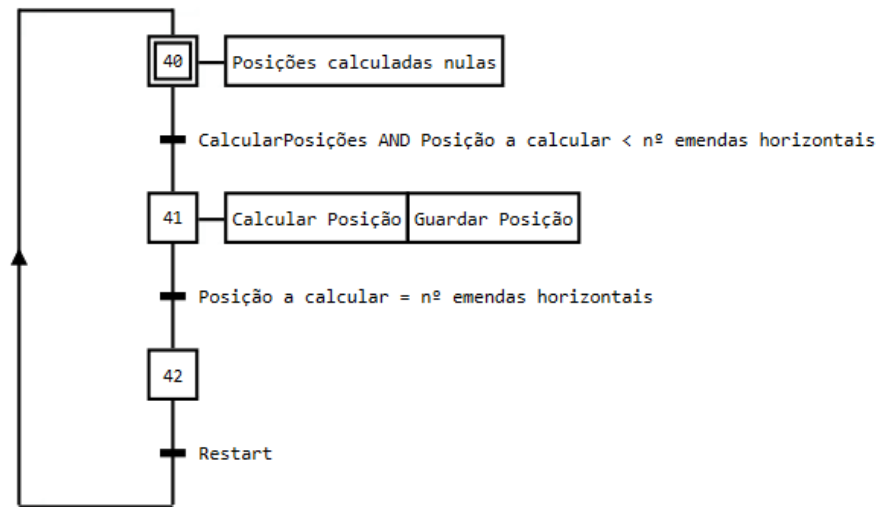


Figura E.5 Grafcet G4.