



Tiago Miguel dos Santos Simões

Mestre

Comando do binário aplicado a um motor e obtenção automática da sua característica Binário - Velocidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Mário Fernando da Silva Ventim Neves,
Professor Doutor, FCT/ UNL
Co-orientador: Pedro Miguel Ribeiro Pereira, Mestre,
FCT/ UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma
Arguente: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina
Vogais: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves
Mestre Pedro Miguel Ribeiro Pereira



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Agosto 2011

Comando do binário aplicado a um motor e obtenção automática da sua característica Binário – Velocidade.

Copyright

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Resumo

Com o aparecimento da instrumentação virtual, torna-se indispensável a sua aplicação no estudo de máquinas eléctricas.

O trabalho descrito nesta dissertação tem como objectivo a implementação de uma nova plataforma, criada em LabView, para controlar um Sistema de Carga, fazendo uso de um aparelho capaz de controlar o binário de carga aplicado a um Motor de Indução. Este aparelho possibilita a aquisição de valores numéricos de binário, da velocidade e da corrente do Motor de Indução permitindo traçar automaticamente a característica Binário - Velocidade do Motor em estudo.

São objecto de estudo ao longo desta dissertação todos os componentes que foram necessários para a construção do aparelho, que como referido possibilita a aquisição dos valores vindos do freio e do Motor, bem como o conversor analógico digital.

É ainda feita uma descrição pormenorizada da instrumentação virtual utilizada na plataforma de software desenvolvida.

Palavras-Chave

Motor de indução trifásico, Freio de Pó, Labview, Instrumentação Virtual, característica Binário - Velocidade.

Abstract

The creation of virtual instrumentation brings up the possibility of its application in the studie of electrical machines.

The goal of the work described in this thesis concerns the implementation of a new platform, created in LabView, to control a charge system by using a device able to regulate the torque of applied to an Induction motor. The device will enable the acquisition of numerical values of torque, speed and current of the induction motor allowing to automatically drawing the torque-speed characteristic of the studied motor.

All the tools and components used in the construction of the device as well as the digital converter are described in detail in this thesis.

It is also described in detail the software platform developed.

Keywords

Three Phase Induction Motor, Powder Brake, LabView, Virtual Instrumentation, Torque-Speed Characteristic.

Índice de Matérias

ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
CAPÍTULO 1	21
1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Estrutura da dissertação	22
CAPÍTULO 2	25
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	25
2.1. A Instrumentação Virtual na Monitorização de Sistemas	26
2.1.1. Aplicações Existentes	26
2.2. Funcionamento do motor de indução	27
2.2.1. Circuito equivalente do motor de indução	28
2.2.2. Característica binário – velocidade	32
2.3. Freio de Pó	33
2.3.1. Constituição e Princípio de Funcionamento	34
CAPÍTULO 3	35
3. ELECTRÓNICA DE INSTRUMENTAÇÃO	35
3.1. Freio de Pó Magnético	35
3.1.1. Cálculo das Características do Freio	36
3.2. Fonte de Alimentação	37
3.2.1. Rectificador	38
3.2.1.1. Rectificador de Onda Completa em Ponte	38
3.2.2. Filtragem	40
3.2.2.1. Filtro com condensador	40
3.2.3. Dimensionamento da Fonte de alimentação	41
3.3. Gerador de Ondas Triangulares	45
3.3.1. PWM (Pulse Wave Modulation)	46
3.3.2. Conversores CC/CC – Reguladores CC	46
3.3.3. Optocoupler	47
CAPÍTULO 4	49
4. INSTRUMENTAÇÃO	49
4.1. Sistema de Instrumentação	49
4.1.1. Elemento sensor	49
4.1.2. Processamento de sinal	51
4.1.3. Apresentação de dados	53
4.2. Instrumentação Virtual	53
4.2.1. Vantagens	54

4.3.	LabView	54
4.3.1.	Instrumentos Virtuais e ambiente de programação	55
4.4.	Sistema de controlo implementado – VirtualLab	57
4.4.1.	Esquema desenvolvido	57
4.4.2.	Estrutura do programa	58
4.4.3.	Interface com o utilizador e VI's implementados	60
4.4.3.1.	Menu Variador de Velocidade	62
4.4.3.2.	Menu Adquirir Característica	63
CAPITULO 5.....		73
5.	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS	73
5.1.	Parâmetros da Máquina Assíncrona	73
5.1.1.	Ensaio da Máquina Assíncrona	74
5.1.1.1.	Medida da resistência do estator	74
5.1.1.2.	Ensaio em vazio	75
5.1.1.3.	Ensaio em curto-circuito	76
5.2.	Comando de Freio	79
5.2.1.	Circuito Implementado	79
5.3.	Montagem Experimental	84
5.3.1.	Material utilizado	85
5.4.	Resultados Experimentais	85
5.4.1.	Resultados do “Variador de Velocidade”	86
5.4.2.	Resultados “Adquirir Característica”	87
CAPITULO 6.....		91
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	91
6.1.	Desenvolvimentos Futuros	92
BIBLIOGRAFIA.....		93
ANEXOS.....		95
ANEXO A – MÓDULOS DESENVOLVIDOS EM LABVIEW		97
ANEXO A.1 – MENU “VARIADOR DE VELOCIDADE”		97
Anexo A.1.1 – Front Panel		97
Anexo A.1.1 – Block Diagram		99
ANEXO A.2 – MENU “ADQUIRIR CARACTERÍSTICA”		101
Anexo A.2.1 – Front Panel (1 - Característica Binário - Velocidade)		101
Anexo A.2.2 – Front Panel (2 - Característica Binário – Velocidade/ Teórico Vs Prático) ..		103
Anexo A.2.3 – Front Panel (3 - Característica Corrente - Velocidade).....		105
Anexo A.2.4 – Block Diagram (1/2).....		107
Anexo A.2.4 – Block Diagram (2/2).....		109
ANEXO A.3 – SUB VI CARACTERÍSTICA TEÓRICA VS PRÁTICO		111
Anexo A.3.1 – Front Panel (“Característica Máquina Assíncrona”).....		111
Anexo A.3.2 – Front Panel (“Simulação da Característica binário - velocidade”)		113

<i>Anexo A.3.3— Block Diagram</i>	<i>115</i>
---	------------

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Diagrama de blocos da plataforma desenvolvida.....	22
Figura 2.1 – Sistema de Monitorização Implementado [5].....	27
Figura 2.2 - Circuito equivalente por fase da máquina de indução, representando a ligação magnética estator-rotor [6].	29
Figura 2.3 - Circuito equivalente por fase da máquina assíncrona, reduzido ao estator [6].....	30
Figura 2.4 - Diagrama vectorial do circuito por fase [6].	31
Figura 2.5 - Curvas binário – velocidade de uma máquina de indução trifásica, mostrando regiões de travagem e de funcionamento como motor e gerador.	33
Figura 2.6 - Freio de Pó Magnético [8].	34
Figura 3.1 - Diagrama de montagem da solução.	35
Figura 3.2 - Freio de Pó DL 1019P	36
Figura 3.3 – Diagrama de blocos representativo de uma fonte de alimentação.....	37
Figura 3.4 – Rectificador de onda completa em ponte [9].	38
Figura 3.5 – Semi-ciclo positivo [9].	38
Figura 3.6 – Semi-ciclo negativo [9].	39
Figura 3.7 – Formas de onda [9].	39
Figura 3.8 - Filtro com um único condensador.....	40
Figura 3.9 - Forma da tensão e saída de um rectificador de onda completa com condensador [10]. .	41
Figura 3.10 - Diagrama de Blocos de uma Fonte de Alimentação DC.	41
Figura 3.11 - Transformador redutor - AC/AC, 230V/15V.....	42
Figura 3.12 - Ponte rectificador usada W005G THRU W04G [17].....	43
Figura 3.13 - Circuito rectificador implementado e forma de onda a saída da ponte.	43
Figura 3.14 – Rectificador de Onda, com aplicação de um filtro RC.	44
Figura 3.15 - Circuito de supressão de corrente do freio utilizado.....	44
Figura 3.16 – Esquema electrónico do gerador de ondas triangulares [11].	45
Figura 3.17 – Resultado da aplicação de um PWM.....	46
Figura 3.18 - Regulador CC.	47
Figura 3.19 - Exemplo de tensão de entrada e de saída do regulador.....	47

Figura 3.20 – Optoacoplador Óptico [12].	48
Figura 4.1 – Diagrama de um sistema de medição.	49
Figura 4.2 - Transdutor DL 2031M, De Lorenzo Group [14].	50
Figura 4.3 - Sensor de Carga DL 2006E, De Lorenzo Group [14].	50
Figura 4.4 – Unidade de medição digital DL 10055D, De Lorenzo group [14].	51
Figura 4.5 – Placa de Aquisição de Dados NI USB - 6008, National Instruments [7].	52
Figura 4.6 - Constituição interna da placa de aquisição de dados NI USB - 6008, National Instruments [7].	52
Figura 4.7 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de medição.	53
Figura 4.8 - Exemplo de painel frontal de um VI.	56
Figura 4.9 - Exemplo de um diagrama de blocos de um VI.	56
Figura 4.10 – Diagrama do sistema desenvolvido de aquisição automática da característica do MIT.	58
Figura 4.11 - Estrutura geral do <i>software</i> desenvolvido em Labview.	59
Figura 4.12 - Painel de monitorização principal do VirtualLab.	60
Figura 4.13 – Block diagram do Menu principal do VirtualLab.	61
Figura 4.14 – Informação sobre o trabalho executado	62
Figura 4.15 – Diagrama de blocos do <i>Variador de Velocidade</i>	62
Figura 4.16 – Painel de controlo <i>Variador de Velocidade</i> .	63
Figura 4.17 – Fluxograma do módulo <i>Adquirir Característica</i> .	64
Figura 4.18 – Diagrama de blocos implementado para efectuar a divisão de tensão de saída da placa.	65
Figura 4.19 – Parte <i>Block Diagram</i> do menu <i>Adquirir Característica</i>	66
Figura 4.20 – Menu secundário, apenas activo quando seleccionado o Menu Adquirir Característica.	66
Figura 4.21 - Painel de Controlo do menu <i>Característica Binário – Velocidade</i> .	67
Figura 4.22 - Painel de Controlo do menu <i>Característica Binário – Velocidade / Teórico Vs Prático</i> ..	68
Figura 4.23 – Fluxograma do Sub VI <i>teseteoribinario.vi</i> , para aquisição do valor de Binário teórico. .	69
Figura 4.24 – Menu de alteração das características da Máquina Assíncrona.	70
Figura 4.25 – Menu de simulação da característica binário – velocidade teórico.	71
Figura 4.26 – Menu característica corrente – Velocidade.	71
Figura 5.1 – Motor de Indução Trifásico usado.	74

Figura 5.2 – Circuito equivalente por fase da máquina assíncrona para o ensaio em vazio.	75
Figura 5.3 - Circuito equivalente por fase da máquina assíncrona, ensaio em curto-circuito.	77
Figura 5.4 - Caixa de Controlo de Freio Implementado.	79
Figura 5.5 – Arquitectura do Comando de Freio implementado.	80
Figura 5.6 - Esquema de Ligação do Acoplador Óptico [18].	81
Figura 5.7 – Esquema do circuito de Darlington, BD675 [18].	82
Figura 5.8 - a) Onda Triangular Gerada; b) Exemplo do Sinal após comparador PWM	83
Figura 5.9 – Visão geral do comando do freio implementado.....	83
Figura 5.10 – Diagrama de Blocos do sistema Implementado	84
Figura 5.11 – Esquema da Montagem efectuada	86
Figura 5.12 – Binário ao longo do tempo	87
Figura 5.13 - Velocidade ao longo do tempo	87
Figura 5.14 - Característica Binário – Velocidade.....	88
Figura 5.15- Característica Binário – Velocidade / Teórico Vs Prático	89

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 - Resultados do ensaio em vazio [6].	76
Tabela 5.2 - Resultados do ensaio em Curto-circuito [6].	78
Tabela 5.3 – Valores dos componentes a utilizar [6].	83

Lista de Símbolos

T_e	Binário electromagnético.	[N.m]
T_m	Binário mecânico.	[N.m]
I_e	Corrente no estator.	[A]
I_r'	Corrente no rotor reduzido ao estator.	[A]
I_r	Corrente no rotor.	[A]
I_{nom}	Corrente nominal.	[A]
s	Escorregamento do motor.	
f_{in}	Frequência de entrada.	[Hz]
f_{out}	Frequência de saída.	[Hz]
f_{est}	Frequência do Estator.	[Hz]
f_{rot}	Frequência do rotor.	[Hz]
B	Ganho de fase.	
p	Número de pares de pólos.	
T	Período.	[s]
P_m	Potência mecânica.	[W]
P_g	Potência no Entreferro.	[W]
N	Relação de transformação.	
R_r'	Resistência do rotor reduzida ao estator.	[Ω]
R_f	Resistência interna do freio.	[Ω]
R_e	Resistência no estator.	[Ω]
R_r	Resistência no rotor.	[Ω]
U_d	Tensão contínua da Carga.	[V]
U_p	Tensão de pico da fonte.	[V]

U_{nom}	Tensão nominal de alimentação.	[V]
U_e	Tensão simples no estator.	[V]
U_r'	Tensão simples no rotor reduzido ao estator.	[V]
U_r	Tensão simples no rotor.	[V]
n_S	Velocidade de sincronismo.	[rpm]
ω_m	Velocidade mecânica de rotação do rotor.	[rad.s ⁻¹]
n_m	Velocidade mecânica do rotor.	[rpm]
ω_S	Velocidade síncrona angular.	[rad.s ⁻¹]

Capítulo 1

1. Introdução

A aquisição de parâmetros e característica da máquina é uma das tarefas fundamentais para que se possa proceder ao accionamento de máquinas assíncronas, uma vez que é a partir deles que o dimensionamento dos controladores a utilizar é realizado. Geralmente, são usados procedimentos clássicos de medição, através da instrumentação clássica, baseados nos testes de rotor bloqueado e vazio para o cálculo dos parâmetros da máquina. No entanto, é possível empregar técnicas de identificação de sistemas para automatizar a obtenção da característica Binário - Velocidade, bem como melhorar a sua precisão.

A integração entre a técnica de accionamentos de máquinas eléctricas (Máquinas Eléctricas e Electrónica de Potência), as técnicas de controlo digital, as técnicas de visualização e a ligação dos processos, tradicionalmente domínios de especialidades diferentes, são factores fundamentais na modernização dos sistemas.

Com a finalidade de criar uma nova ferramenta de estudo de máquinas eléctricas, mais especificamente da máquina assíncrona, foi planeado o desenvolvimento de uma plataforma que permita a aquisição automática da característica Binário - Velocidade de Motores de Indução. Assim, as áreas de estudo abrangidas por este trabalho são:

- Máquinas Eléctricas - Motor de Indução Trifásico:
 - Característica velocidade - binário;
 - Controlo de velocidade por modificação da carga.
- Electrónica de Instrumentação em Accionamentos:
 - Comando do freio;
 - Conversor de analógico - digital;
- Linguagem de programação:
 - Ferramenta global de projecto - “NI USB – 6008 – National Instruments”;
 - Linguagem de programação - “LabView”.

A nova ferramenta desenvolvida deverá ser capaz integrar máquinas assíncronas de comando electrónico, variadores/controladores e *software* de programação e supervisão. O objectivo final deste trabalho consiste então na supervisão de alguns dos parâmetros que caracterizam o funcionamento de um motor de indução trifásico, nomeadamente a corrente, binário e velocidade. Deverá ainda permitir modificar o regime de funcionamento por alteração do binário e aquisição da sua característica Binário - Velocidade.

O trabalho iniciou-se com o estudo dos diferentes módulos e do modo como os mesmos se interligam, bem como dos pacotes de *software* de programação e monitorização que possibilitaram o desenvolvimento da plataforma de *software*. A Figura 1.1 mostra o diagrama de blocos do trabalho a implementar:

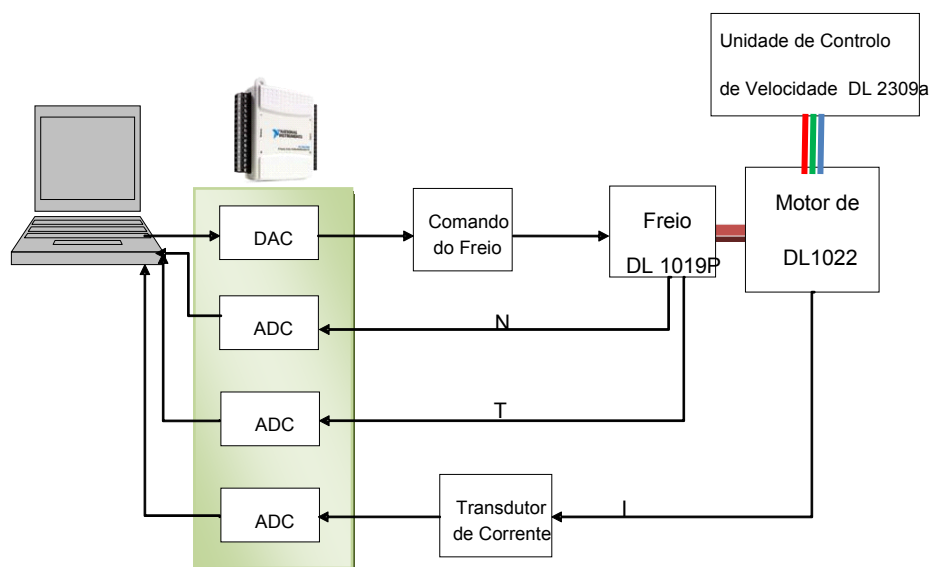


Figura 1.1 – Diagrama de blocos da plataforma desenvolvida.

Apesar da existência de sistemas baseados em instrumentação Virtual, já anteriormente desenvolvidos, para efectuar o estudo e controlo de máquinas eléctricas o presente trabalho tinha como principal objectivo a construção de um novo dispositivo capaz de adquirir, de forma automática, a característica Binário – Velocidade da máquina assíncrona sem recurso aos métodos tradicionais. O equipamento irá servir de base de estudo à máquina assíncrona dos futuros alunos, no laboratório Electrotecnia e Máquinas Eléctricas da FCT-UNL.

1.1. Estrutura da dissertação

Para que pudesse ser alcançado o resultado pretendido tendo em vista o estudo e compreensão da máquina a assíncrona, esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos e um anexo. No presente capítulo, pretende-se fazer uma breve exposição dos principais temas desenvolvidos, bem como, fazer uma ligeira revisão dos conteúdos de cada capítulo.

O segundo capítulo, chamado Enquadramento Teórico, apresenta uma descrição teórica da máquina eléctrica usada neste trabalho. As secções integrantes apresentam o estado de arte relativa

ao uso da instrumentação virtual, alguma teoria relativa a Máquina de Indução Trifásica e ao Freio de Pó.

No terceiro capítulo, é feita uma exposição da parte electrónica de instrumentação em estudo assim como uma apresentação e descrição do aparelho concebido. Na primeira secção, é feita uma abordagem teórica da electrónica necessária para a concepção do comando do freio. Na segunda secção, é apresentado o aparelho em si fazendo-se referência à sua constituição e dimensionamento.

O quarto capítulo apresenta o *software* desenvolvido e a vantagem do uso de instrumentação virtual. O *software* foi desenvolvido em LabView, propositadamente para a aquisição e controlo dos dados vindos do freio de pó e do motor de indução trifásico. A primeira secção, apresenta as características gerais de toda a instrumentação de apoio ao *software* e as seguintes fazem uma descrição mais detalhada do programa desenvolvido e uma visão geral de todas as funcionalidades desenvolvidas.

No quinto capítulo, é feita uma exposição dos resultados obtidos, fazendo uso das soluções implementadas e demonstrando os resultados dos testes de validação realizados.

Finalmente, no sexto capítulo, são apresentadas algumas conclusões do trabalho e referidas algumas possibilidades de desenvolvimento futuro do mesmo.

O anexo apresenta o diagrama de blocos do *software* implementado.

A divisão por etapas permite uma abordagem do problema por fases, facilitando desta forma a compreensão do objectivo final.

Capítulo 2

2. Enquadramento Teórico

Ao longo dos últimos séculos os motores eléctricos foram adquirindo cada vez mais importância no accionamento de cargas mecânicas. Estas máquinas são capazes de transformar energia eléctrica em energia mecânica, ocorrendo algumas perdas de energia durante o processo. De entre as máquinas eléctricas o motor de indução trifásico evidencia-se por ter um princípio de funcionamento elementar, construção resistente e pouca necessidade de manutenção, bem como um preço reduzido, devido à automação do seu processo de fabrico.

Com o desenvolvimento tecnológico a aplicação do motor de indução trifásico tem vindo a expandir-se, devido o aparecimento de novos métodos de controlo, permitindo a aplicação deste tipo de equipamento a outro tipo de aplicação, contribuindo assim para uma utilização mais racional da energia eléctrica [1].

Presentemente, e de uma forma geral, os sistemas de accionamento assentam-se nos seguintes elementos:

- Motor eléctrico: responsável pela transformação de energia eléctrica em mecânica;
- Electrónica de Potência: responsável pelo controlo/comando da potência eléctrica cedida ao motor;
- Transmissão mecânica: responsável pela aplicação da velocidade e da inércia entre o motor e a carga.

Face às novas exigências é cada vez mais importante a utilização de sistemas de instrumentação virtual, para o estudo e controlo deste tipo de equipamentos. É assim facilitado o estudo e desenvolvimento de novos equipamentos capazes de monitorizar o motor de indução trifásico.

O projecto sobre sistema de carga controlado para aquisição da característica de motores de indução consiste no estudo da resposta de um motor de indução trifásico (MIT) em operação, sob carga através do controlo da corrente do freio de pó.

2.1. A Instrumentação Virtual na Monitorização de Sistemas

O impacto da tecnologia digital na instrumentação é cada vez mais comum, quer pelas novas funcionalidades introduzidas nos aparelhos quer pela possibilidade de adaptação dos próprios sistemas.

Um dos pioneiros na ciência de computação foi John Von Neumann que se dedicou à teoria dos autómatos desde 1933 até 1957, trazendo várias perspectivas e abrindo novas direcções de pesquisa [2].

O conceito de instrumento virtual foi introduzido em 1983 por Truchard e Kodosky da *National Instruments*, no qual as características fundamentais dos instrumentos são definidas por *software*. O aparecimento destas tecnologias de software, tais como os produtos da gama LabVIEW da *National Instruments*, tornou mais fácil o desenvolvimento de instrumentos virtuais e aplicação deste tipo de equipamentos em outras áreas de estudo [3].

2.1.1. Aplicações Existentes

A aplicação desenvolvida e apresentada ao longo da presente dissertação, pretendia criar um dispositivo utilizando a instrumentação virtual para utilização no laboratório de máquinas eléctricas. Este será utilizado para efectuar o estudo e aquisição de alguns dos parâmetros do Motor de Indução Trifásico, substituindo assim o uso dos tradicionais equipamentos de medição.

Actualmente, os instrumentos virtuais já são utilizados em diversas áreas, desde a Informática Industrial ao uso cada vez mais vulgarizado nos laboratórios para o controlo e monitorização de equipamentos Eléctricos e Electrónicos, exemplo disso são alguns dos sistemas já desenvolvidos:

- **Sistema de Instrumentação e Controlo de Feedback** - O sistema foi desenvolvido para o controlo de equipamento usado nos Laboratório de Engenharia, de forma a possibilitar a formação dos engenheiros e técnicos que trabalham nesta área. Os equipamentos de feedback são baseados no princípio da instrumentação Virtual. O *Servo Fundamentals Trainer* da *Feedback* é um exemplo de um sistema de teste que permite o estudo e controlo de um mecanismo utilizando um motor de corrente contínua, com uma variedade de sensores e controladores analógicos e digitais. Toda a instrumentação de teste necessária é fornecida pelo software [4].
- **Monitorização e Controlo Motor de Indução Trifásico, da Universidade do Minho**
 - Este sistema foi desenvolvido com o objectivo de possibilitar o estudo e

apresentação aos estudantes das técnicas de automatização industrial, sendo possível através do sistema implementado da Figura 2.1, estudar diversos comportamentos do motor perante diferentes curvas V/f, traçar as curvas binário – velocidade, tensão – frequência, variação da corrente e factor potencia.

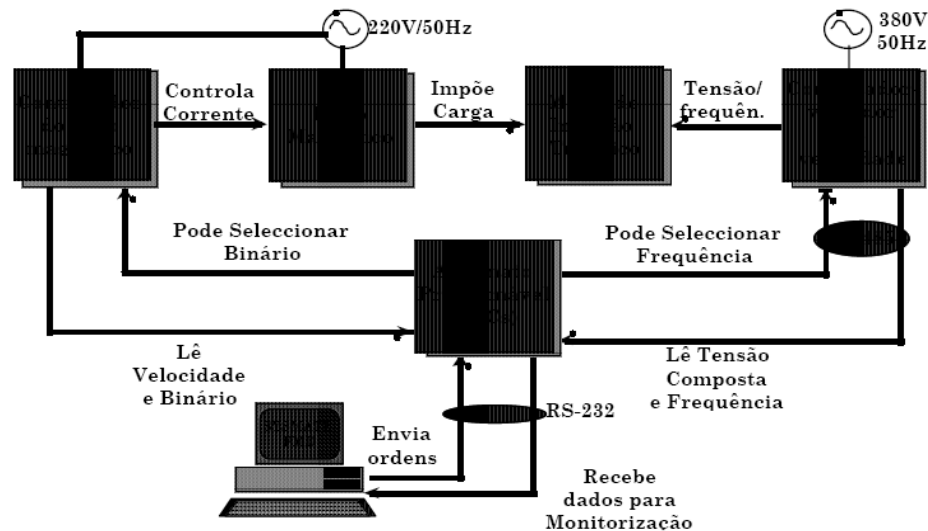


Figura 2.1 – Sistema de Monitorização Implementado [5].

O ambiente usado para o desenvolvimento ao nível de software que permite visualizar e supervisionar os parâmetros que caracterizam a máquina assíncrona, foi a linguagem de programação GMSII. Todo o sistema desenvolvido teve por base o princípio da Instrumentação Virtual [5].

2.2. Funcionamento do motor de indução

Como o presente trabalho incide sobre as principais características dos motores de indução, torna-se importante relembrar algumas noções, já bastante conhecidas e estudadas relativas a estas máquinas que surgirão no decorrer dos testes/simulações elaborados.

Nas máquinas assíncronas o rotor tem sempre rotação inferior à do campo girante originando corrente e binário induzidos. A diferença relativa entre as velocidades do rotor e do fluxo do estator é representada através da equação (1).

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \times 100 \% \quad (1)$$

em que

s - Escorregamento do motor;

n_s - Velocidade de sincronismo;

n_m - Velocidade mecânica do rotor.

O escorregamento do motor dependerá de perdas mecânicas por atrito. Quando o motor roda em vazio, o escorregamento é muito pequeno, apenas o suficiente para suportar as perdas mecânicas, dado que o binário necessário é mínimo.

O campo girante induz forças electromotrizes nos condutores do rotor, o que permite a circulação de correntes que, por sua vez, originam um campo magnético com o qual o campo girante interage. Quando a velocidade do rotor, ω_r , é diferente da do campo girante, ω_e , o rotor “escorrega” relativamente ao campo girante. Devido a este facto, a frequência do rotor é normalmente expressa em função da frequência do estator através do coeficiente de escorregamento, s :

$$\omega_{sl} = s \times \omega_e \quad (2)$$

Onde ω_{sl} corresponde à velocidade do rotor relativamente à velocidade do campo girante do rotor.

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \quad (3)$$

A velocidade de rotação mecânica, ω_m , dada pela equação (4), depende da velocidade de rotação eléctrica ω_r , do rotor e do número de pares de pólos da máquina, p .

$$\omega_m = \frac{\omega_r}{p} \quad (4)$$

2.2.1. Circuito equivalente do motor de indução

A Figura 2.2 mostra o esquema de circuito equivalente por fase da máquina de indução, representando a ligação magnética rotor-estator.

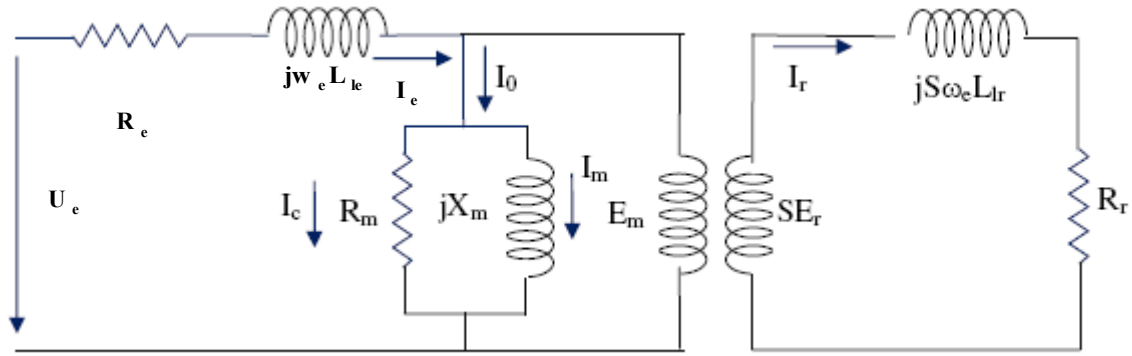


Figura 2.2 - Circuito equivalente por fase da máquina de indução, representando a ligação magnética estator-rotor [6].

A reactância do enrolamento do estator é dada pela expressão (5) respectivamente:

$$jX_r = j\omega_r L_{lr} = js\omega_e L_{lr} \quad (5)$$

Pela análise do circuito torna-se possível deduzir as equações (6) e (7) por fase relativas ao estator e ao rotor, respectivamente:

$$U_e = R_e I_e + j\omega_e L_{le} I_e + E_m \quad (6)$$

$$sE_r = R_r I_r + js\omega_e L_{lr} I_r \quad (7)$$

Dividindo ambos os termos da equação (7) pelo escorregamento obtém-se:

$$E_r = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_e L_{lr} I_r = \left(R_r + R_r \frac{1-s}{s} \right) I_r + j\omega_e L_l \quad (8)$$

Pela análise da expressão (9) conclui-se que a resistência do rotor resulta de uma parcela constante, relativa às perdas por efeito joule do rotor, e de uma segunda, dependente do escorregamento, uma resistência de carga fictícia que solicita à máquina uma energia eléctrica equivalente à energia mecânica requerida à máquina.

$$\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \frac{1-s}{s} \quad (9)$$

Tal como nos estudos efectuados no caso do transformador, é possível fazer a substituição das grandezas no rotor por grandezas reduzidas ao estator utilizando a relação de transformação N . Assim, obtêm-se as seguintes expressões para a corrente, tensão, coeficiente de indução e resistência, correspondentemente, deduzidas no estator:

$$I_r' = \frac{I_r}{N} \quad (10)$$

$$U_r' = N U_r \quad (11)$$

$$L_{lr}' = N^2 L_r \quad (12)$$

$$R_r' = N^2 R_r \quad (13)$$

A Figura 2.3 ilustra o circuito equivalente por fase da máquina de indução reduzida ao estator.

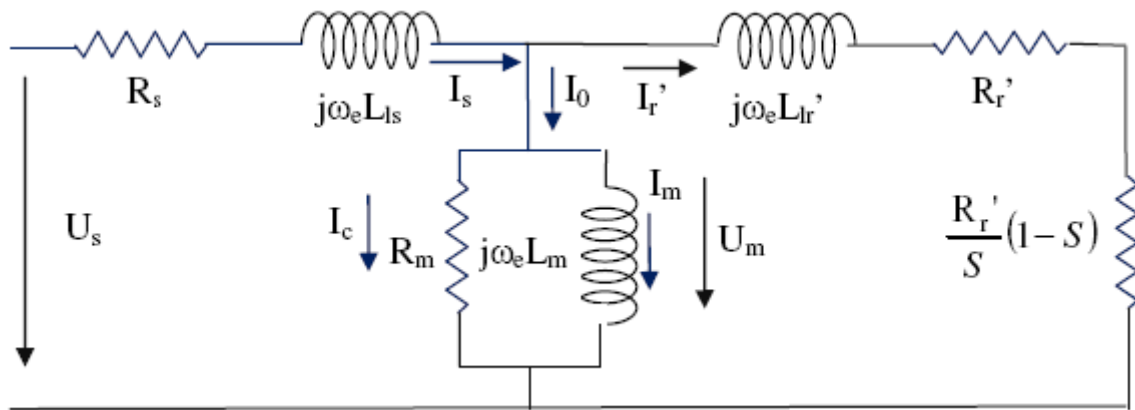


Figura 2.3 - Circuito equivalente por fase da máquina assíncrona, reduzido ao estator [6].

Da análise do circuito equivalente da Figura 2.3, através do estudo das potências podemos obter o diagrama vectorial do circuito por fase da Figura 2.4.

A partir das expressões (3) e (4) podem obter-se as seguintes equações:

$$\omega_r = \omega_e (1 - s) \quad (19)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_e (1 - s)}{p} \quad (20)$$

Utilizando equações previamente deduzidas, nomeadamente a da velocidade mecânica, obtém-se a expressão relativa ao binário electromagnético.

$$T_e = 3p \frac{R_r'}{s\omega_e} \frac{U_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_e^2 (L_{ls} + L_{lr}')^2} \quad (21)$$

2.2.2. Característica binário – velocidade

Partindo da equação (21) é possível traçar a característica binário – velocidade da máquina de indução, como por exemplo a representada na Figura 2.5, onde se assinalam três zonas de funcionamento do motor: região de freio, região de motor e região de gerador.

Na zona de freio, o rotor roda na direcção oposta do campo girante do estator, sendo o escorregamento, s , maior do que 1. Para que o motor funcione neste modo é necessário alterar a sequência de fases de alimentação dos enrolamentos do estator com o rotor em movimento ou aplicar uma carga mecânica que conduza o rotor na direcção oposta ao campo girante do estator.

Na zona de motor, o rotor roda na mesma direcção do campo girante do estator, mas com velocidade inferior a este, tendo o escorregamento valores entre 0 e 1. Nesta zona o binário desenvolvido é positivo, assim como a velocidade de rotação e a potência desenvolvida.

Na zona de gerador, o rotor roda na mesma direcção do campo girante do estator, sendo a velocidade do rotor superior à velocidade do campo girante e o escorregamento negativo.

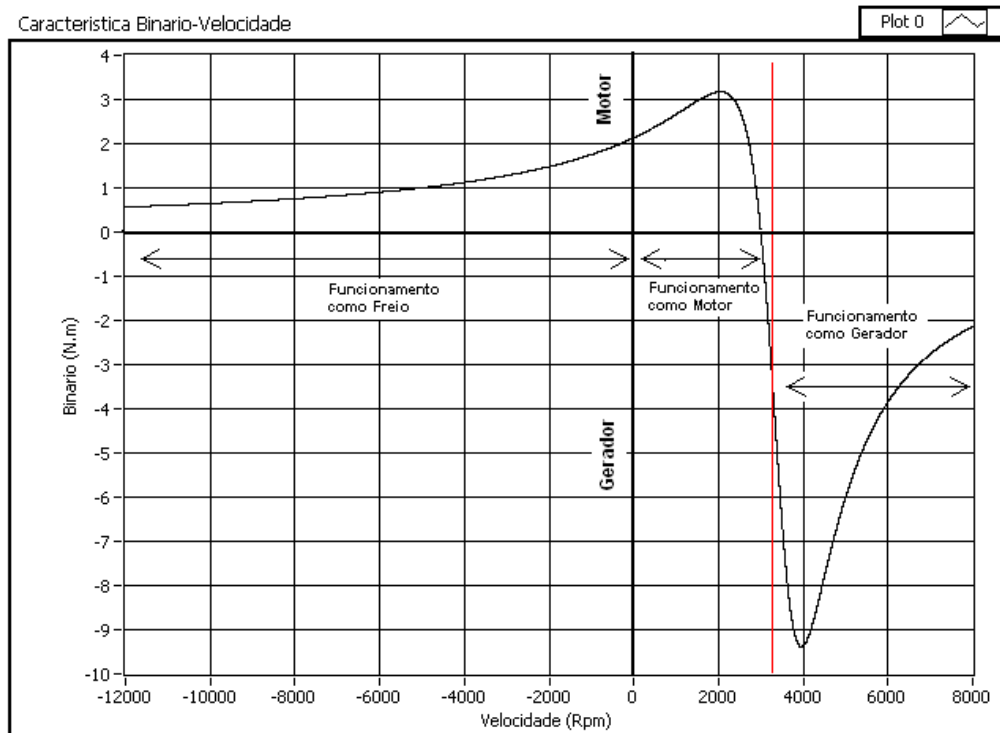


Figura 2.5 - Curvas binário – velocidade de uma máquina de indução trifásica, mostrando regiões de travagem e de funcionamento como motor e gerador.

2.3. Freio de Pó

Cerca de dois anos antes de os Estados Unidos entrarem na 1ª Guerra Mundial, o Office UHF Scientific Research and Development (OSRD), sob liderança do Dr. Vannevar Bush, delegou várias funções importantes tornando-se mais tarde o Ordnance Laboratory of the National Bureau of Standards (actualmente o National Institute of Standards and Technology, NIST). A investigação e desenvolvimento de material militar no NIST encontrava-se relacionada com uma grande variedade de trabalhos em equipamentos eléctricos e mecânicos de engenharia, matemática aplicada e química. Projectos na Área militar como o Exército e Marinha, levou à invenção do Freio de Pó Magnético, Figura 2.6.

Uma das primeiras e principais aplicações comerciais do Freio Magnético foi o sistema de travagem em comboios, estes ocorreram após estudos sobre Lei de Faraday e Lenz sendo uma inovação tecnológica que tem por base o electromagnetismo.

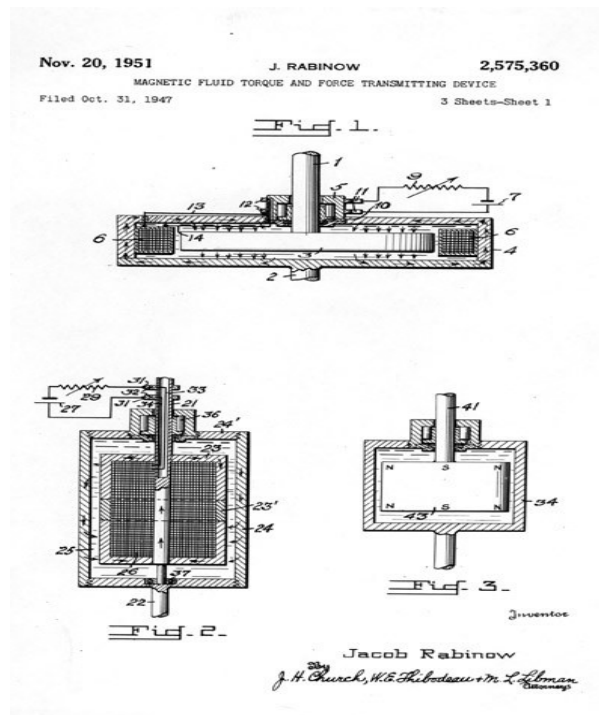


Figura 2.6 - Freio de Pó Magnético [8].

2.3.1. Constituição e Princípio de Funcionamento

O freio tem os seguintes quatro componentes principais: cápsula, eixo ou disco, bobina e pó magnético. A bobina é montada no interior da cápsula. O eixo ou disco é por sua vez encaixado no interior da bobina preenchendo-se por fim os espaços de ar com pó magnético.

Quando é aplicado uma corrente contínua ao freio, é criado um campo magnético, à medida que se aumenta a corrente, o campo magnético fica mais forte aumentando o binário. À medida que deixa de ser aplicada corrente, o pó magnético pode mover-se livremente na cavidade, o que, por sua vez, possibilita o livre movimento do eixo.

Uma vez que o campo é transmitido ao pó magnético, que por sua vez forma um campo magnético, o binário do freio de pó é independente da velocidade de escorregamento, dependendo apenas da corrente. A resposta das partículas ao campo é instantânea permitindo um controlo preciso.

Capítulo 3

3. Electrónica de Instrumentação

Nesta secção é feita uma apresentação da componente electrónica do trabalho, sendo portanto analisada em pormenor a parte referente ao comando do Freio de Pó. Esta componente é constituída por vários blocos que fazem uso de electrónica de potência.

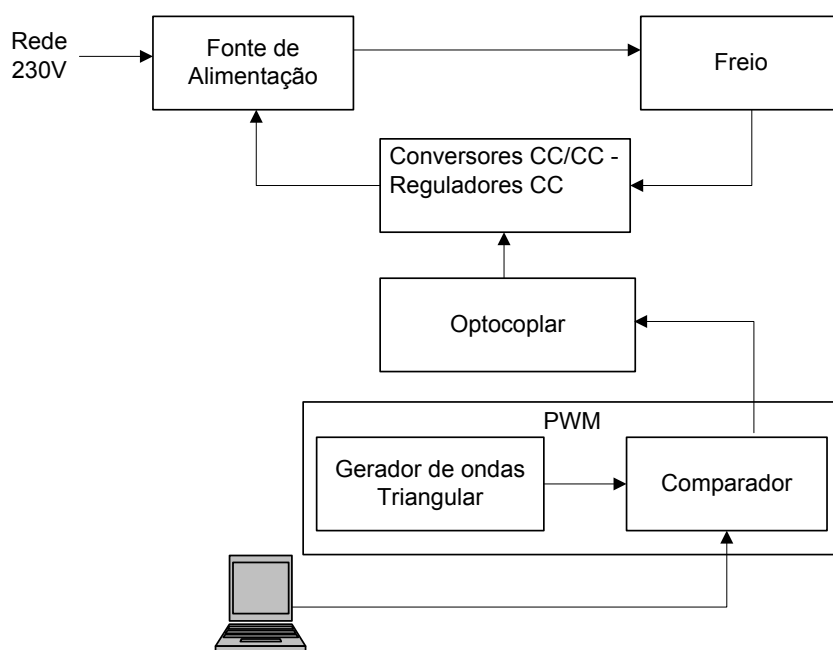


Figura 3.1 - Diagrama de montagem da solução.

Os vários blocos que compõem a solução irão ser descritos um a um e no final irá ser apresentada a solução final que permite o comando do Freio.

3.1. Freio de Pó Magnético

O Freio de Pó Magnético utilizado foi o DL 1019P do De Lorenzo Group, freio por reacção electromagnética, apropriado para o teste e ensaio dos motores em laboratório.

Características:

- Potência Nominal: 1,1 kW a 3000 rpm;
- Velocidade Máxima: 4000 rpm.

Este modelo é ideal para medir o binário das máquinas eléctricas uma vez que incorpora um transdutor óptico para medição de velocidade de modo digital. Possibilita ainda a montagem e ligação de uma célula de carga para execução da medição de binário da máquina de modo inteiramente digital e inclui um sistema de refrigeração axial accionado pela tensão de rede.



Figura 3.2 - Freio de Pó DL 1019P

O freio é constituído por quatro componentes principais:

- Armadura de Protecção;
- Disco/ eixo de rotação;
- Bobine;
- Pó Magnético.

3.1.1. Cálculo das Características do Freio

Para o estudo e dimensionamento do comando do freio é necessário determinar o valor da indutância do freio e o valor da resistência interna. A aquisição destas grandezas é importante para o dimensionamento do circuito de electrónica a implementar. Assim recorreu-se à utilização de um

Ohmímetro para determinar o valor da resistência e de uma ponte de medida para efectuar a medição do valor de Indutância.

- Valor da Resistência interna do Freio, $R_f = 155,55 \, \Omega$;
- Valor da Indutância do Freio, $L_f = 184,12 \, mH$.

Sabendo que a tensão máxima admissível aos terminais de freio é de 20 V, podemos calcular o valor da corrente máxima suportada.

$$I_c = \frac{U_{\max}}{R_f} \quad (22)$$

$$I_c \cong 130 \, mA$$

3.2. Fonte de Alimentação

A maioria dos equipamentos electrónicos é alimentada com tensão contínua, normalmente de 3 V a 30 V, embora a tensão que tenhamos disponível nas tomadas seja alternada de 230 V. Dado isto, torna-se então necessário transformar a tensão alternada disponível em tensão contínua fazendo uso de um circuito normalmente conhecido como fonte de alimentação [9]. A Figura 3.3 representa o diagrama de blocos de uma fonte de alimentação.

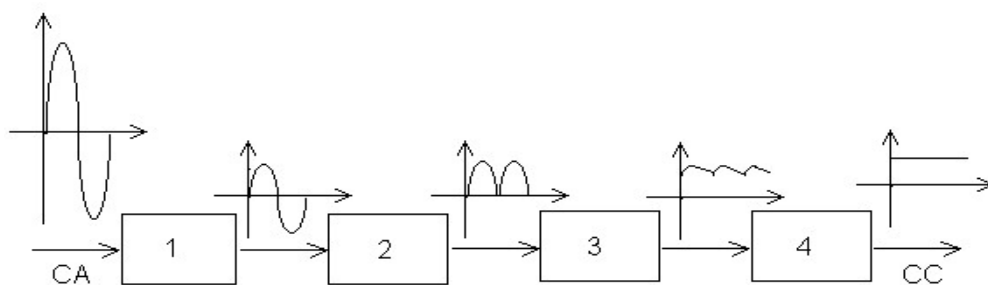


Figura 3.3 – Diagrama de blocos representativo de uma fonte de alimentação.

1 - Transformador monofásico: a sua função é reduzir o nível de tensão disponível nas tomadas 230V, para níveis compatíveis com os equipamentos electrónicos que temos;

2 - Rectificador: transforma a tensão alternada (ca) em tensão contínua (cc) pulsante;

3 - Filtro: converte a tensão CC pulsante vinda do rectificador em contínua CC com ondulação;

4 - Estabilizador: tem a função de transformar a tensão CC com ondulação em tensão CC pura, que é a tensão utilizada pelos equipamentos electrónicos (este estabilizador não foi no entanto utilizado neste trabalho uma vez que não havia necessidade de ter uma recta perfeita de saída).

3.2.1. Rectificador

O rectificador converte tensão alternada em tensão contínua pulsante. Um rectificador pode ser de meia onda, onda completa ou em ponte. O dispositivo geralmente utilizado nos rectificadores é o díodo, devido à sua característica de conduzir a corrente eléctrica num único sentido.

3.2.1.1. Rectificador de Onda Completa em Ponte

Este rectificador é um circuito que possui díodos sendo necessário analisá-lo nos dois semi-ciclos da tensão de entrada.

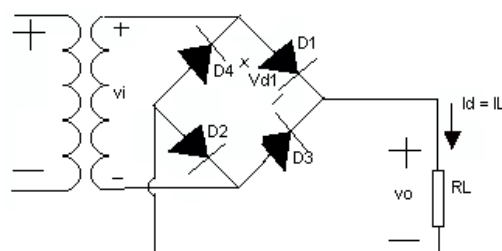


Figura 3.4 – Rectificador de onda completa em ponte [9].

Semi-ciclo positivo:

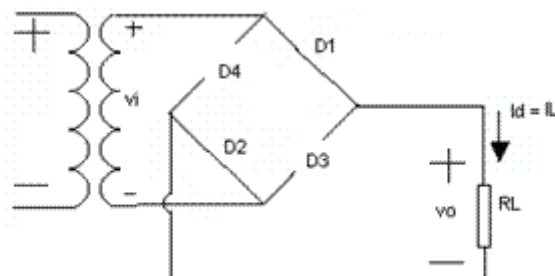


Figura 3.5 – Semi-ciclo positivo [9].

Neste semi-ciclo os díodos D1 e D2 conduzem enquanto os díodos D3 e D4 não conduzem.

Semi-ciclo negativo:

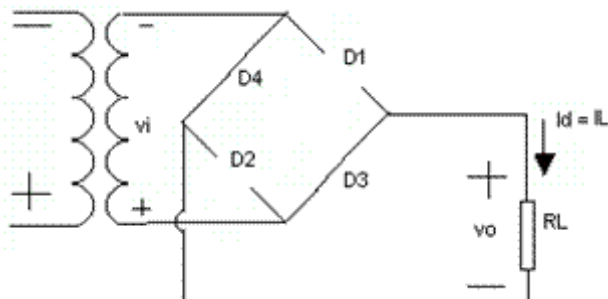


Figura 3.6 – Semi-ciclo negativo [9].

No semi-ciclo negativo acontece o inverso em relação ao semi-ciclo positivo, embora a tensão na carga permaneça com a mesma polaridade, o que tem implicações no aproveitamento do semi-ciclo negativo da tensão de entrada como tensão positiva na carga. Repetindo o que acontecia com o rectificador de onda completa com derivação central [9].

As formas de onda ficarão assim:

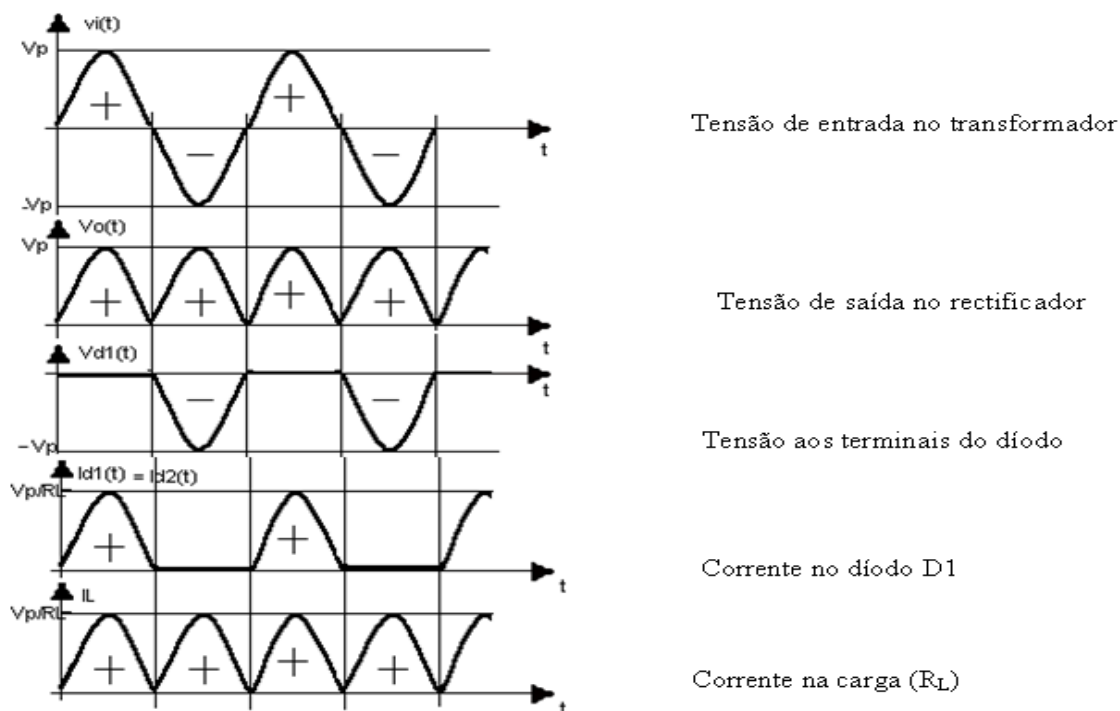


Figura 3.7 – Formas de onda [9].

Uma vez que o rectificador em ponte produz uma tensão de onda completa na saída, as expressões para o valor médio e frequência de saída no rectificador são:

$$U_d = \frac{2U_p}{\pi} \quad (23)$$

$$f_{out} = 2f_{in} \quad (24)$$

Uma vantagem do rectificador em ponte reside no facto de se utilizar totalmente a tensão secundária do transformador, como entrada do rectificador. Como este em ponte tem dois díodos na via em condução, a tensão de pico da saída é dada pela equação (25).

$$U_{p,out} = U_{p,in} - 1,4 \text{ V} \quad (25)$$

3.2.2. Filtragem

3.2.2.1. Filtro com condensador

O circuito de filtro mais popular é o que utiliza um simples condensador (geralmente electrolítico de grande capacidade) em paralelo com a carga, como o representado na Figura 3.8. Um condensador é ligado à saída do rectificador, e uma tensão DC é obtida nos terminais do condensador.

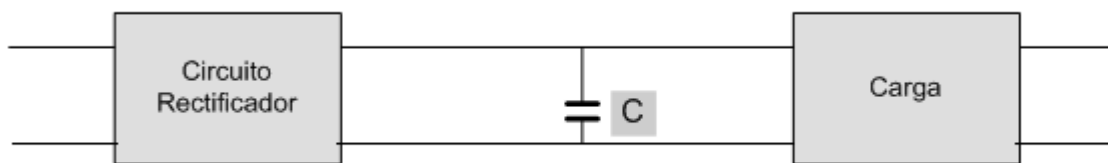


Figura 3.8 - Filtro com um único condensador.

A Figura 3.9 mostra a forma de onda aos terminais de um rectificador com condensador. Na mesma é visível o tempo durante o qual os díodos rectificadores de onda completa conduzem, carregando o condensador até a tensão de pico do rectificador. O tempo T2 é o intervalo de tempo durante o qual a tensão de pico do rectificador está a baixo da tensão de pico, e o condensador

descarrega através da carga. O ciclo de carga–descarga ocorre a cada meio ciclo, isto para um rectificador de onda completa.

A tensão filtrada, como mostra a figura, representa uma forma de onda na saída com um nível dc, V_{dc} e uma tensão de “ripple”, V_r , resultado da carga e descarga do condensador.

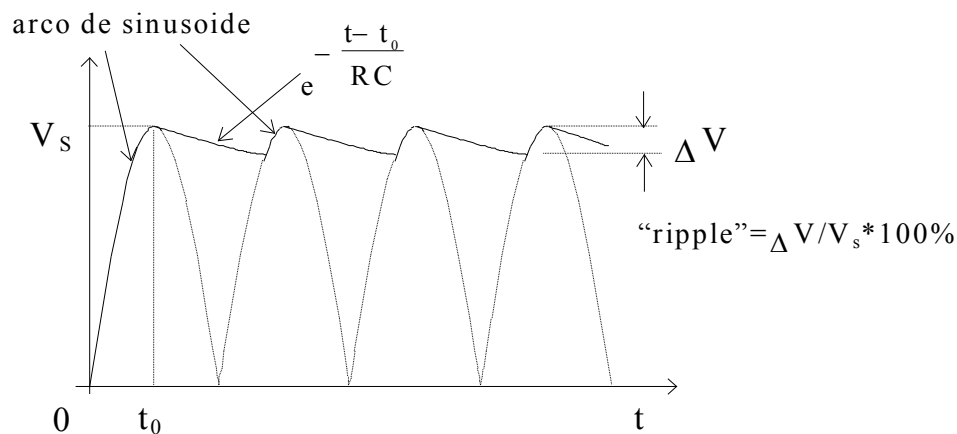


Figura 3.9 - Forma da tensão e saída de um rectificador de onda completa com condensador [10].

A saída filtrada apresenta um nível DC e alguma variação AC “ripple”. Quanto menor for a variação AC comparada ao nível DC, melhor é a filtragem.

3.2.3. Dimensionamento da Fonte de alimentação

A fonte de alimentação DC é um dos sub-sistemas electrónicos necessários para o bom funcionamento do circuito electrónico do comando do freio de pó, pois este necessita de uma tensão de alimentação DC regulada.

O esquema da Figura 3.10 ilustra o diagrama de blocos de uma fonte de alimentação DC implementada.

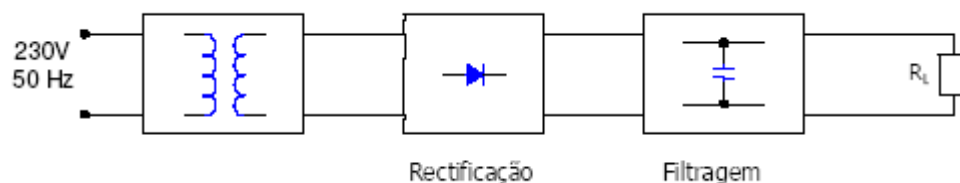


Figura 3.10 - Diagrama de Blocos de uma Fonte de Alimentação DC.

A fonte de alimentação dimensionada é constituída por um transformador, que reduz a amplitude da tensão alternada, por um rectificador e por um filtro.

- **Transformador** – O principal interesse da transformação é permitir transformar a tensão da rede eléctrica 230 V numa tensão mais baixa de 15V. Para tal foi utilizado o transformador redutor da Figura 3.11.



Figura 3.11 - Transformador redutor - AC/AC, 230V/15V.

Este é responsável pela alimentação do freio tendo que se garantir que a tensão aos terminais do secundário em vazio é inferior a 15 V. A relação de transformação é dada pela equação (26).

$$r_t = \frac{U_1}{U_2} \quad (26)$$

$$r_t = 11,5$$

Também da equação (22), sabemos que o mesmo tem de suportar 130 mA no secundário. Assim o transformador usado foi um HQ power de 230/15 V, 1000 mA 15 VA.

- **Rectificação** - Os diodos rectificadores podem ser ligados de vários modos por forma a converter AC para CC. Neste caso é usado um rectificador de onda completa uma vez que este aproveita os dois semi-ciclos da tensão alternada disponível. Usa-se ainda uma ponte rectificadora com 4 díodos, uma vez que o nosso transformador não apresenta derivação central no secundário.

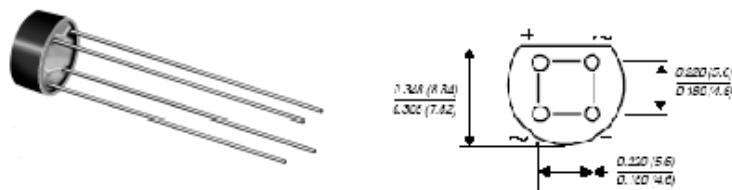


Figura 3.12 - Ponte rectificador usada W005G THRU W04G [17].

A ponte rectificadora utilizada é constituída por 4 díodos rectificadores reunidos num só invólucro, com 2 terminais marcados "~" para a entrada AC e 2 terminais marcados com "+" e "-" para a saída polarizada CC, tal como representado na Figura 3.13. A ponte rectifica os dois semi-ciclos da tensão alternada. Tal como se pode verificar da equação (25) a tensão de entrada na ponte, perde 1,4 V, porque cada díodo determina uma queda de tensão de 0,7 V e há sempre 2 díodos em condução em cada semi-ciclo. Para a escolha da ponte a utilizar foi tido em conta o valor máximo de corrente e a máxima tensão inversa que pode suportar. Como os díodos devem suportar os picos de tensão, a ponte deve suportar, pelo menos, três vezes o valor da tensão RMS da saída do transformador.

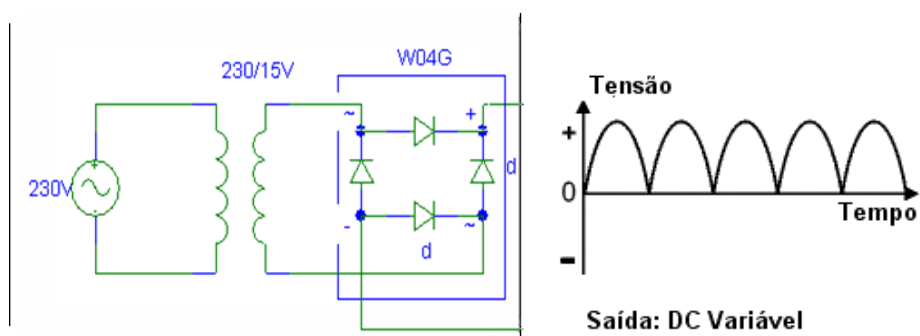


Figura 3.13 - Circuito rectificador implementado e forma de onda a saída da ponte.

A Filtragem é obtida através do uso de um condensador electrolítico ligado à saída da ponte rectificadora DC. Este serve de alimentação do rectificador quando a tensão DC varia. O diagrama b) da Figura 3.14 mostra a tensão não filtrada (tracejado) e a DC já filtrada (continua). O condensador descarrega rapidamente perto do pico da variável DC.

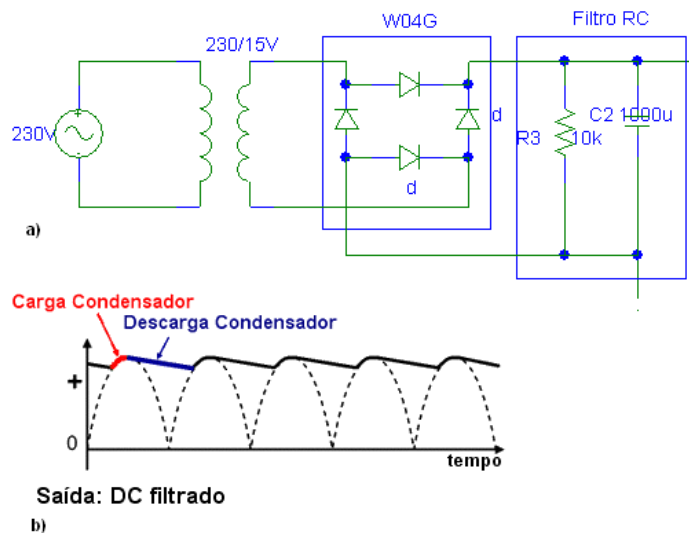


Figura 3.14 – Rectificador de Onda, com aplicação de um filtro RC.

A tensão contínua produzida contém um tremor (ripple), que o filtro não consegue eliminar completamente.

Os enrolamentos do freio constituem um circuito indutivo. Assim, quando há uma comutação da alimentação são necessários circuitos alternativos, capazes de dissipar a energia magnética armazenada nos enrolamentos, sob pena de ocorrerem sobreensões com consequente destruição do circuito de alimentação. Foi então adicionado ao circuito um diodo de 'roda livre' que permite a supressão da corrente do freio após a comutação da alimentação, a energia dissipa-se essencialmente, na resistência interna do freio.

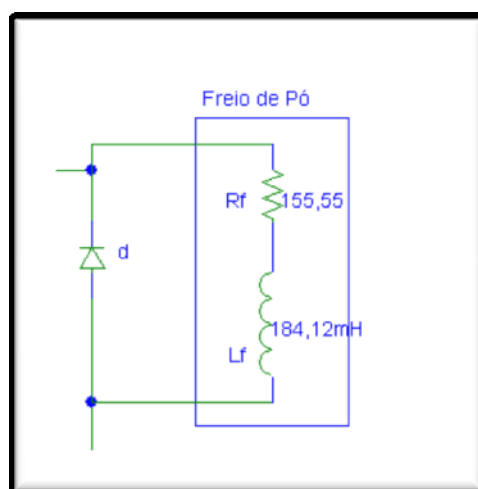


Figura 3.15 - Circuito de supressão de corrente do freio utilizado.

3.3. Gerador de Ondas Triangulares

Com a cascata de um oscilador de relaxação e um integrador obtém-se um circuito que na sua saída produz uma onda triangular. A utilização deste tipo de dispositivos é vulgar e fundamental em qualquer instrumento de medida de acontecimentos periódicos e em todos os instrumentos que inicializem medidas ou processos. Dado isto, de um modo geral para a materialização da solução dimensionada, é necessário utilizar um gerador de onda triangular [11].

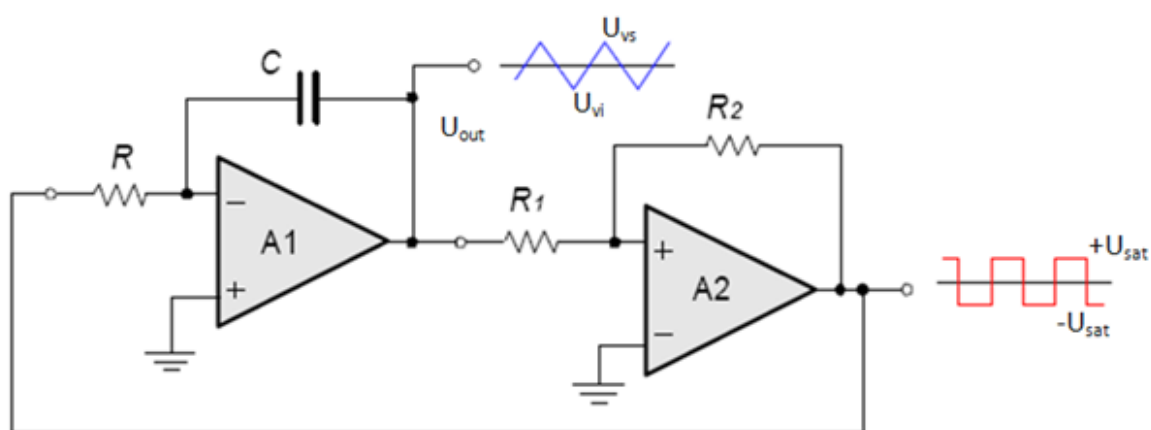


Figura 3.16 – Esquema electrónico do gerador de ondas triangulares [11].

Através da utilização da cascata de um oscilador (A2) e um integrador (A1), obtém-se o circuito o representado na Figura 3.16. A onda triangular a saída do oscilador de relaxação excita o integrador, o qual origina uma forma de onda rectangular na saída [11]. A onda rectangular tem uma excursão entre $+U_{sat}$ e $-U_{sat}$. O seu período calcula-se com a equação (28)

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (27)$$

$$T = 2RC \ln \frac{1+B}{1-B} \quad (28)$$

A onda triangular possui o mesmo período e igual frequência. O valor pico-a-pico determina-se pela equação (29).

$$U_{pp,out} = \frac{T}{2RC} \cdot U_{+sat} \quad (29)$$

3.3.1. PWM (Pulse Wave Modulation)

O sinal a gerar pelo inversor comutado é um sinal analógico sendo por isso necessário fazer a sua modulação. A estratégia escolhida foi uma solução simples de comparação dos sinais a gerar com uma onda triangular de frequência superior, conhecida por modulação natural, como se pode ver na Figura 3.17. Os instantes das comutações são determinados pelos pontos de intersecção da onda triangular com a onda de controlo. Se a amplitude da onda de controlo ultrapassar a da onda triangular, o sistema entra em sobremodulação aumentando o conteúdo harmónico da tensão de saída e perdendo a linearidade da relação de amplitudes entre o sinal de controlo e o sinal gerado pelo inversor.

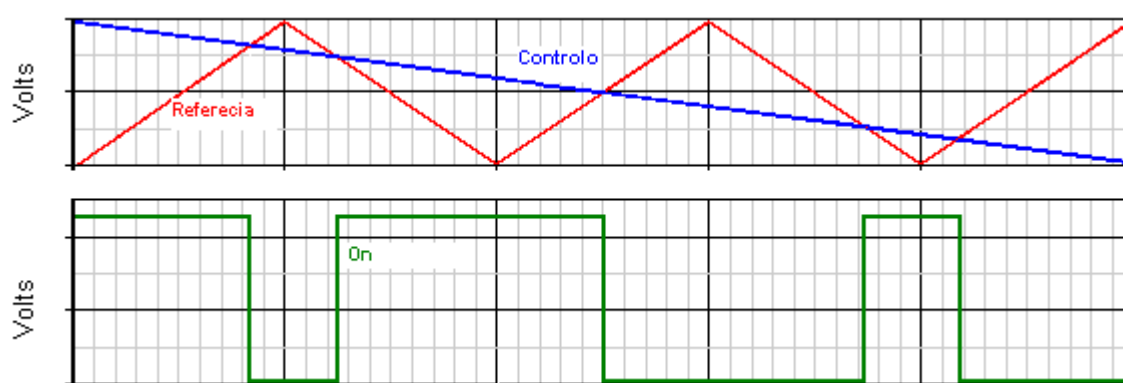


Figura 3.17 – Resultado da aplicação de um PWM.

3.3.2. Conversores CC/CC – Reguladores CC

Um conversor DC-DC, vulgarmente conhecido como chopper, é um circuito que permite controlar o valor médio da tensão contínua aplicada a uma carga, a partir de uma fonte de tensão contínua constante. A técnica utilizada consiste em colocar alternadamente um interruptor estático em condução e em bloqueio de modo a que se tenha na carga a tensão de alimentação ou uma tensão nula. Deste modo o valor médio da tensão na carga valerá:

$$V_0 = V \cdot \frac{t_{on}}{T} = V \cdot \delta \quad (30)$$

Assim, modulando a largura do impulso de duração, t_{on} , e mantendo o período constante, pode variar-se o valor médio da tensão aplicada à carga. Um circuito possível para implementar um regulador CC é o seguinte:

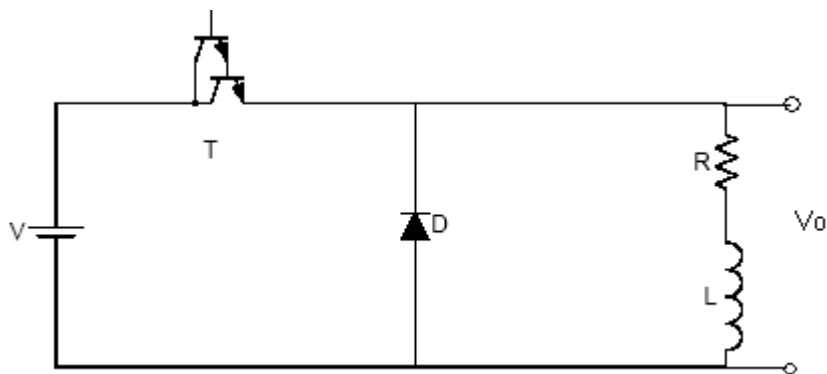


Figura 3.18 - Regulador CC.

Consegue controlar-se a potência transmitida variando o tempo em que o transístor está em condução. Isto é feito através da variação do duty cycle, isto é, da relação entre o tempo em que a ponte está em condução e o tempo em que está em não condução. Na Figura 3.19 seguinte apresenta-se formas de onda exemplificativas da entrada e da saída de um regulador CC.

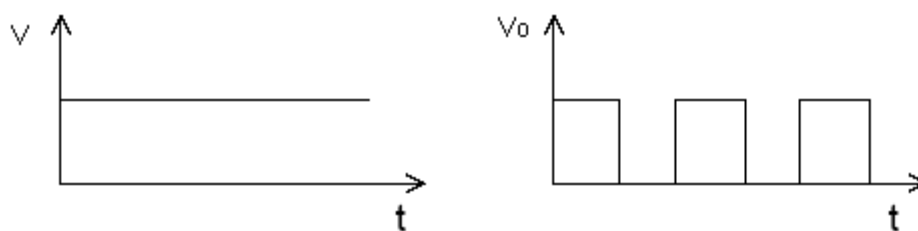


Figura 3.19 - Exemplo de tensão de entrada e de saída do regulador.

Este regulador controla o valor médio da tensão de saída desde um valor igual ao da tensão de entrada (nunca corta) até zero (nuca conduz).

3.3.3. Optocoupler

Nos dias de hoje existem inúmeros equipamentos que utilizam dispositivos ópticos para efectuar troca de informações entre eles, principalmente aqueles que requerem um elevado grau de isolamento entre o transmissor e o receptor. Os acopladores ópticos ou fotoacopladores são utilizados principalmente em aplicações digitais. Um exemplo do uso destes são os circuitos de potência, no presente trabalho este dispositivo foi usado para garantir o isolamento galvânico entre o circuito de alimentação do freio e o circuito PMW vindo do DAC.

O Optocoupler contém um Diodo emissor (*Infra Red Emitter Diode*) e um fotodetector no mesmo bloco. O Emissor irradia a energia e é eficientemente transmitida ao detector através de um meio dieléctrico de isolamento. Este dieléctrico está rodeado de um material opaco, que proporciona protecção contra a luz ambiente. Não existe nenhuma ligação eléctrica entre a entrada e a saída apenas um sinal luminoso, qualquer sinal apenas pode ser transmitido em apenas uma direcção.

A capacidade de isolamento de um fotoacoplador na transmissão eficiente do sinal desejado depende da relação entre a distância do Emissor e do detector, da área de superfície e a sensibilidade do detector e o ganho de amplificação do mesmo. A relação de transferência é afectada por factores não lineares como corrente, tensão e temperatura.

Os acopladores ópticos passivos não requerem nenhuma energia de alimentação externa, além do feixe luminoso. O seu princípio de funcionamento é simples, quando o LED está aceso, o fototransistor responde entrando em condução, com o LED apagado o fototransistor está em corte [12]. Uma vez que é possível alterar a luminosidade do LED, torna-se também possível obter diferentes níveis na saída. É também possível controlar o fototransistor através da sua base, como se fosse um transístor normal. Na Figura 3.20, a seguir vemos o esquema de um optoacoplador:

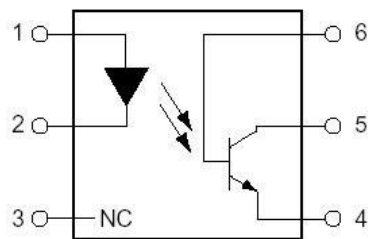


Figura 3.20 – Optoacoplador Óptico [12].

Capítulo 4

4. Instrumentação

Os sistemas de instrumentação permitem realizar medições e transmitir os resultados dessas mesmas medições ao utilizador. Estes sistemas podem ser constituídos por instrumentos físicos, mais tradicionais, ou por instrumentos virtuais, baseados em *software*, podendo ainda existir sistemas híbridos, onde se empregam ambos os tipos de instrumentos.

4.1. Sistema de Instrumentação

O sistema de medição, representado na Figura 4.1, integra uma entrada do valor mensurando, que se pretende medir, e uma saída do valor medido do referido mensurando.

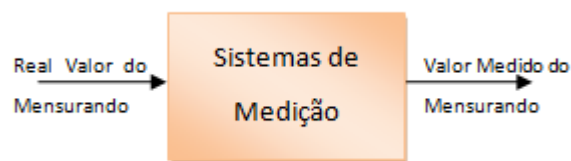


Figura 4.1 – Diagrama de um sistema de medição.

Um sistema de instrumentação para efectuar medições consiste num aglomerado de vários instrumentos, cada qual desempenhando funções específicas, sendo que os três principais elementos funcionais são os elementos sensores, os de processamento de sinal e os de apresentação de dados [13].

4.1.1. Elemento sensor

Um sensor é um mecanismo que responde a estímulos físicos tais como, calor, luz, etc. e produz sinais eléctricos correspondentes, que podem ser medidos e/ou interpretados. Este dispositivo é o elemento do sistema que verdadeiramente contacta com o processo no qual o mensurando está

sob medição, permitindo obter uma saída que depende, de alguma forma, do valor do mensurando. A saída adquirida pode ser usada por um transdutor existente no sistema para atribuir um valor ao mensurando. O termo transdutor é aqui usado para designar um componente que converte uma variação ocorrida num determinado mensurando físico numa alteração equivalente num outro fenómeno físico. Este termo é geralmente utilizado para referir um elemento que converte mudanças num mensurando físico para mudanças equivalentes num sinal eléctrico ou óptico. Nesse sentido, os sensores podem ser também considerados como transdutores.

No sistema implementado foram usados dois sensores:

- **DL 2031M De Lorenzo Group**, para medir a velocidade através de um comutador rotativo entalhado e de um disco óptico com *encoder* para uma possível utilização de um estroboscópio, Figura 4.2.



Figura 4.2 - Transdutor DL 2031M, De Lorenzo Group [14].

- **DL 2006E LOAD CELL De Lorenzo Group**, resistência electrónica da gama de 150N montada no freio de pó para medir o binário, Figura 4.3.



Figura 4.3 - Sensor de Carga DL 2006E, De Lorenzo Group [14].

4.1.2. Processamento de sinal

O elemento de processamento de sinal converte a saída do elemento sensor numa forma representável ou transmissível para outro sistema de controlo. O elemento que transforma a saída do elemento sensor num sinal específico para posterior processamento é chamado condicionador de sinal [15].

Para converter os sinais de saída dos sensores de velocidade e de carga utilizou-se a unidade de medição digital DL 10055D, Figura 4.4.



Características técnicas:

Binário: 9.99 - 50.0 Nm (10 mV por dígito).

Velocidade: 6000 rpm (1 mV/rpm).

Figura 4.4 – Unidade de medição digital DL 10055D, De Lorenzo group [14].

A unidade de medição digital DL 10055D efectua a medição directa do binário de carga aplicado ao motor através de célula de carga. A medição directa da velocidade de rotação é efectuada através de transdutor óptico. Esta unidade permite a conversão das quantidades medidas para níveis de tensão compatíveis com o sistema desenvolvido, o que possibilita a ligação directa à placa de aquisição de dados.

A placa de aquisição de dados utilizada na ligação ao sistema de medição foi a NI USB - 6008 da National Instruments, apresentada na Figura 4.5. Este dispositivo proporciona uma forma rápida e acessível de adquirir e controlar sinais em tempo real através de computador. A placa foi utilizada na captação de todas as entradas e na actualização de todas as saídas do dispositivo, de forma simultânea.



Figura 4.5 – Placa de Aquisição de Dados NI USB - 6008, National Instruments [7].

As entradas analógicas da placa de aquisição de dados podem ser configuradas consoante as necessidades do utilizador, podendo-se alternar os vários modos carregando através do software da NI, no *tab control* que contém os indicadores de tensão analógica. Abaixo dos indicadores de entrada analógica estão os controladores de saída analógica. A gama de valores que pode ser aplicada as saídas analógicas varia entre 0V e 5V.

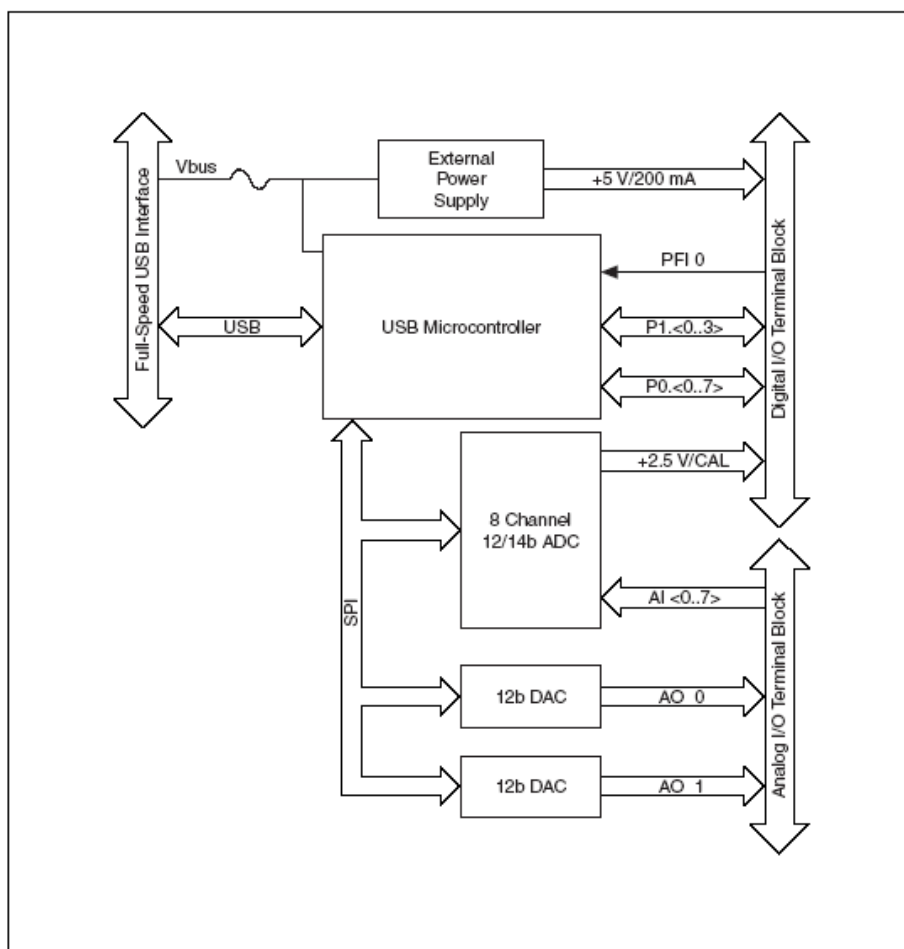


Figura 4.6 - Constituição interna da placa de aquisição de dados NI USB - 6008, National Instruments [7].

Genericamente, os sensores geram sinais analógicos em resposta aos fenómenos físicos que ocorrem de forma analógica (contínuos no tempo). O processamento dos sinais é realizado no domínio analógico através das portas analógicas AO 0 e AO 1, constantes na Figura 4.6.

4.1.3. Apresentação de dados

A visualização do valor mensurando pode ser realizada directamente num monitor, gravada num determinado suporte ou transmitida a outro sistema de controlo.

Na Figura 4.7 está representado um diagrama que retrata o funcionamento de um sistema de medição formado pelos diversos elementos anteriormente referidos.



Figura 4.7 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de medição.

4.2. Instrumentação Virtual

Instrumentação virtual é um conjunto de software e hardware modular definido pelo usuário que permite a implementação de sistemas personalizados com componentes para aquisição, processamento/análises e apresentação de dados [16]. De forma a monitorizar e visualizar resultados da mesma forma que os instrumentos tradicionais mas totalmente controlados por *software*, pode-se utilizar a Instrumentação Virtual eliminando desta forma algumas das desvantagens dos instrumentos tradicionais como sejam as grandes dimensões dos equipamentos o facto de apresentarem, por norma um painel frontal muito complexo e condensado. Nos instrumentos virtuais, o painel frontal desenvolvido em *software* é geralmente disponibilizado através de um computador, servindo este de interface entre o utilizador e o instrumento [17].

4.2.1. Vantagens

O Labview tem como um dos principais benefícios a abordagem de Projecto Gráfico de Sistemas, ou seja, o uso da mesma tecnologia na fase final de desenvolvimento experimental e na fase de implementação. Num mesmo projecto é usado sempre a mesma plataforma, quer seja durante a pesquisa de projecto ou em fase de aplicação do projecto.

Outra das grandes vantagens é a possibilidade de integração de vários sistemas de forma fácil e rápida, em comparação com a instrumentação tradicional, possibilitando assim a interligação com os variados instrumentos presentes no Laboratório. A maioria destes instrumentos tem alguma forma de ligação e comunicação, quer seja através de portas de comunicação serial, paralela, Ethernet ou USB, podendo ainda utilizar as saídas digitais ou analógicas presentes em alguns dos instrumentos, possibilitando assim comunicação e ligação com a Instrumentação virtual.

Ao contrário dos instrumentos tradicionais a instrumentação virtual encontra-se otimizada para uma determinada tarefa, obtendo-se um melhor desempenho do sistema global. A maior velocidade de medição apresentada pelo sistema virtual prende-se com o facto deste tipo de sistemas poder utilizar técnicas e algoritmos de medição mais específicos e otimizados do que os sistemas tradicionais. A mudança entre instrumentos virtuais é também mais rápida do que entre instrumentos físicos, uma vez que geralmente todos se encontram na mesma interface (geralmente ecrã de computador), facto que também está relacionado com a integração de medição.

4.3. LabView

A primeira versão comercial do LabVIEW lançada pela National Instruments, data de Outubro de 1986 e foi desenvolvida por Jack MacCrisken, Jeff Kodosky e Jim Truchard [7]. O ambiente de desenvolvimento utilizado para a construção da aplicação alvo de estudo nesta tese foi o LabVIEW 8.0, fazendo uso de uma linguagem de programação gráfica linguagem 'G' e não uma linguagem baseada em texto. Os programas gráficos desenvolvidos em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais (VIs), que são baseados no conceito de programação de fluxo de dados.

Um programa desenvolvido em LabVIEW, é designado instrumento virtual porque a sua aparência e modo de operação se assemelham aos instrumentos reais. Os VIs são análogos às funções das linguagens tradicionais. Sendo o LabVIEW e a placa de aquisição ambos desenvolvidos pela National Instruments, o acesso ao *hardware* é facilitado através de módulos e de *drivers* fornecidos com o pacote de *software*. O LabVIEW dispõe de todo o tipo de componentes gráficos que permitem a construção de uma interface adequada para uma aplicação de instrumentação como a que se apresenta nesta dissertação.

De forma a obter um sistema que de modo automático, totalmente controlado por computador, traçasse a característica Binário - Velocidade foi desenvolvido um software em LabVIEW que permite ao utilizador controlar o valor de carga aplicado ao freio, ler os sensores e ainda registar estes dados para posterior análise. Em seguida, será efectuada uma pequena abordagem a esta linguagem de programação.

4.3.1. Instrumentos Virtuais e ambiente de programação

Cada Instrumento Virtual desenvolvido tem por objectivo o controlo e manipulação das entradas e saídas bem como a representação de dados provenientes do utilizador ou de outras fontes, como por exemplo placas de aquisição de dados. Um VI criado em ambiente LabVIEW é constituído pelos seguintes componentes:

- O painel frontal (“fronte panel”), interface para o utilizador;
- O diagrama de blocos (“block diagram”), código fonte gráfico que define o funcionamento do VI;
- O ligador de ícones, de modo a que esse possa ser utilizado em outro VI;

O painel frontal é o interface com o utilizador que permite introduzir e/ou fixar valores num sistema e depois verificar os seus efeitos e saídas no diagrama. O painel frontal é muito semelhante ao painel frontal dum aparelho de medida verdadeiro daí as entradas serem chamadas controlos e as saídas serem chamadas indicadores. Os controlos formam as entradas para um VI. Os controlos agrupam-se nas respectivas paletes, consoante o tipo de entrada. Os indicadores são utilizados para representar as saídas de um VI, distribuindo-se pelas diversas paletes segundo a sua função. É possível utilizar uma grande variedade de controles e indicadores, tais como: interruptores, botões, ecrãs gráficos, etc. Tudo isto para permitir a disponibilização de um painel frontal com comandos facilmente identificáveis e compreensíveis. A Figura 4.8 representa um painel frontal de um VI desenvolvido em ambiente LabVIEW.

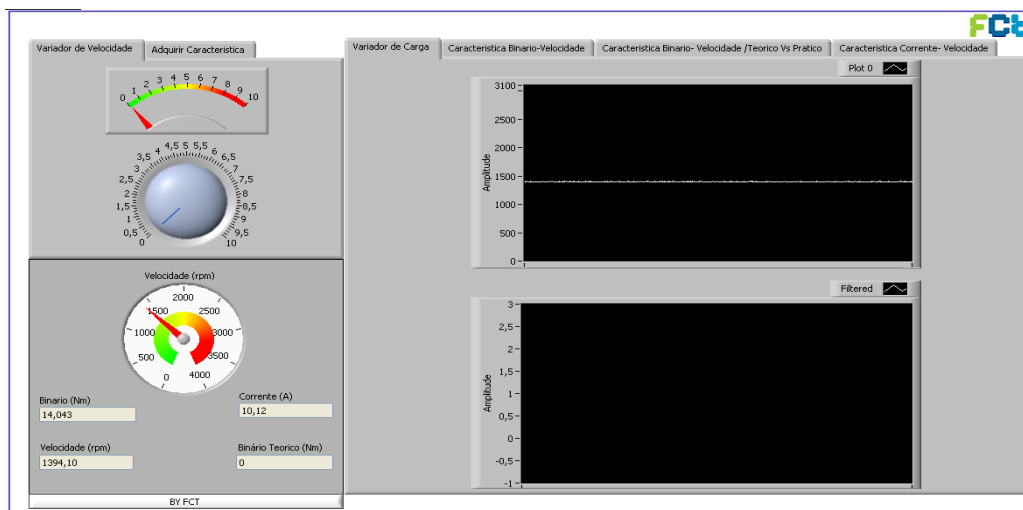


Figura 4.8 - Exemplo de painel frontal de um VI.

Cada painel frontal tem o seu correspondente diagrama de blocos, o qual traduz o programa de VI. O diagrama de blocos é construído usando a linguagem gráfica de programação G. O diagrama de blocos pode ser entendido com um código-fonte. Os componentes do diagrama de blocos constituem nós do programa, por exemplo estruturas de algoritmia como “Loops” e “Cases”, ou ainda funções aritméticas. Os componentes, ou estruturas são ligados através de traços que podem representar fios condutores, ou simplesmente fluxo de dados. A Figura 4.9 representa um diagrama de blocos de um VI desenvolvido em ambiente LabVIEW.

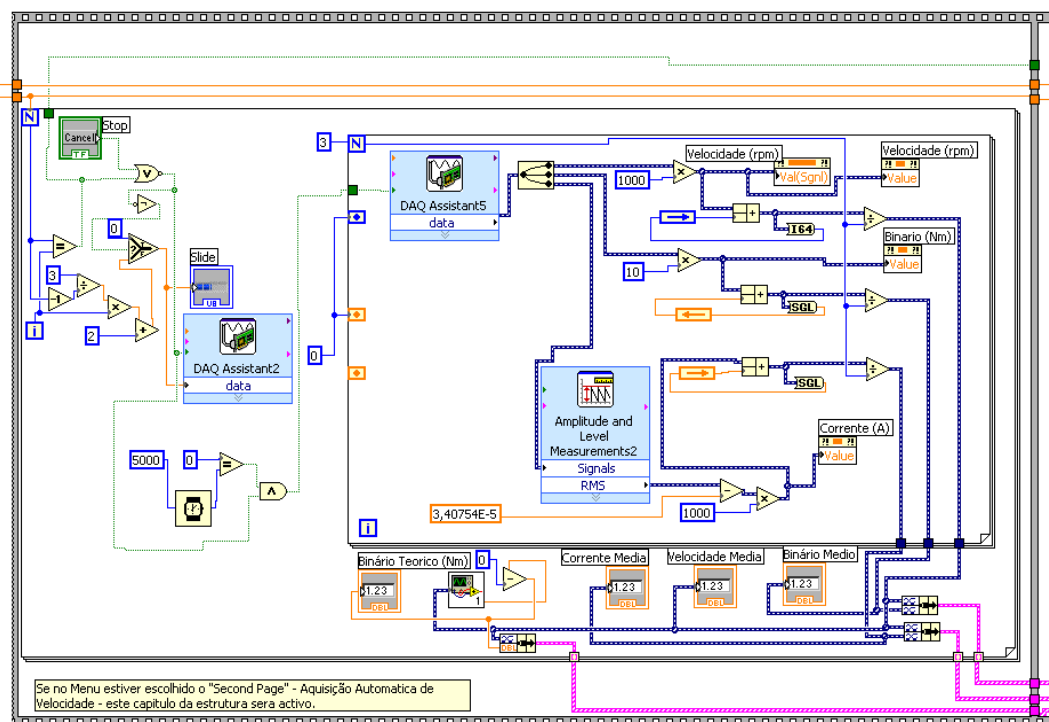


Figura 4.9 - Exemplo de um diagrama de blocos de um VI.

Um VI que se localize dentro do diagrama de blocos de outro VI, denomina-se por sub-VI. Utiliza-se o ligador de ícones para transformar um VI num objecto doutro VI (sub-VI), que é possível utilizar como sendo uma sub-rotina num diagrama de blocos de outro VI. O ícone assim inserido gráficamente representa o VI ao qual foi atribuído no diagrama de blocos do VI principal. Os terminais do ícone indicam onde se devem ligar as entradas e saídas do ícone. Os VIs do LabVIEW são modulares, o que significa que qualquer VI ou sub-VI podem ser executados por si só.

4.4. Sistema de controlo implementado – VirtualLab

Após a apresentação dos sensores e do conceito de instrumentação virtual, onde foram evidenciadas as diversas vantagens do uso de sistemas de medição baseados em instrumentação virtual, é de todo o interesse, o estudo da viabilidade e o desenvolvimento de um sistema de medição baseado em instrumentação virtual para controlo e monitorização dos motores de Indução Trifásicos.

Neste subcapítulo apresenta-se, então, o desenvolvimento do sistema de monitorização e caracterização do motor de indução trifásico acoplado a um freio de pó controlado automaticamente por intermédio de instrumentação virtual.

4.4.1. Esquema desenvolvido

Com o intuito de tornar o sistema mais compacto e eficiente foi desenvolvido um sistema de leitura, totalmente realizado em electrónica digital, e utilizada instrumentação virtual em substituição dos instrumentos físicos geralmente utilizados. Todo o controlo do sistema é efectuado digitalmente por *software* desenvolvido em LabVIEW. O esquema do sistema desenvolvido encontra-se na Figura 4.10.

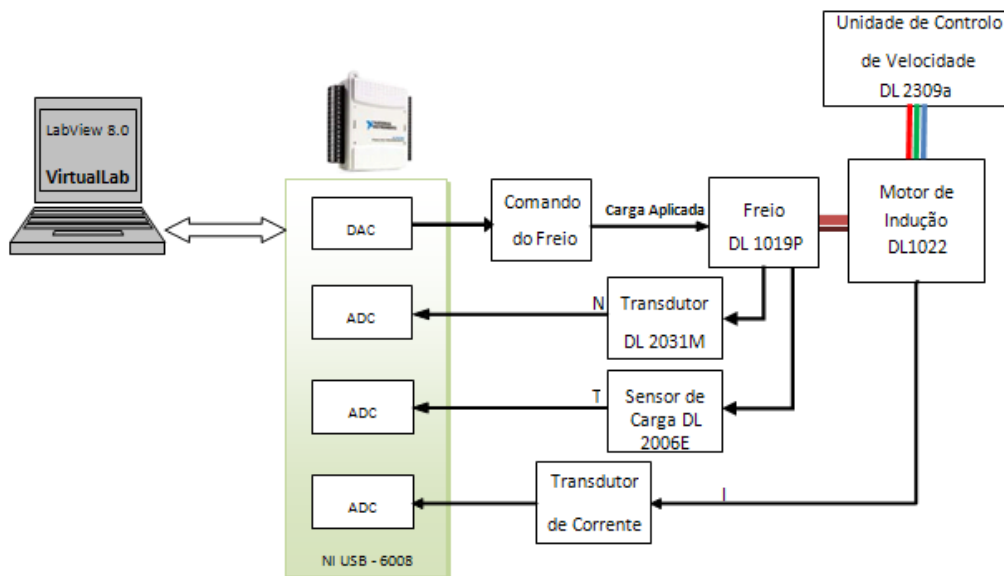


Figura 4.10 – Diagrama do sistema desenvolvido de aquisição automática da característica do MIT.

A comunicação entre o computador e o sistema de controlo do binário é conseguida através de uma placa de aquisição de dados, NI USB – 6008 da National Instruments. Esta placa de aquisição de dados permite a aquisição do sinal de saída dos sensores de velocidade e binário do freio de pó (para posterior processamento através de LabVIEW) e a geração de um gráfico com a característica velocidade/binário do motor de indução trifásico.

No esquema da Figura 4.10 é possível observar dois sensores de referência: um para aquisição do binário e o outro para aquisição da velocidade. A aplicação desenvolvida em LabVIEW permite controlar, através da ligação ao comando de freio, a carga aplicada ao MIT. A programação foi feita de um modo gráfico, em que as VIs, às quais se deu o nome de VirtualLab, são especificadas por diagramas. O *software* foi desenvolvido pensando na melhor interacção com o utilizador.

4.4.2. Estrutura do programa

O sistema de instrumentação virtual do presente trabalho foi desenvolvido em LabVIEW, que permite programar e configurar muito rapidamente a interface gráfica com o utilizador. Outra característica importante do sistema é a facilidade com que se podem realizar acções de controlo ou simples actuações sobre o *hardware*.

Um dos objectivos do sistema de instrumentação virtual do presente trabalho consiste na monitorização de diversas grandezas associadas às máquinas eléctricas, designadamente o motor de indução trifásico.

O esquema da Figura 4.11 representa a estrutura geral do programa com todos os acessos a outros painéis ou caixas de diálogo. Esta estrutura tem como raiz os dois menus do painel principal: o menu *Variador de Velocidade* e o menu *Adquirir Característica*. No esquema estão contempladas somente as opções principais que levam a aquisição da característica do MIT.

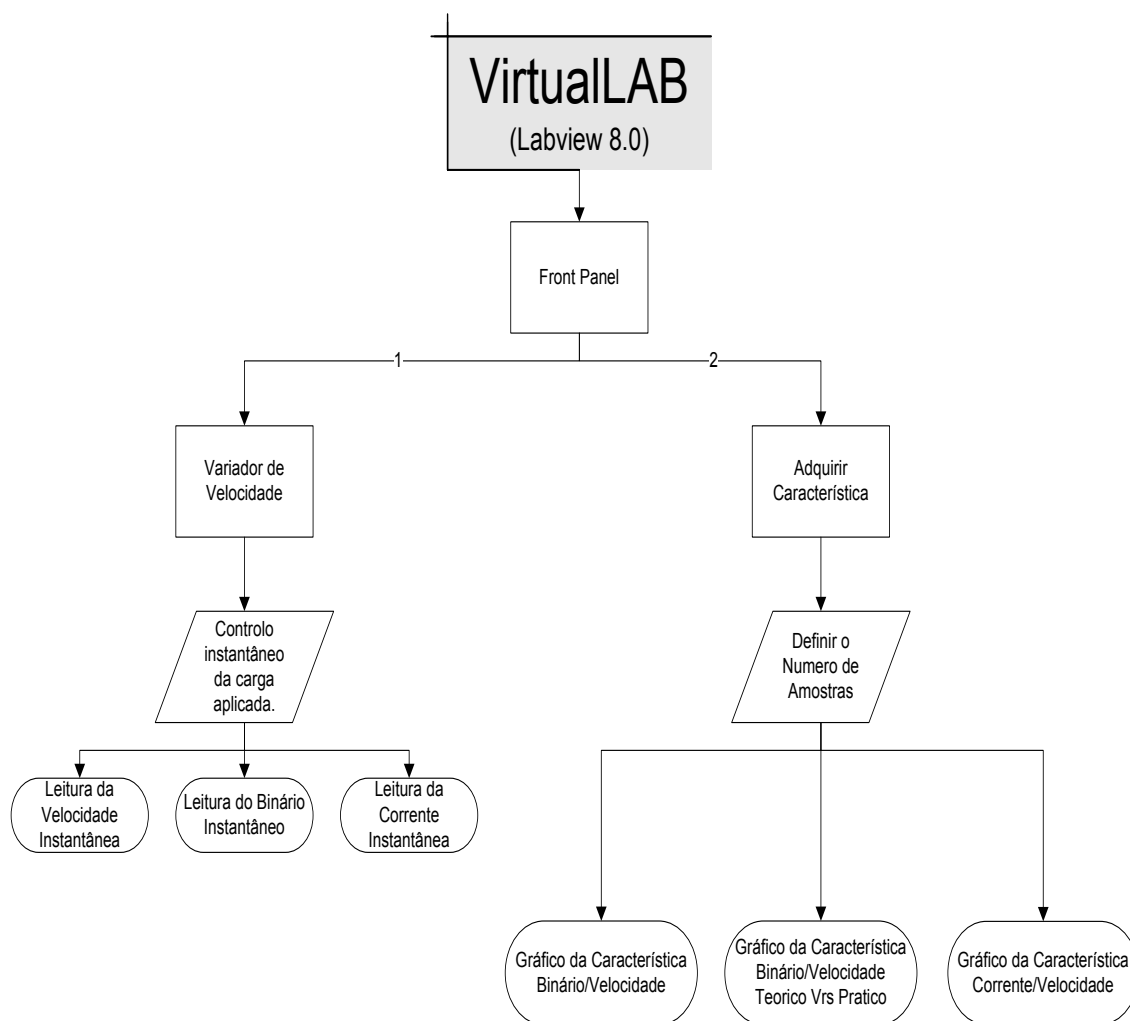


Figura 4.11 - Estrutura geral do *software* desenvolvido em Labview.

4.4.3. Interface com o utilizador e VI's implementados

A interface com o utilizador consiste em vários níveis de submenus, chamados a partir de outros de nível superior, partindo de um menu principal, representado na Figura 4.12.

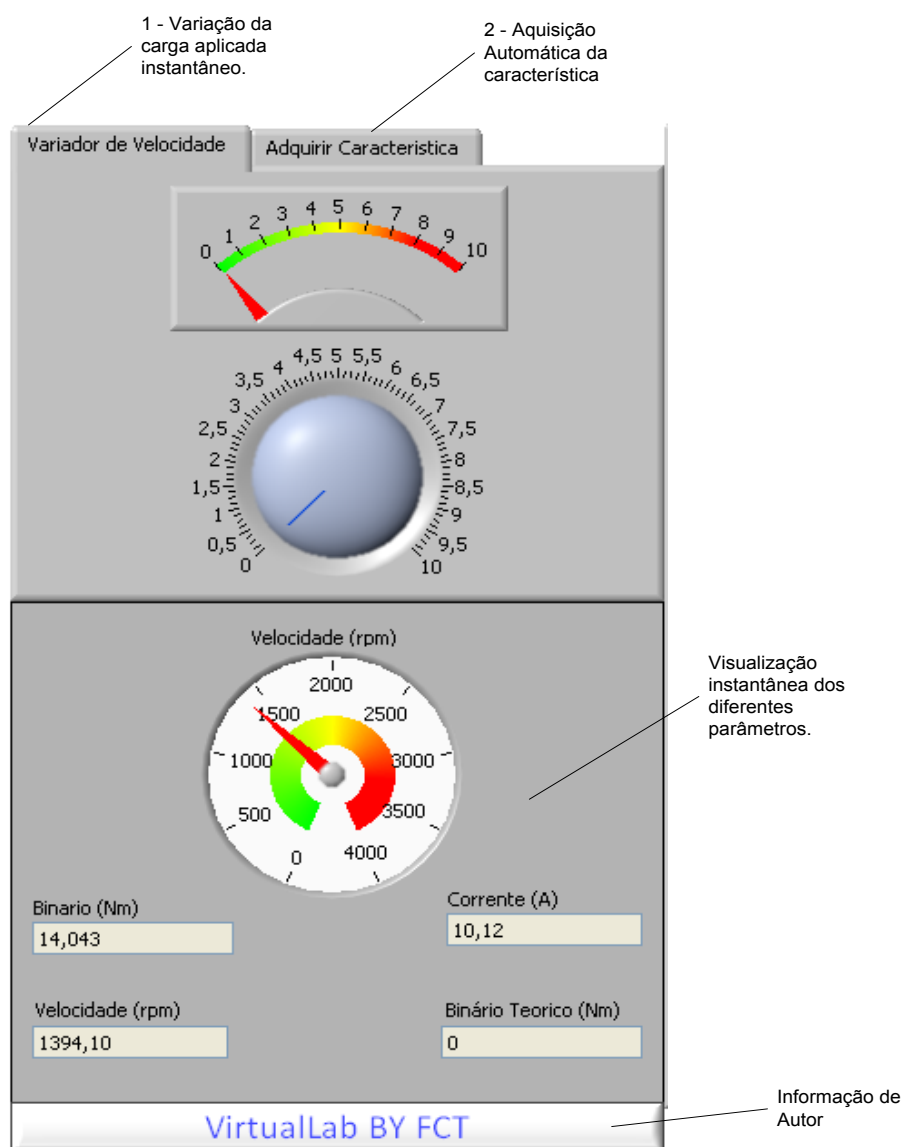


Figura 4.12 - Painel de monitorização principal do VirtualLab.

O utilizador pode alternar entre a Tab 1, *Variador de velocidade*, e a Tab 2, *Aquisição de Característica*. O VI principal do sistema, *tese_caracMIT.vi*, permite ao utilizador adquirir, a partir da interface, as intensidades das correntes que alimentam o motor, o binário e a velocidade de rotação. Para a implementação do menu principal recorreu-se ao uso de uma estrutura do tipo *system tab control* que, dependendo da escolha do utilizador, acciona através do terminal selector da estrutura do tipo *Case*, a acção a tomar.

Na Figura 4.13 verifica-se que o menu principal é constituído por uma estrutura case, que acciona o menu 1 ou 2 dependendo do menu seleccionado, e que segue a lógica representada na Figura 4.11, caso seja *Variador de Velocidade* ou *Adquirir Característica*.

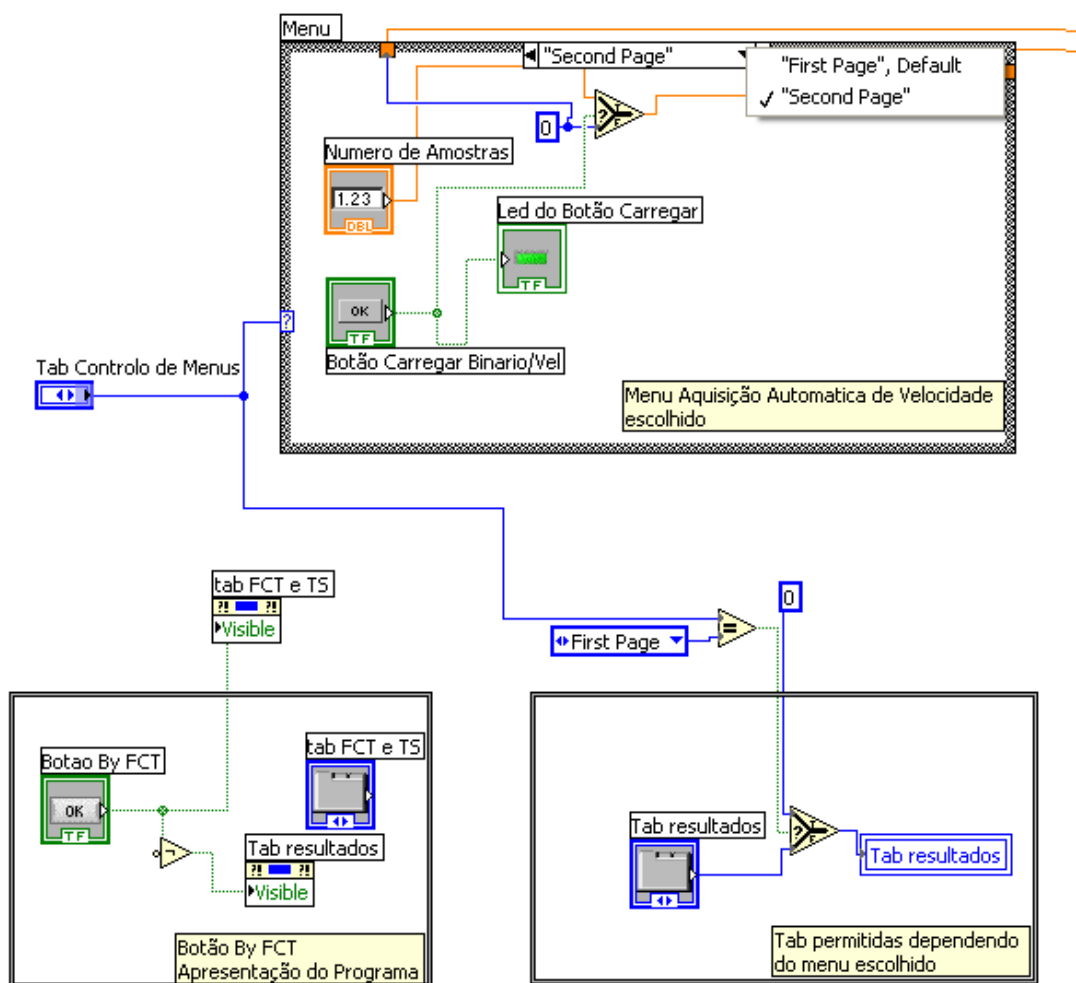


Figura 4.13 – Block diagram do Menu principal do VirtualLab

No menu principal foram criadas algumas protecções a outros menus, ou seja, só é possível alternar entre as tab's, *Característica Binário – Velocidade*, *Característica Binário – Velocidade/ Teorico Vs Pratico* e *Característica Corrente – Velocidade*, apenas no menu *Adquirir Característica*.

É ainda possível junto do botão VirtualLab by FCT verificar todas as informações relativas a execução deste trabalho como se encontra explícito na Figura 4.14



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

VirtualLab

Comando do binário aplicado a um motor e obtenção automática da sua característica Binário-Velocidade

O presente trabalho foi elaborado com âmbito da elaboração de uma tese para aquisição do grau de mestre. Teve como objectivo a implementação desta nova plataforma, criada em LabView para controlar um Sistema de Carga, mais propriamente o Freio de Pó DL 1019P, Accionado por um motor de Indução trifásico. O mesmo é capaz de fazer a aquisição automática da característica Binário - Velocidade e Binário -Corrente.

Tiago Miguel dos Santos Simões

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Mário Ventim Neves
Co-Orientador: Mestre Pedro Miguel Ribeiro Pereira

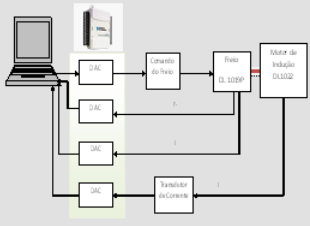


Figura 4.14 – Informação sobre o trabalho executado

4.4.3.1. Menu Variador de Velocidade

O sistema implementado permite o controlo instantâneo da carga aplicada ao freio de pó e consecutivamente a leitura da velocidade e do binário. Na Figura 4.15 encontra-se representado o diagrama de blocos que serviu de base à implementação do *software* em Labview, presente no Anexo A.1.1 – Block Diagram.

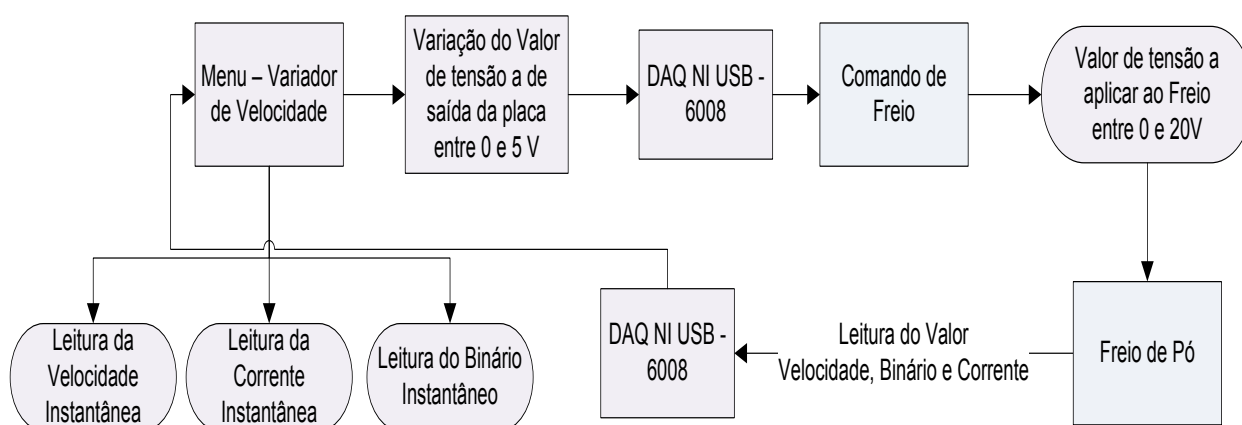


Figura 4.15 – Diagrama de blocos do *Variador de Velocidade*

O objectivo é dar a entender as funcionalidades do programa, podendo ser realizadas medidas para um cálculo da característica de forma manual. A apresentação gráfica do painel encontra-se na Figura 4.16.

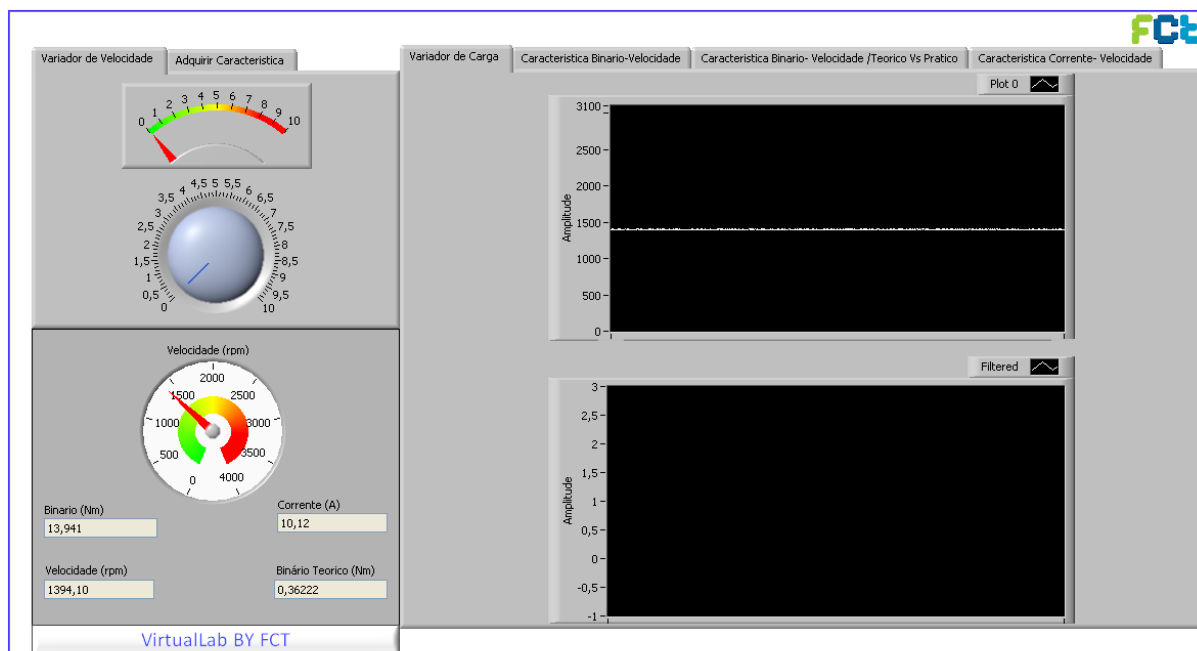


Figura 4.16 – Painel de controlo *Variador de Velocidade*.

Neste painel é apenas possível controlar a carga aplicada através do “*Knob*”. É possível visualizar, simultaneamente, o valor de binário e velocidade ao longo do tempo nos dois gráficos da direita,

4.4.3.2. Menu Adquirir Característica

Uma vez seleccionada a Tab 2 da Figura 4.12, é possível realizar a aquisição automática de todos os sinais físicos anteriormente identificados.

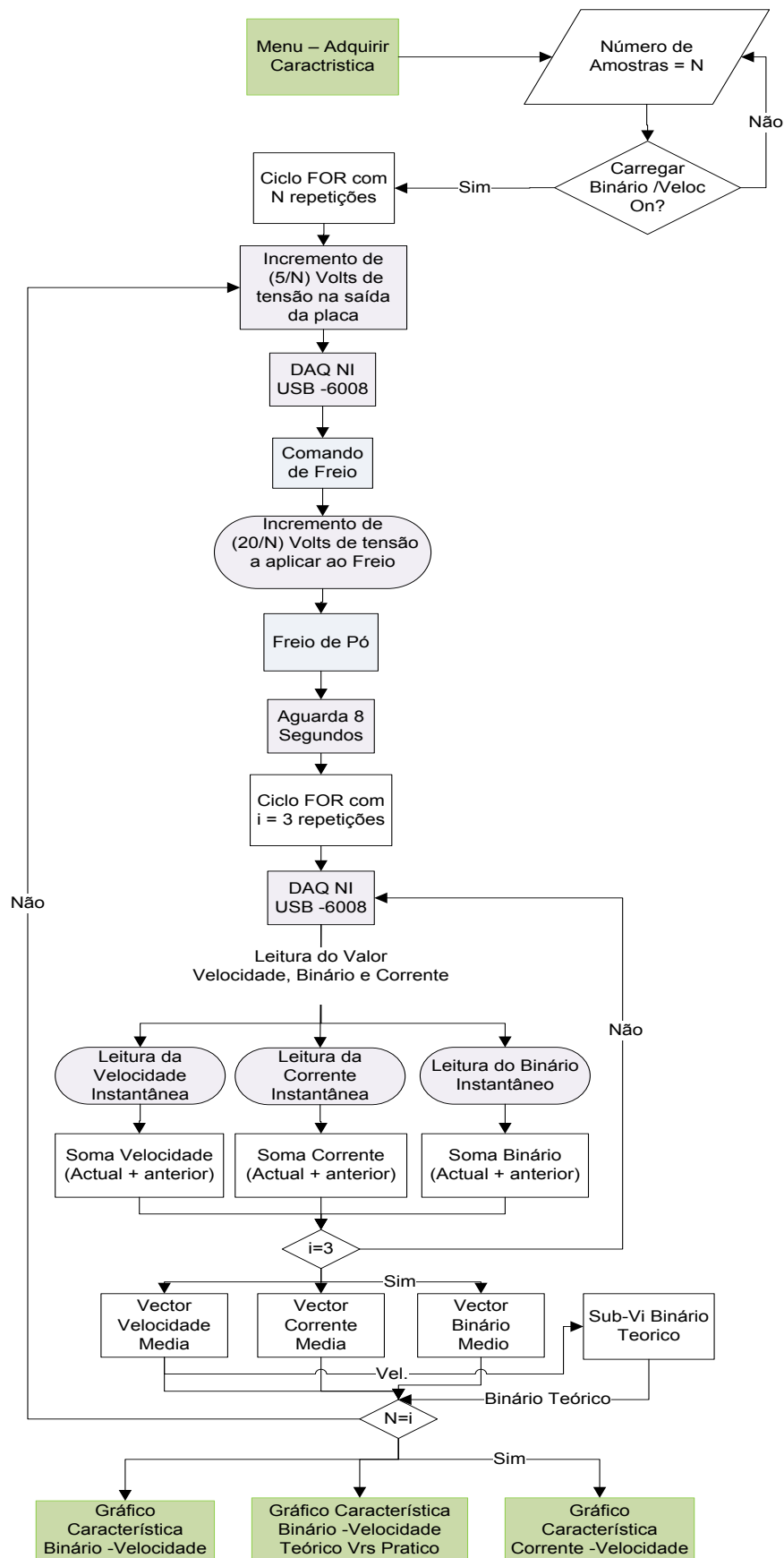


Figura 4.17 – Fluxograma do módulo *Adquirir Característica*.

Para que todo o processo descrito na Figura 4.17 se suceda é somente necessário seleccionar o número de amostras que se quer utilizar e carregar no Botão “Carregar Binário/Velocidade” tal como ilustra a Figura 4.21. Dever-se-á ter em conta que quantas mais amostras forem utilizadas mais real será a aquisição.

A tensão máxima aplicada ao freio e a tensão máxima de saída da placa de aquisição de dados são, respectivamente, 20 V e 5 V. Estas tensões estão directamente relacionadas, uma vez que o máximo de tensão de saída da placa corresponde aproximadamente aos 20 V aplicados ao freio. A lógica implementada e apresentada na Figura 4.18, baseia-se na divisão da tensão máxima, 5 V, pelo número de amostras, incrementando sucessivamente o valor de tensão até ao valor máximo através de um ciclo FOR.

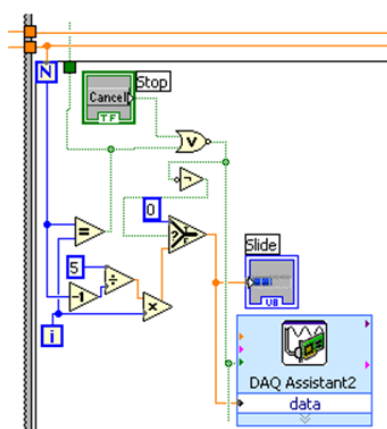


Figura 4.18 – Diagrama de blocos implementado para efectuar a divisão de tensão de saída da placa.

Para alcançar a característica automática implementou-se o diagrama de blocos do Anexo A.2.4. Na Figura 4.19, representa-se parte desse diagrama, sendo possível verificar que, para cada valor de tensão aplicada ao freio, são feitas três leituras ao valor de velocidade, binário e corrente, sendo considerado o valor médio de cada uma dessas grandezas.

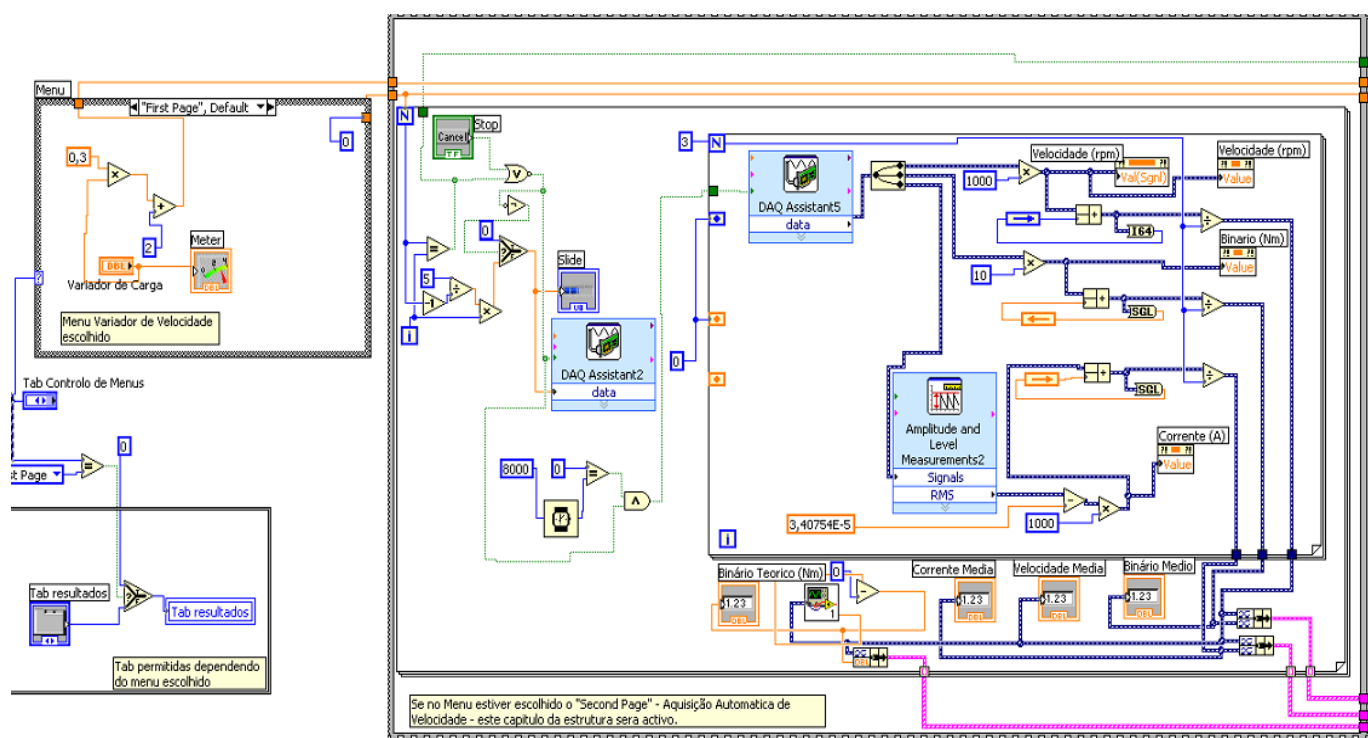


Figura 4.19 – Parte *Block Diagram* do menu *Adquirir Característica*

No sistema em causa, Figura 4.21, pode evidenciar-se um conjunto de importantes funcionalidades, possíveis de executar e cujo menu secundário se mostra abaixo, Figura 4.20.

Destaca-se a possibilidade de execução de um procedimento preestabelecido para a determinação automática da velocidade e binário com base nos procedimentos anteriores, a qual é particularmente importante uma vez que permite assim traçar a característica máquina em estudo. Quando se efectua a aquisição automática da característica da máquina são efectuados 3 gráficos distintos que podem ser visualizados nas três paletes diferentes presentes no menu secundário da Figura 4.21.

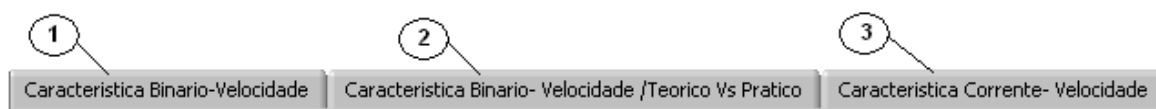


Figura 4.20 – Menu secundário, apenas activo quando seleccionado o Menu *Adquirir Característica*.

1. Menu Característica Binário – Velocidade

Neste painel, Figura 4.21, é possível visualizar e gravar o gráfico da característica binário - velocidade do motor de indução em estudo.

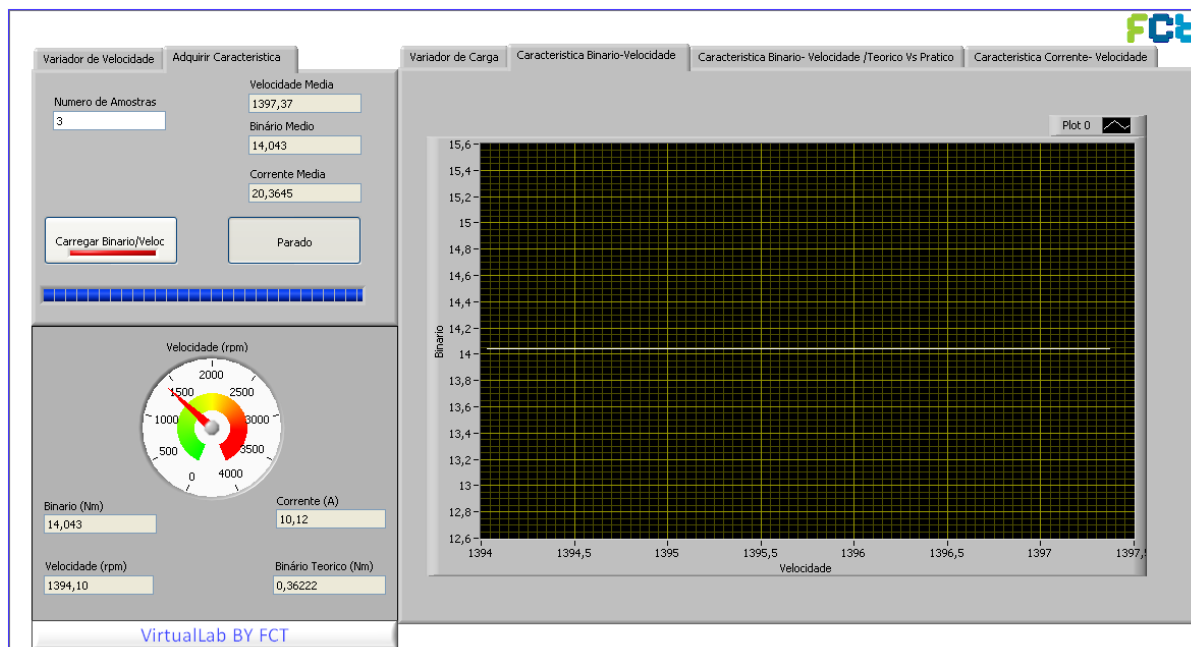


Figura 4.21 - Painel de Controlo do menu *Característica Binário – Velocidade*.

Através do painel de controlo da Figura 4.21, pode gravar-se o gráfico obtido, bastando para tal basta clicar no botão direito do rato e clicar em *Data Operation >> Export Simplified Image* escolher a opção de gravação e clicar em *save*. Esta operação pode ser efectuada para qualquer gráfico existente nos vários menus do programa, obtendo-se um gráfico idêntico ao da Figura 5.14.

2. Menu Característica Binário – Velocidade / Teórico Vrs Pratico

Outra das possibilidades é efectuar uma comparação/validação do gráfico adquirido com o valor teórico baseado nos ensaios clássicos, designadamente, o ensaio em vazio e o ensaio em curto-circuito.

Na paleta “Característica Binário-Velocidade/Teórico Vs Pratico”, Figura 4.20, pode-se obter e gravar o gráfico da característica Binário - Velocidade, teórico e prático. Neste menu podem alterar-se os parâmetros do motor de indução em causa, para tal basta carregar no botão *Alterar parâmetros do Motor*.

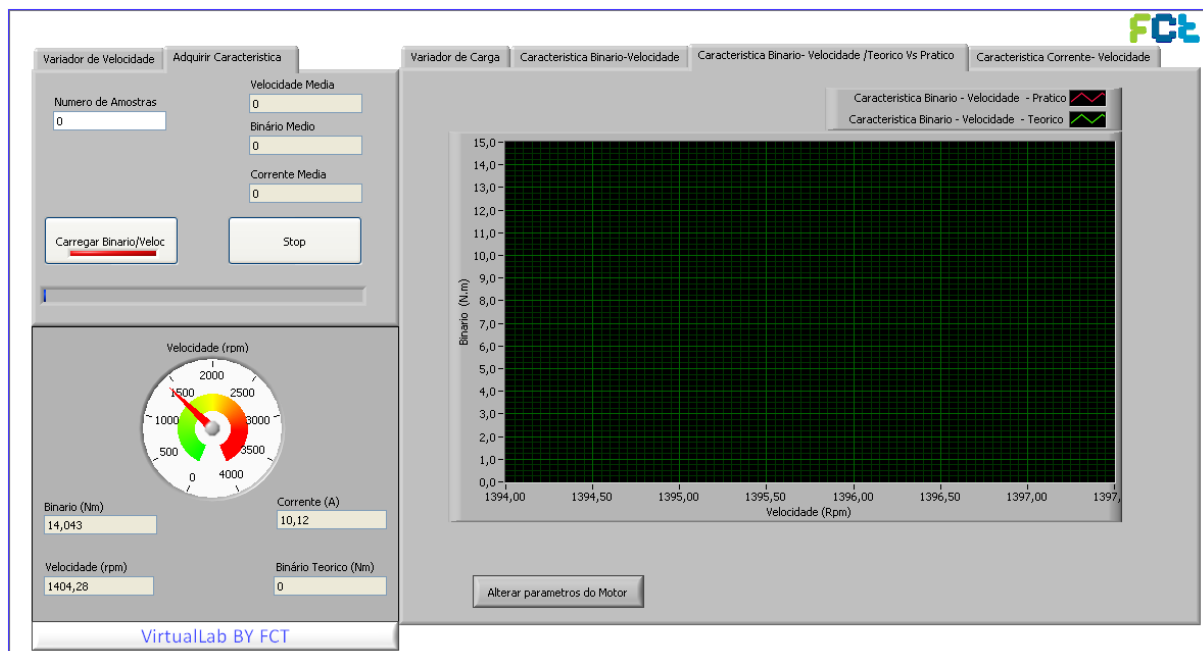


Figura 4.22 - Painel de Controlo do menu *Característica Binário – Velocidade / Teórico Vs Prático*

A partir dos valores retirados no ensaio em vazio e curto-circuito são calculados alguns parâmetros necessários à implementação do método de controlo da máquina assíncrona. O algoritmo desenvolvido tem por base a equação (21). Para o desenvolvimento desta aplicação foi criado e adicionado ao projecto um novo sub VI, *teseteoribinario.vi*.

2.1. Sub VI implementado, Característica da Máquina Assíncrona

A aplicação é iniciada pela introdução dos valores necessários no programa, nomeadamente a resistência do estator, a resistência do rotor e os valores alcançados nos ensaios em vazio e curto-circuito, conforme se pode visualizar através do fluxograma da Figura 4.23.

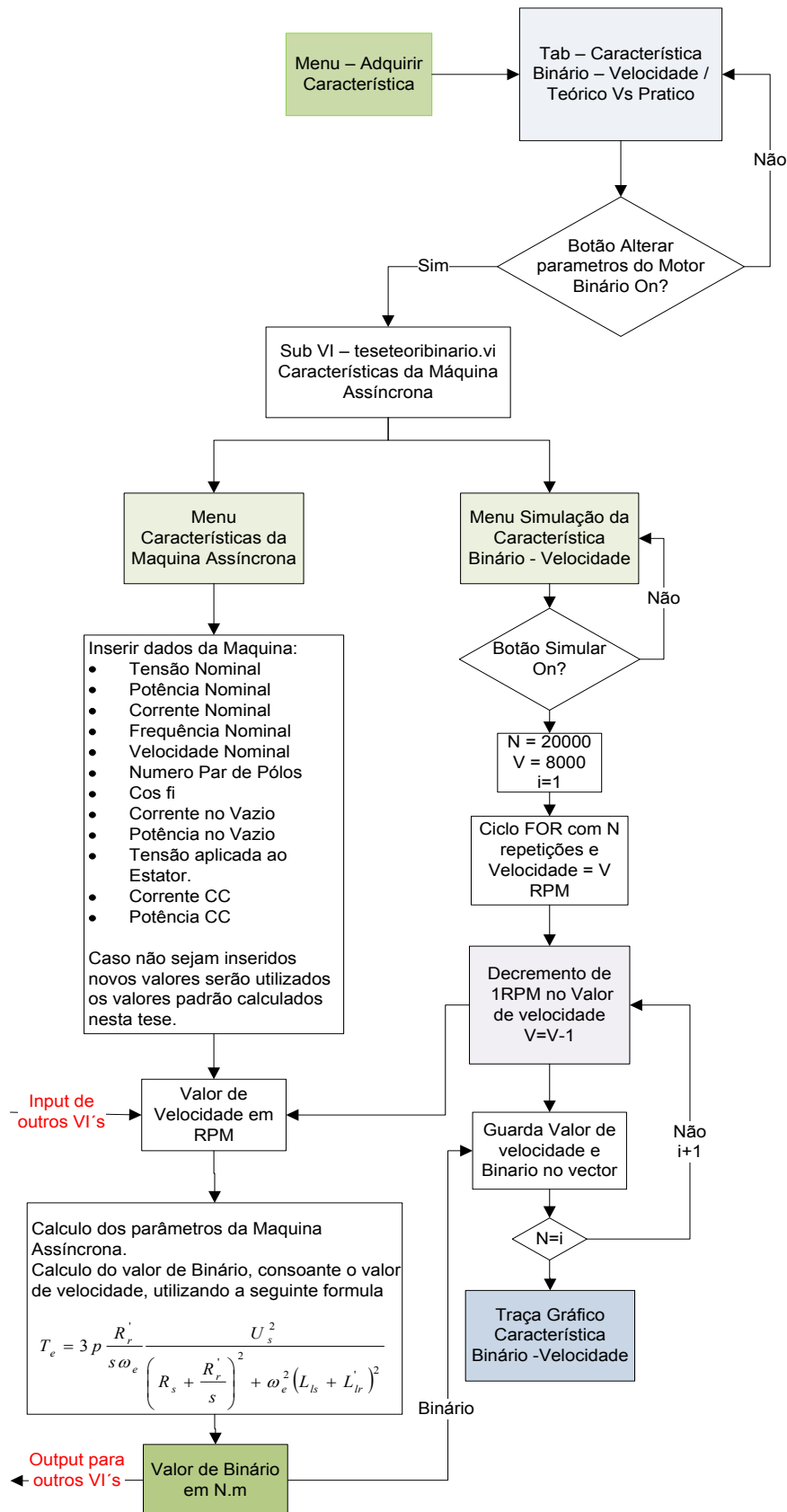


Figura 4.23 – Fluxograma do Sub VI teseteoribinario.vi, para aquisição do valor de Binário teórico.

Através da plataforma implementada, cujo menu é apresentado na Figura 4.24, e com a introdução parâmetros da máquina assíncrona adquiridos directamente dos ensaios em vazio e curto-circuito, o programa calcula directamente o valor das resistências e indutâncias internas do rotor e estator.

Características da Máquina Assíncrona

Unom (V) - Tensão Nominal: 400

Pn (kW) - Potência Nominal: 1,1

Inom (A) - Corrente Nominal: 2,5

cos fi: 0,9

f (Hz) - Frequencia Nominal: 50

Nnom (RPM) - Velocidade Nominal: 2830

p - Numero Par de Pólos: 1

Re (Ohms) - Resistencia do Estator: 4,8

Rr (Ohms) - Resistencia do Rotor: 8,5

Nr (RPM) - Velocidade do Rotor: -11999

T (N) - Binario de Carga: 3,139

Smax - Escorregamento maximo: 0,319

Tmax (N) - Binário máximo: 17,563

Resultados do Ensaio em vazio:

Io (A) - Corrente no Vazio: 1,22

Po (w) - Potência no Vazio: 345

Zo (Ohms) - Impedancia no Vazio: 189,295

Cos (fi): 0,408

weLm (Ohms): 207,354

Lm (H) - Indutância mútua: 0,66

Resultados do Ensaio em curto-circuito:

U (V) - Tensão aplicada ao estator: 50

Icc (A) - Corrente curto-circuito: 2,5

Pcc (w) - Potência de curto-circuito: 148

Zcc (Ohms) - Impedancia em CC: 11,547

Cos (fi): 0,684

Re+Rr' (Ohms): 7,893

we(Lle+Llr') (Ohms): 8,428

Rr' (Ohms) - Resistência do Rotor reduzida ao estator: 3,093

Figura 4.24 – Menu de alteração das características da Máquina Assíncrona.

Caso se pretenda, poderá simular-se a característica teórica de uma determinada máquina assíncrona, independentemente da base deste projecto, uma vez que este menu foi criado num VI independente, sendo utilizado no nosso processo como um sub VI, é possível utilizar-se este módulo individualmente. Na simulação é utilizada uma gama de velocidades entre as 8000 rpm e os -12000 rpm, sendo calculado para cada valor de velocidade o binário correspondente, no é final traçado um gráfico como o da Figura 4.25.

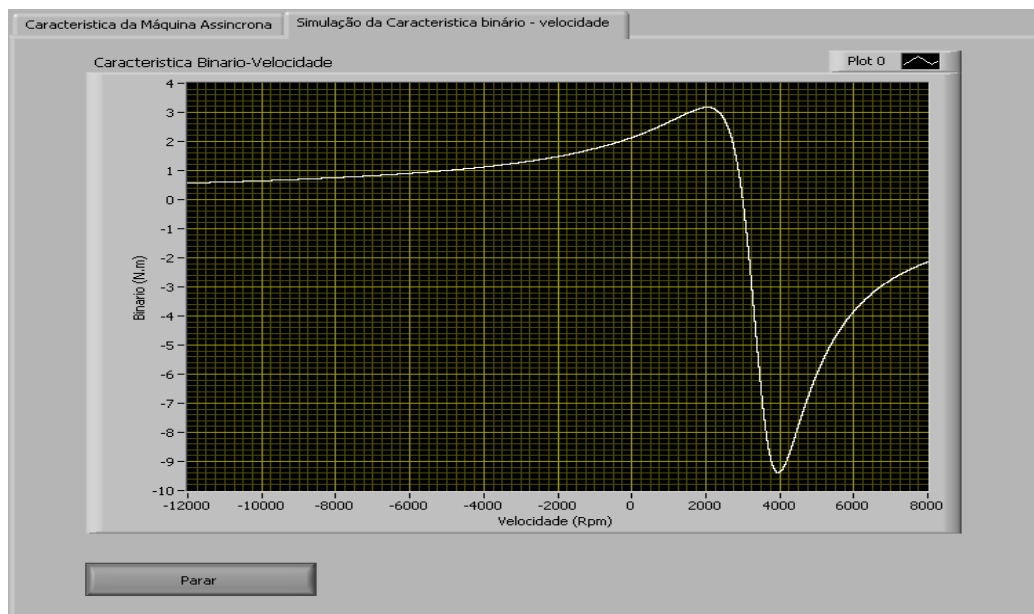


Figura 4.25 – Menu de simulação da característica binário – velocidade teórico.

3. Menu Característica Corrente – Velocidade

Para a configuração original da máquina pode calcular-se a corrente de alimentação em função da velocidade de operação. Para isso foi desenvolvido o interface da Figura 4.26.

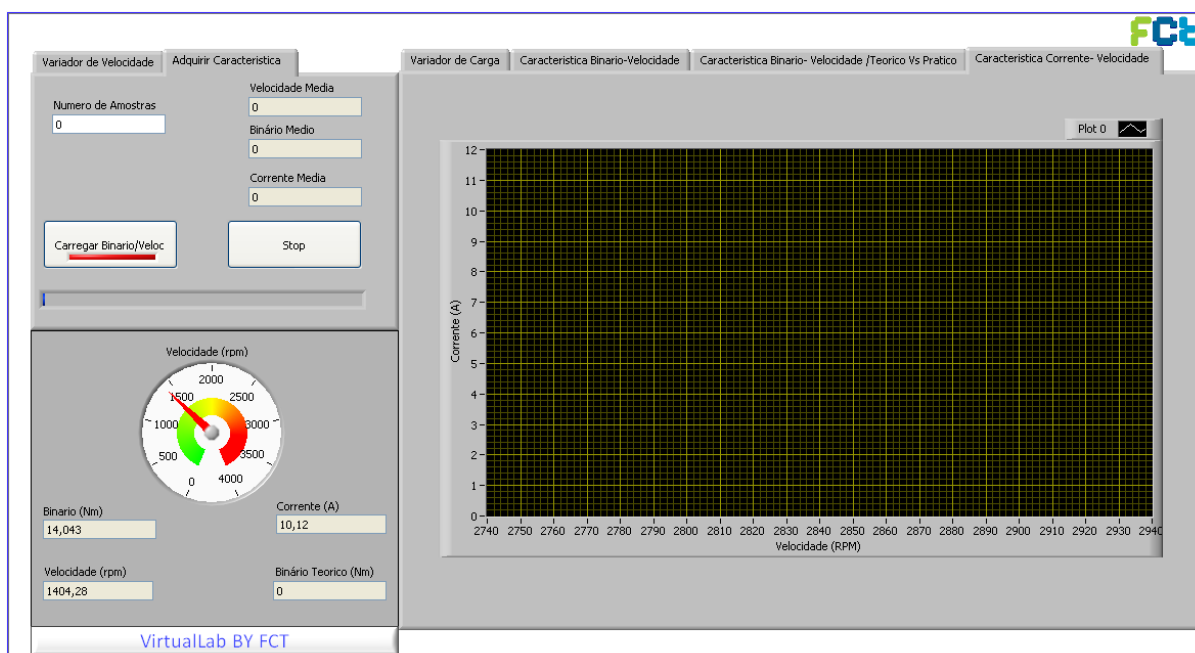


Figura 4.26 – Menu característica corrente – Velocidade.

No gráfico da Figura 4.25 pode-se observar a evolução da corrente consoante a variação da carga aplicada ao motor de indução, sendo assim uma das opções de visualização possível, a aquisição automática da característica corrente – Velocidade.

Capítulo 5

5. Implementação e Resultados

Neste capítulo, serão evidenciados os resultados obtidos pela aplicação prática de todos os componentes atrás descritos.

Na primeira secção, serão abordados elementos relativos à máquina assíncrona com o intuito de determinar alguns parâmetros necessários para validação dos resultados obtidos. Na segunda secção, far-se-á referência aos resultados obtidos pela utilização do dispositivo que permite realizar a comunicação e controlo dos vários equipamentos de estudo, ou seja, uso do comando de freio. Finalmente, são apresentados resultados que evidenciam a aplicação de todo o sistema desenvolvido.

5.1. Parâmetros da Máquina Assíncrona

Tal como foi referido na secção 2, o objectivo deste trabalho é caracterizar algumas das características da máquina assíncrona. Na implementação prática da aquisição da característica binário – velocidade, recorre-se à utilização de um motor assíncrono, DL 1022 De Lorenzo Group, Figura 5.1, com as seguintes características:

- Tensão Nominal de Alimentação (U_{nom}): 400 V;
- Potência Nominal (P_n): 1,1 kW;
- Corrente Nominal (I_{nom}): 2,5 A;
- $\cos(\varphi)$: 0,9;
- Frequência Nominal (f_{nom}): 50 Hz;
- Velocidade Nominal (N_{nom}): 2830 RPM;
- Número de Pares de Pólos (p): 1.



Figura 5.1 – Motor de Indução Trifásico usado.

5.1.1. Ensaio da Máquina Assíncrona

A determinação de características de funcionamento de máquinas eléctricas, em particular de motores de indução trifásicos, pode ser realizada através de ensaios directos em carga ou por via indirecta, através de um modelo da máquina. Neste caso, depois de conhecida a topologia deste modelo, torna-se necessário estabelecer os valores dos parâmetros que o mesmo contém de forma a poder ser utilizado.

Neste caso em particular, como se pretende estudar o funcionamento em regime permanente sinusoidal, de um motor de indução trifásico, é utilizada a topologia descrita na secção 2.2.1. Todos os parâmetros do circuito equivalente simplificado serão calculados através de três ensaios: medida da resistência do estator, ensaio em vazio e ensaio com rotor bloqueado e em curto-circuito. Todos os ensaios realizados na máquina assíncrona e descritos nas próximas secções foram obtidos em conjunto com o colega Samuel Granadeiro em “Controlo de Motor Assíncrono Aplicado a Veículos Eléctricos”.

5.1.1.1. Medida da resistência do estator

Atendendo ao valor habitualmente baixo das resistências a medir e ao facto de a impedância dos enrolamentos possuir uma componente indutiva importante, a medida da resistência entre fases estáticas do motor pode ser realizada através da injeção de corrente contínua, e medição da consequente queda de tensão.

Neste ensaio, são medidos os valores de tensão e corrente obtendo assim o valor da resistência do estator:

- Corrente medida no estator: $I = 4,16 \text{ A}$;

- Tensão medida no estator: $U = 20 \text{ V}$;
- Resistência do estator: $R_e = 4,8 \Omega$

5.1.1.2. Ensaio em vazio

Para a realização do ensaio em vazio coloca-se o motor a funcionar em vazio, com o seu veio livre. A velocidade de rotação do motor aproxima-se da velocidade de sincronismo e a potência activa absorvida é toda ela de perdas, correspondendo às perdas Joule no enrolamento estatórico, às perdas no ferro e às perdas mecânicas, considerando-se nulo o escorregamento s .

Este ensaio permite confirmar a velocidade de sincronismo do motor e determinar dois parâmetros do modelo simplificado do motor uma vez que a impedância medida neste ensaio corresponde praticamente à impedância de magnetização $\bar{Z}_m$, Figura 5.2, sendo possível determinar a indutância mútua L_m .

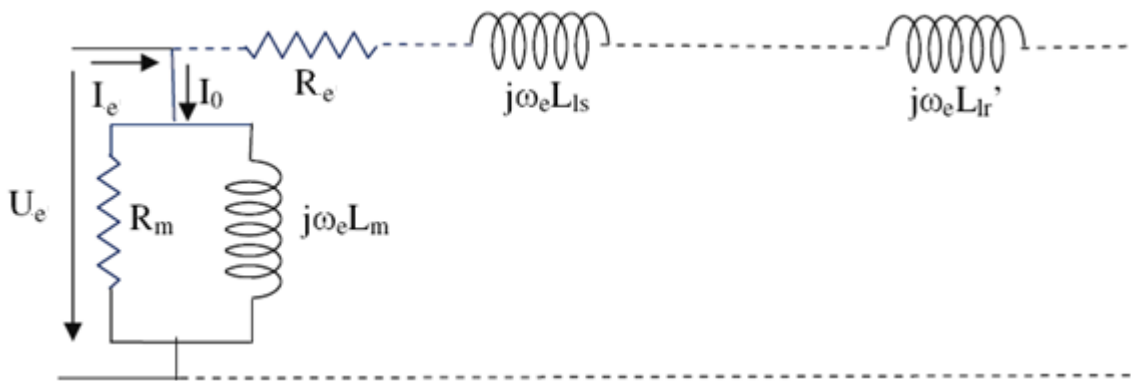


Figura 5.2 – Circuito equivalente por fase da máquina assíncrona para o ensaio em vazio.

O motor é alimentado com tensão e frequência nominais. São registados os valores dessas duas grandezas, da intensidade de corrente e da potência activa absorvidas:

- Tensão composta de alimentação: $U_{nom} = 380 \text{ V}$;
- Corrente medida em vazio: $I_0 = 1,22 \text{ A}$;
- Potência medida em vazio: $P_0 = 345 \text{ W}$;

O circuito equivalente em vazio é dado pelo $n_m \cong n_S$, logo pela equação (1) tendo $s \approx 0 \Rightarrow \frac{R_r'}{s} \approx \infty$

Das expressões (31) a (34) é possível determinar a indutância mútua.

$$U_s = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

$$Z_0 = Z_m = \frac{U_s}{I_0} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}I_0} \quad (32)$$

$$P_{in} = 3U_s I_s \cos \phi \Rightarrow \cos \phi = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{nom} I_0} \quad (33)$$

$$\omega_e L_m = \frac{Z_m}{\sin \phi} \quad (34)$$

Tabela 5.1 - Resultados do ensaio em vazio [6].

U_{nom} (V)	I_0 (A)	P_0 (A)	Z_0 (Ω)	$\cos(\Phi)$	$\omega_e L_m$ (Ω)	L_m (H)
380	1,22	345	179,83	0,43	119,15	0,634

5.1.1.3. Ensaio em curto-circuito

Quanto ao ensaio em curto-circuito, como o seu nome indica, é feito com o rotor bloqueado por meio de um encravamento mecânico adequado e em curto-circuito.

O ensaio é realizado alimentando o estator com uma tensão com valor que leve a que o mesmo absorva a corrente nominal. A frequência será a nominal, como precaução, deverá elevar-se, gradualmente a tensão de alimentação até ao necessário, o estator é alimentado por uma tensão reduzida, de modo a evitar perdas excessivas. Levando a que as nestas condições o escorregamento, s , seja unitário, pelo que $s \approx 1 \Rightarrow R_r' = \frac{1-s}{s} = 0$.

Este ensaio permite que sejam medidos o valor eficaz da tensão de alimentação, a intensidade da corrente absorvida e a potência activa absorvida pelo motor.

- Tensão de alimentação: $U = 50 \text{ V}$;
- Corrente medida em curto-circuito: $I_{cc} = 2,5 \text{ A}$;
- Potência medida em curto-circuito: $P_{cc} = 148 \text{ W}$;

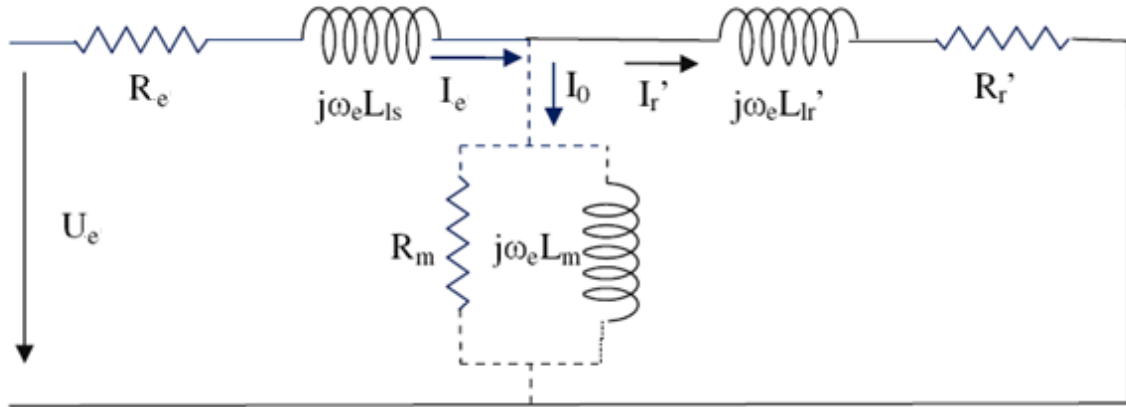


Figura 5.3 - Circuito equivalente por fase da máquina assíncrona, ensaio em curto-circuito.

Utilizando o circuito equivalente por fase da máquina assíncrona, a impedância Z_{cc} medida no ensaio é equivalente à série do ramo longitudinal de entrada, com o paralelo dos outros dois, Figura 5.3. Podendo-se admitir que o ramo de magnetização tem impedância muito superior ao ramo longitudinal parte do rotor, podemos considerar a corrente de magnetização desprezável ou zero face à equivalente do rotor, resultando para a impedância de curto-circuito, equação (35), a série dos dois ramos longitudinais.

$$Z_{cc} = R_s + R_r' + j\omega_e (L_{ls} + L_{lr}') \quad (35)$$

Das equações (36) a (39) determina-se o a indutância de dispersão do estator, assim como a resistência e indutância de dispersão do rotor reduzida ao estator, sendo consideradas iguais as indutâncias de dispersão relativas ao estator e rotor.

$$Z_{cc} = \frac{U_s}{I_{cc}} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3} I_{cc}} \quad (36)$$

$$P_{in} = 3U_s I_e \cos \phi \Rightarrow \cos \phi = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} U_{nom} I_{cc}} \quad (37)$$

$$R_s + R_r' = Z_{cc} \cos \phi \quad (38)$$

$$\omega_e (L_{ls} + L_{lr}') = Z_{cc} \sin \phi \quad (39)$$

De forma a se poder calcular as grandezas referentes ao rotor, é determinada a relação de transformação, sabendo que esta é dada pela equação, (40).

$$N = \frac{U_{estator}}{U_{rotor}} \quad (40)$$

Sendo:

- $U_{estator}$ - Tensão aplicada ao estator
- U_{rotor} - Tensão medida no rotor.

Do manual do motor assíncrono trifásico De Lorenzo DL 1022, verifica-se que a relação de transformação pode ser calculada pela média geométrica da equação, (41). Sendo N_1 e N_2 relações de transformação dos dois ensaios distintos.

$$N = \sqrt{N_1 N_2} \quad (41)$$

O primeiro aplicando uma tensão alternada sinusoidal aos enrolamentos do estator, e realizando a medição da tensão entre os anéis do rotor, encontrando-se a máquina parada. Através da equação (40) e para os valores de tensão composta aplicada ao estator e medida no rotor chega-se assim ao valor da relação de transformação $N_1 = 0,955$.

O segundo ensaio realizado consiste em aplicar uma tensão alternada sinusoidal ao rotor, e medindo o correspondente valor de tensão no estator. Através da equação (40) e para os valores de tensão composta aplicada ao rotor e medida no estator chega-se assim ao valor da relação de transformação $N_2 = 0,927$.

Dos resultados obtidos em cada um dos ensaios anteriores e da equação (41), resulta $N = 0,94$. Fazendo uso da relação de transformação N , e utilizando as expressões (12) e (13) obtêm-se os valores de coeficiente de indução e resistência, correspondentemente, deduzidas no rotor.

Tabela 5.2 - Resultados do ensaio em Curto-circuito [6].

U (V)	I _{cc} (A)	P _{cc} (W)	Z _{cc} (Ω)	cos(Φ)	R _s +R _r ' (Ω)	ω _e (L _{ls} +L _{lr} ') (Ω)	R _s (Ω)	R _s ' (Ω)	L _{ls} (mH)	L _{ls} ' (mH)	R _r (Ω)	L _{lr} (mH)
50	2,5	148	11,55	0,68	7,89	8,43	4,8	3,09	13	13	3,49	15

5.2. Comando de Freio

É possível controlar e registar a velocidade do motor por aplicação de diversos valores de tensão a um dispositivo electronicamente controlado, que por sua vez, impõem uma carga ao motor por meio de um dispositivo de travagem. Centrando-se no objectivo principal deste trabalho, ou seja, aquisição automática da característica Binario-Velocidade, foi projectado e implementado o dispositivo electrónico da Figura 5.4 que é capaz de controlar o freio de pó.



Figura 5.4 - Caixa de Controlo de Freio Implementado.

O objectivo do circuito implementado é o controlo do Binário, independentemente da velocidade de deslizamento, o binário aplicado é proporcional à corrente aplicada.

5.2.1. Circuito Implementado

Em seguida, será apresentado o circuito implementado do sistema proposto baseado na electrónica de potência. Os detalhes de cada elemento necessários para implementação do sistema proposto usando na arquitectura escolhida foram evidenciados no capítulo 3.

dimensionamento do circuito de electrónica a implementar e necessário medir os parâmetros internos do freio, onde tiramos:

$$R_4 = 155,55 \, \Omega$$

$$L_2 = 184,12 \, mH$$

Considerando uma fonte de alimentação com um factor de ripple de 10%, e das equações (42) a (43), chegamos ao valor do condensador do filtro RC.

$$F_r = \frac{\Delta U}{U} = \frac{T}{2\tau} \Rightarrow \tau = 0,1 \quad (42)$$

$$\tau = R_3 C_2 \quad (43)$$

O valor de corrente máxima a suportar pelo Optocouplar, será igual ao máximo da corrente de circulação no circuito RL do freio e que é obtida pela equação, (44).

$$I_c = \frac{U_{\max}}{R_4} = 130 \, mA \quad (44)$$

Optou-se pelo uso de um optoacoplador devido a necessidade de isolamento eléctrico entre os circuitos de entrada e saída, não existindo ligação galvânica entre os dois circuitos, pois a ligação é óptica. Para a sua implementação utilizou-se o circuito integrado SL5500, Figura 5.6.

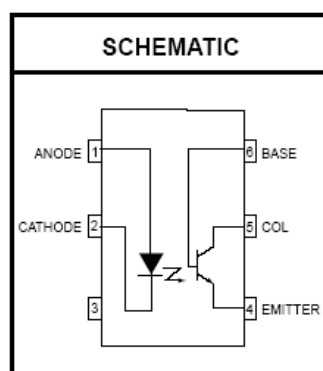


Figura 5.6 - Esquema de Ligação do Acoplador Óptico [18].

O sinal que chega ao acoplador óptico proveniente do PWM, é transmitido por um feixe de luz, mediante um díodo emissor de luz e recebido por um sensor. Uma vez que o Optocoupler usado,

em DC suporta 100 mA de corrente máxima no colector foi adicionado um Amplificador de Darlington, com um ganho de, $h_{FE} = 750$.

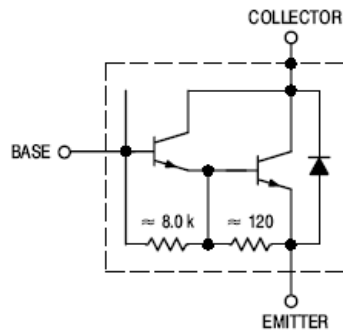


Figura 5.7 – Esquema do circuito de Darlington, BD675 [18].

Da equação (45) e (46) podemos calcular o valor de tensão aos terminais da resistência R9

$$I_c = \beta I_B \Rightarrow I_B = 0,2 \text{ mA} \quad (45)$$

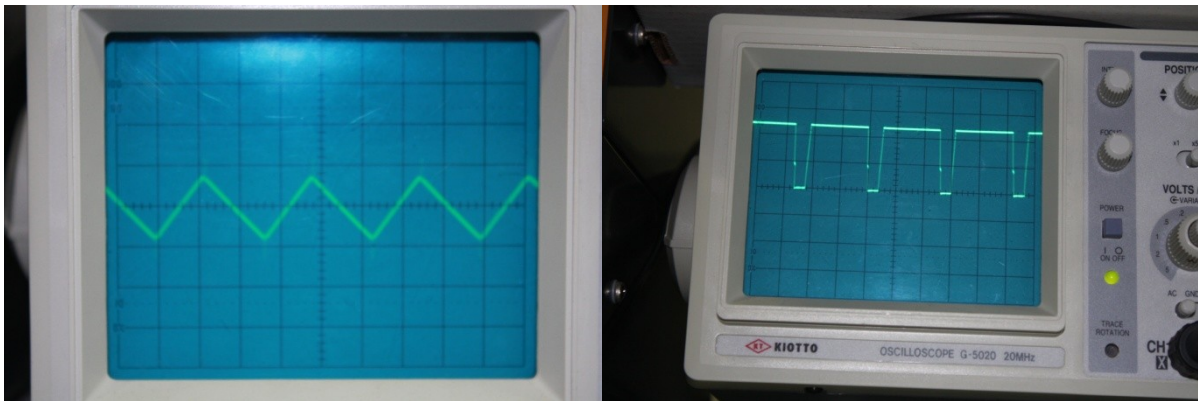
$$U_B = I_B R_{10} \Rightarrow U_B = 1,6 \text{ V} \quad (46)$$

Uma vez que se quer quantificar de forma periódica o valor de carga a aplicada ao freio, é necessário dimensionar um gerador de ondas triangulares tipo da Figura 3.16. A estratégia escolhida foi uma solução simples de comparação dos sinais a gerar com uma onda triangular de frequência superior, conhecida. Para tal foi tida em consideração que a placa de aquisição utilizada limita os valores de tensão de saída a 5V. Foi construído um oscilador, utilizando retroação positiva igual ao da Figura 3.16.

$$U_{TH} = \frac{R_5}{R_{15}} U_{sat} \quad (47)$$

$$f = \frac{R_5}{4 R_{15} R_6 C_3} \quad (48)$$

Das equações (47) e (48) pode-se calcular o valor de frequência da onda triangular gerada.



a)

b)

Figura 5.8 - a) Onda Triangular Gerada; b) Exemplo do Sinal após comparador PWM

Tabela 5.3 – Valores dos componentes a utilizar [6].

$R_4 (\Omega)$	L_2 (mH)	R_3 (k Ω)	R_5 (k Ω)	R_{15} (k Ω)	R_6 (k Ω)	C_3 (nF)	R_8 (k Ω)	R_9 (k Ω)	R_{10} (k Ω)	R_{11} (k Ω)	R_{12} (k Ω)	R_{13} (k Ω)
155.55	184,12	10	15	10	1	100	99	1	8	120	1	1

A Figura 5.9, abaixo fornece uma visualização de toda estrutura física do conjunto (Sistema de Carga). De forma geral observa-se que a placa de aquisição de dados é o dispositivo que comanda o conjunto, através do software implementado em LabView, assim sendo pode-se fazer alterações no sistema de Carga, modificando a tensão aplicada ao freio.



Figura 5.9 – Visão geral do comando do freio implementado.

5.3. Montagem Experimental

A concepção física do sistema de controlo proposto, tem por base a integração de diversos componentes electrónicos analógicos e digitais. A Figura 5.10 apresenta uma visão final da montagem efectuada.

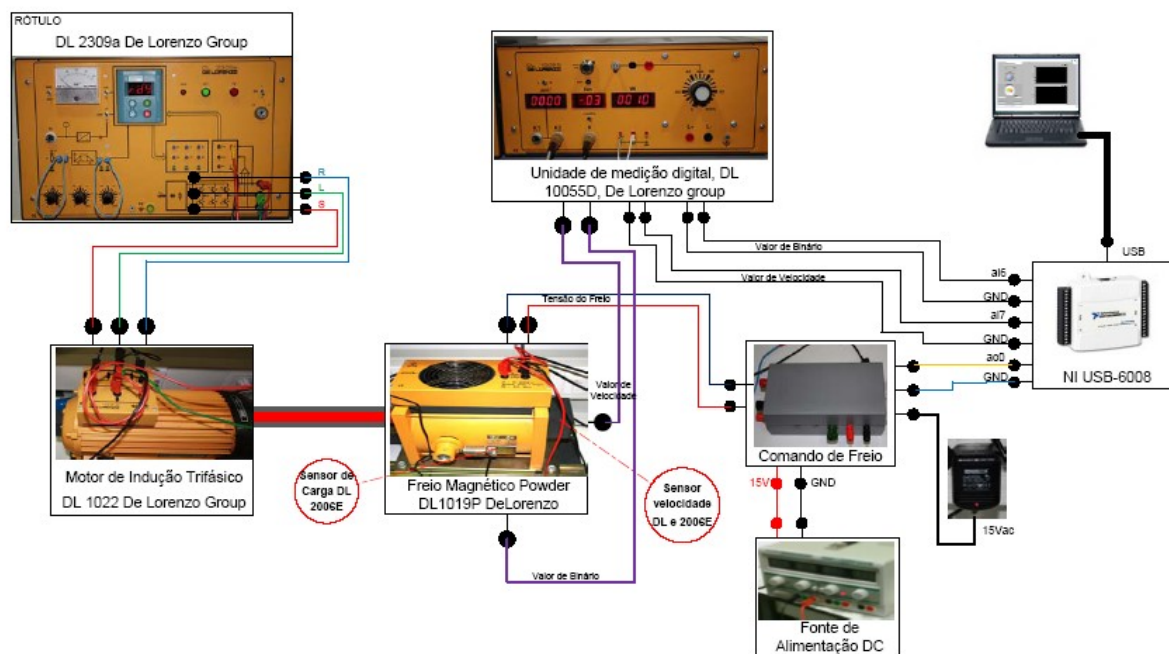


Figura 5.10 – Diagrama de Blocos do sistema Implementado

Relativamente ao esquema desenvolvido, optou-se pela alimentação do motor de indução através da unidade de controlo de velocidade, De Lorenzo DL 2309a1. Este permite o controlo da frequência aplicada ao motor, no presente trabalho foi utilizada uma frequência constante igual a 50 Hz. Acoplado ao Motor temos o freio electromagnético, De Lorenzo DL 1019P, controlado automaticamente através do comando de freio desenvolvido. Este ultimo liga directamente a placa de aquisição de dados NI USB-60, que através de um dos conversor analógico digital, DAC, presentes na sua estrutura controlam em tempo real a carga aplicada ao Freio.

Paralelamente ao processo atrás descrito a cada instante de 0,001 segundos é feita a aquisição de binário e velocidade através dos sensores, DL 2031M e DL 2006E De Lorenzo, presentes no Freio. A conversão dos sinais adquiridos nestes é realizada pela unidade de medição digital De Lorenzo DL 10055D, este aparelho só é utilizado devido a impossibilidade de aquisição de dois conversores novos, junto do fornecedor deste tipo de equipamento.

5.3.1. Material utilizado

Após o dimensionamento de todos os componentes necessários para a implementação prática, descreve-se aqui todo o material utilizado:

- Motor assíncrono trifásico De Lorenzo DL 1022
- Travão electromagnético De Lorenzo DL 1019P
- Unidade de medição digital De Lorenzo DL 10055D
- Transdutor óptico de velocidade De Lorenzo DL 2031M
- Célula de medição de binário De Lorenzo DL 2006E
- Unidade de controlo de velocidade de motores, De Lorenzo DL 2309a
- Placa de aquisição de dados National Instruments NI USB-6008
- Fonte de alimentação regulável DC
- Ponte rectificadora W004G THRU W10G General Semiconductor
- Amplificador Operacional LM324N ST
- Circuito amplificador de Darlington BD675 On Semiconductor
- Fototransistor optocoupler SL5501 Fairchild
- Um diodo de potência
- Dois reóstatos de 10 K Ω
- Três resistências de 10 K Ω
- Três resistências de 1 K Ω
- Uma resistência de 8 K Ω
- Uma resistência de 5 K Ω
- Duas resistências de 120 Ω
- Condensador electrolítico de alumínio 100 nF
- Placa de montagem
- Fios condutores
- Caixa de montagem
- Computador portátil Fujitsu Siemens, com o software Labview 8.0

5.4. Resultados Experimentais

Nesta secção serão apresentados resultados experimentais do modelo implementado. Pode-se visualizar as formas de onda e medições mais importantes. Em baixo, Figura 5.11, pode-se visualizar o esquema da montagem implementado para se efectuar os testes do Motor de Indução.

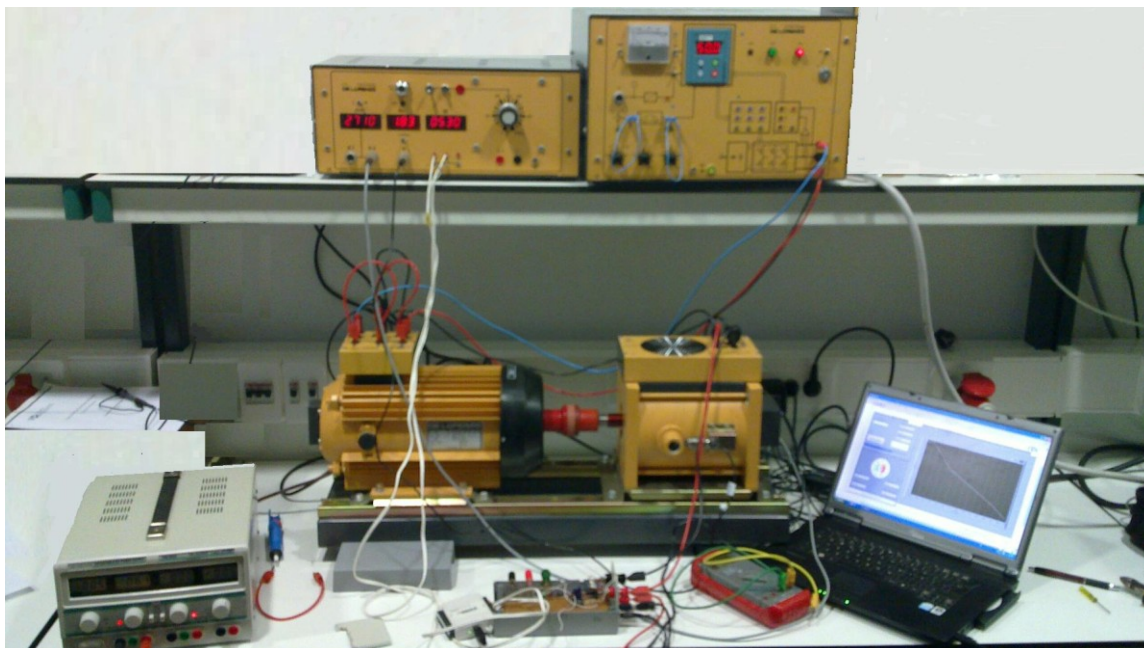


Figura 5.11 – Esquema da Montagem efectuada

Para uma tensão composta de alimentação do Motor 400 V, e uma frequência constante de 50 Hz obtemos os resultados a seguir apresentados.

5.4.1. Resultados do “Variador de Velocidade”

Inicialmente implementou-se uma aplicação em software capaz de adquirir instantaneamente os valores de binário e velocidade consoante a alteração efectuada a tensão aplicada ao freio, conforme descrito na secção 4.4.3, variador de velocidade.

Na Figura 5.12 e Figura 5.13, pode-se verificar a variação do binário e velocidade consoante a variação de tensão aplicada aos terminais do freio, esta variação é alcançada pela variação do Knob da aplicação desenvolvida, e que se pode visualizar no Anexo A1.

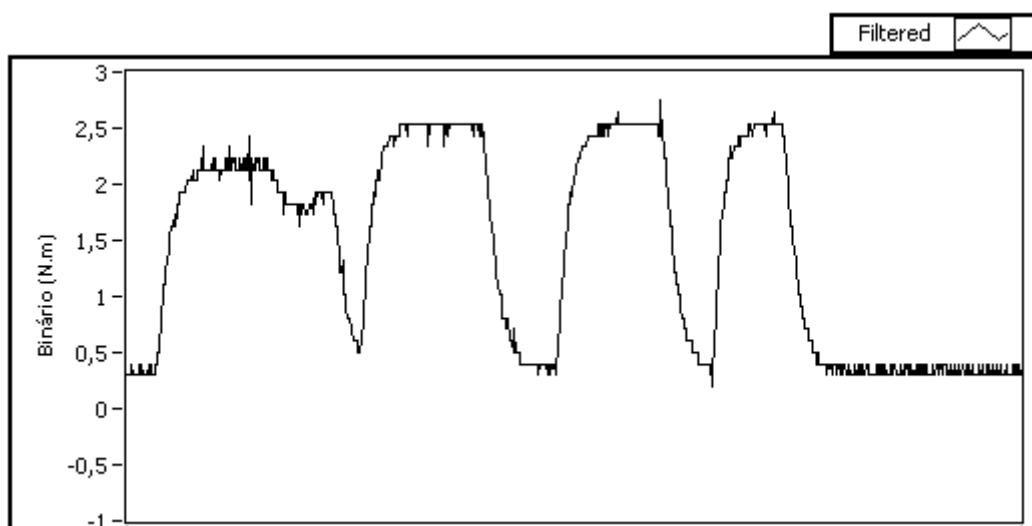


Figura 5.12 – Binário ao longo do tempo

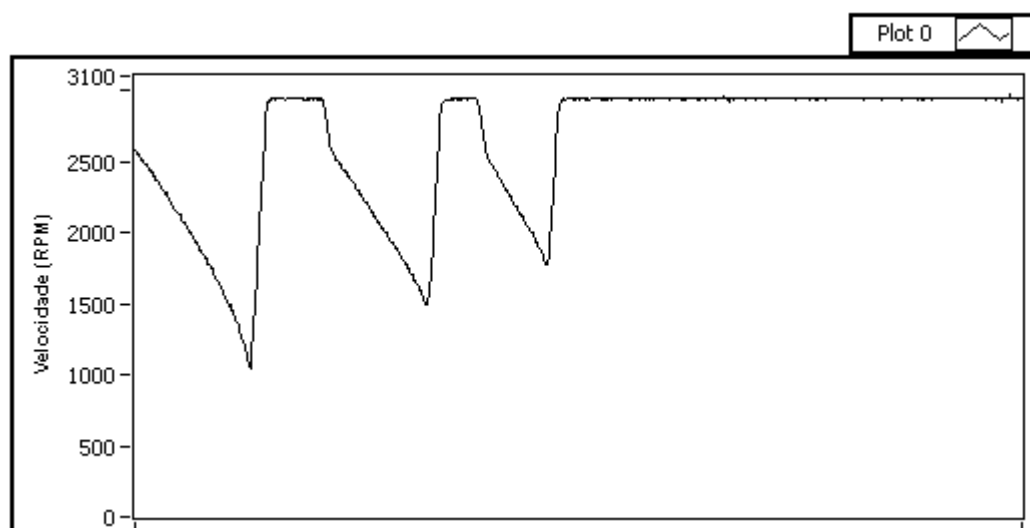


Figura 5.13 - Velocidade ao longo do tempo

5.4.2. Resultados “Adquirir Característica”.

Após desenvolvimento de uma plataforma capaz de controlar a tensão aos terminais do freio, o passo seguinte foi realizar um módulo capaz de aumentar automaticamente o valor de tensão aplicada ao freio, de 0 a 20V. Dessa forma, o utilizador define o número de amostras, e consequentemente inicia-se o processo de aquisição das características binário - velocidade de e corrente - velocidade. Os resultados apresentados nesta secção foram alcançados, utilizando 6 amostras.

- **Característica Binário – Velocidade**, todo o trabalho desenvolvido tinha como principal objectivo alcançar de uma forma automática o gráfico desta característica, presente na Figura 5.14.

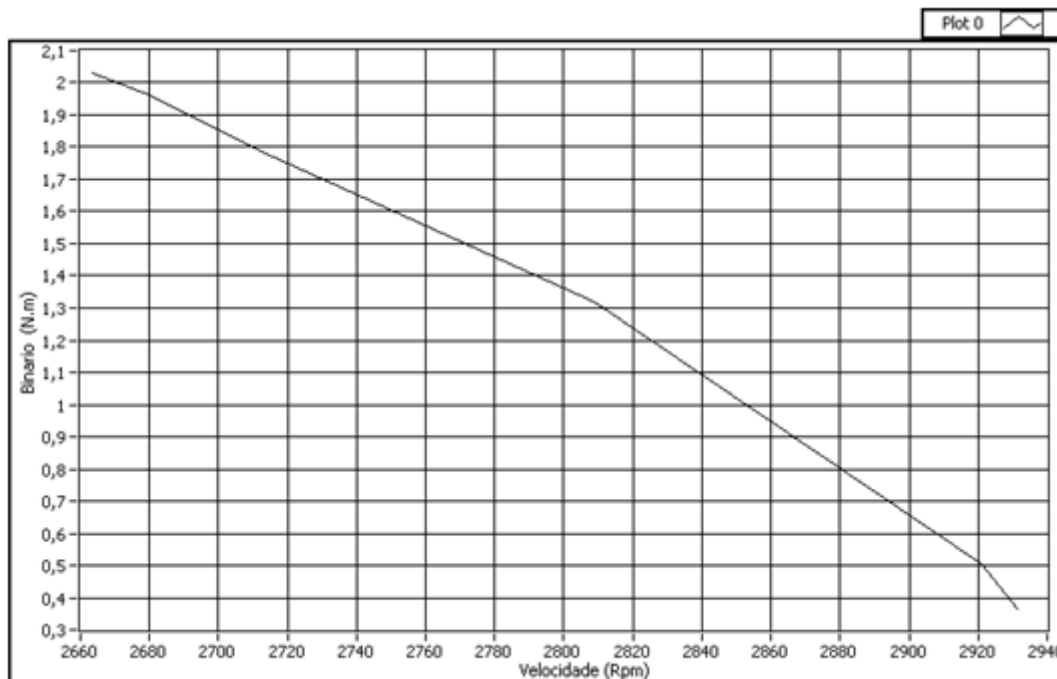


Figura 5.14 - Característica Binário – Velocidade

- **Característica Binário – Velocidade / Teorico Vrs Pratico**, de forma a validarmos os resultados obtidos foi adicionado o módulo descrito na secção 4.4.3.2, que permite a traçar a característica binário – velocidade, para cada valor de velocidade é calculado o valor teórico do mesmo. Os valores teóricos tem por base os parâmetros do motor de indução utilizado, e cujos resultados foram obtidos na secção 5.1.1.

Na Figura 5.15, podemos verificar os resultados desta secção, estes foram alcançados utilizando 6 amostras, e os parâmetros do motor presentes na Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

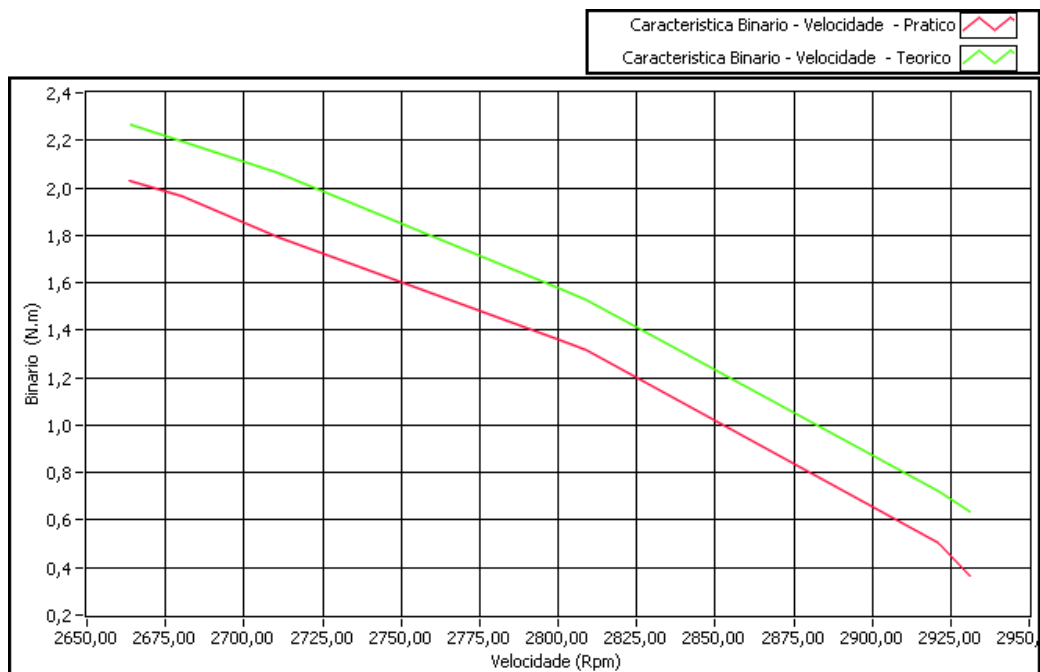


Figura 5.15- Característica Binário – Velocidade / Teórico Vs Prático

Da análise do gráfico verificamos que existe uma diferença entre o comportamento teórico e prático, sendo o último sempre inferior ao teórico. Tal facto deve-se a que quando se pretende estudar o funcionamento em regime permanente sinusoidal de um motor de indução trifásico, usa-se a o circuito equivalente, por fase, originando perdas mecânicas que são desprezadas no cálculo teórico tendo como consequência a referida diferença.

Relativamente à característica Corrente - Velocidade, não foi possível realizar a aquisição do valor de corrente, os valores adquiridos através do transdutor de corrente não eram fiáveis. Apesar de não se conseguir realizar a aquisição do valor de corrente o sistema implementado em Labview já se encontra dimensionado para o mesmo, Anexo A.2.3. Para tal basta realizar a ligação do valor medido de corrente na placa de aquisição de dados, NI 6008 na porta analógica ai0.

Capítulo 6

6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Esta tese consistiu no desenvolvimento de uma plataforma de aquisição automática da característica Binário – Velocidade com aplicação de diversas áreas de estudo. Foi necessário proceder ao estudo e desenvolvimento da parte de electrónica de instrumentação com a utilização da electrónica de potência, utilização de esquemas de detecção de sinal através de sensores e controlando automaticamente a carga aplica ao freio através de software.

O controlo do sistema foi implementado em software, por meio de instrumentação virtual, através do ambiente LabVIEW. Todo o controlo do sistema, desde a geração do sinal de controlo de aplicação de carga, até à aquisição, implementação das técnicas acoplamento de sinais e de determinação do desvio entre o valor teórico e prático do mensurando é feito por intermédio da aplicação de software desenvolvida. Foram implementados duas formas distintas para a aplicação e tratamento dos dados adquiridos, nomeadamente a característica Binário - Velocidade e a característica Corrente - Velocidade. A geração e aquisição de sinal são realizadas através de uma placa de aquisição de dados.

O sistema desenvolvido foi caracterizado, tendo-se verificado que os valores práticos são bastante fiáveis. Para validar o sistema, aplicou-se ao mesmo um modelo de comparação com valores teóricos, tendo sido possível controlar todo o sistema automaticamente e monitorizar os gráficos teóricos e práticos.

Foi provado com o trabalho realizado, e apresentado nesta tese, que o uso de instrumentação virtual para o controlo e aquisição automática através de software de um sistema de que se pretende monitorizar e caracterizar como a máquina assíncrona é possível e apresenta diversas vantagens relativamente aos métodos tradicionais, nomeadamente no que diz respeito à sua forma de visualização de resultados, portabilidade dos sistemas e custo mais reduzido devido ao uso de menos equipamento.

O sistema desenvolvido e aqui apresentado tem como objectivo a sua futura utilização no laboratório de máquinas eléctricas do departamento DEE, servindo de auxílio ao estudo da máquina assíncrona.

6.1. Desenvolvimentos Futuros

Embora a plataforma implementada apresente uma característica de resposta esperada seria de todo interessante poder ser melhorado quanto à característica de carga, ou seja, melhorar o modelo de carga mecânica de forma a aplicar ao motor diferentes tipos de carga de forma automática. Introduzindo no software, vários tipos de sinais de entrada para controlar a referência de velocidade e/ou de binário, ou seja inserir diferentes tipos de tempos, aceleração e desaceleração, etc., e programar diferentes tipos de cargas como por exemplo degraus, rampas, exponenciais, etc., com a utilização de um menu de geração e controlo do sinal eléctrico que controla o freio de pó.

Implementar na parte electrónica dois conversores que fizesse a conversão dos sinais vindos do freio, sem ser necessário utilizar assim o módulo, DL 10055D.

Por fim, é possível generalizar estas funções a outras máquinas eléctricas, sendo um sistema de desenvolvimento aberto, permite implementar novos procedimentos e alterar os já implementados, em qualquer momento e de forma interactiva, com grandes potencialidades de utilização on-line na rede local ou de forma universal na web, pelas próprias características do LabVIEW.

O labVIEW permite de forma rápida a introdução de novo módulos facilitando assim a generalização da instrumentação virtual na monitorização e controlo de sistemas de medida. O que seria uma aplicação pertinente a utilização da nova tecnologia de programação na internet, nomeadamente para aplicações remotas. Possibilitando assim o acesso a aos resultados de uma experiência ou ensaio na rede local de um laboratório.

Bibliografia

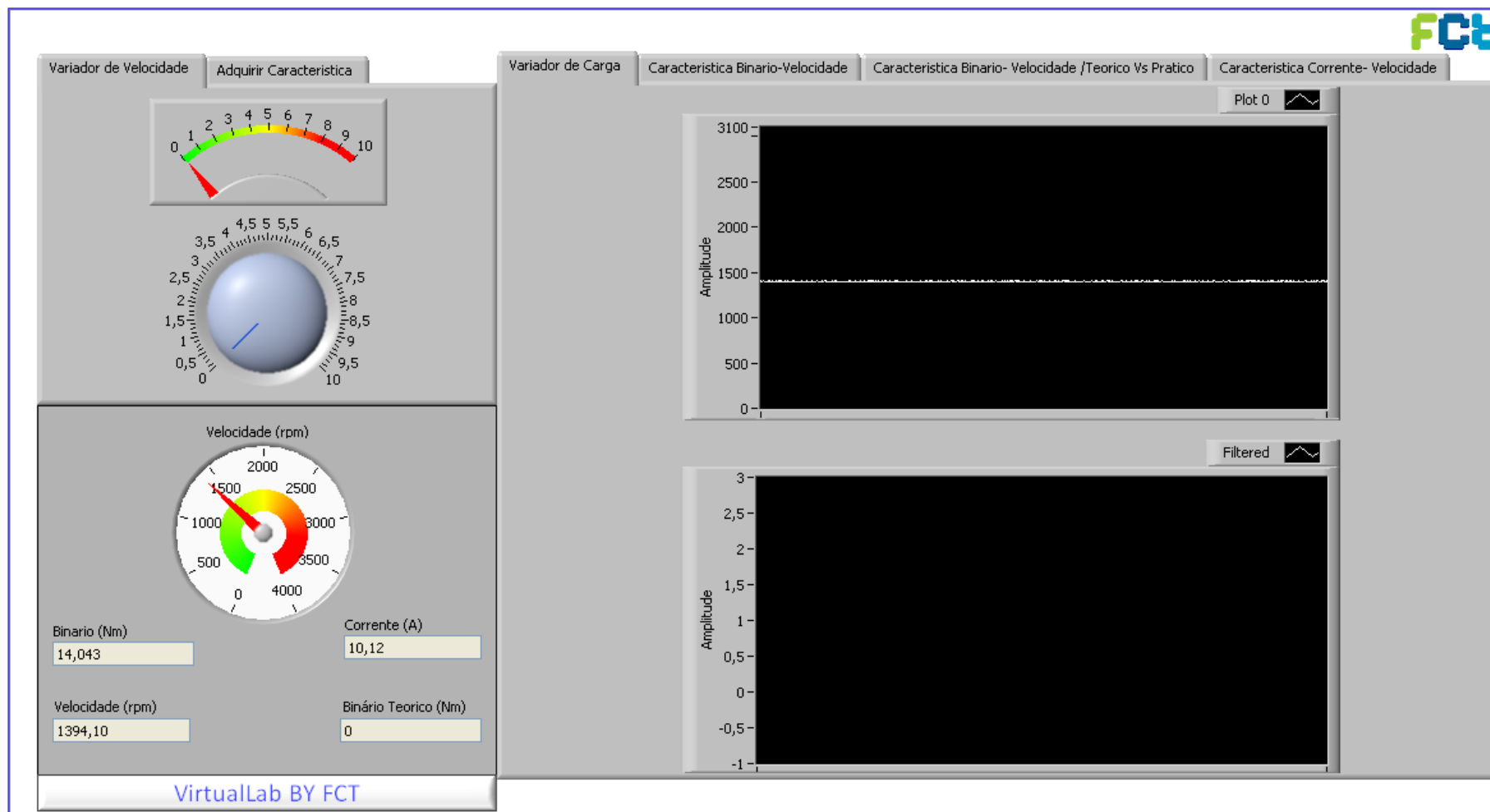
- [1] J.C.Andreas “Energy – Efficient Electric Motors” Manuel Deller, 1982.
- [2] Campilho, Aurélio, “Instrumentação electrónica. Métodos e Técnicas de Medição”, 1º Edição, Porto, FEUP Edições, 2000.
- [3] Silva, Joaquim, Artigo “Sistemas de Integração de Instrumentos Virtuais”, Coimbra, FCT/UC, 1993.
- [4] Feedback, Control & Instrumentation, <http://www.feedback-group.com/products/educational-equipment/control-instrumentation>.
- [5] Fonseca, Jaime, Artigo “Monitorização e Controlo do Motor de Indução Trifásico”, Braga, Universidade do Minho, 1995.
- [6] Granadeiro, Samuel, Dissertação “Controlo de Motor Assíncrono Aplicado a Veículos Eléctricos”, Lisboa, FCT/UNL, 2009.
- [7] Instruments, National. Getting Started with LabVIEW. [Online] NI, Novembro de 2001. <http://www.ni.com/manuals>.
- [8] Rabinow, Jacob: Magnetic Fluid Torque and force transmitting device; 1951.
- [9] Albert Paul Malvino, Ph. D., E. E. Principios de Electronica, 6 Edição, volume 1, McGraw-Hill, 2000.
- [10] Souza, Ivair, Artigo “Circuitos Retificadores ”, Brasil, http://ivairsouza.com/circuitos_retificadores.html.
- [11] Albert Paul Malvino, Ph. D., E. E. Principios de Electronica, 6 Edição, volume 2, McGraw-Hill, 2000.
- [12] Datasheet Fairchild, “Phototransistor Optocouplers CNY17 series”.
- [13] Bolton, W., Instrumentation and control systems. 2004: Newnes.
- [14] De Lorenzo Group, “Módulos de medida”, www.delorenzogroup.com/dl/altri/portoghese/eurolab/euro_por14.pdf.
- [15] Kehtarnavaz, N. and N. Kim, Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW. 2005: Newnes.
- [16] Instruments, National. Getting Started with LabVIEW. [Online] NI, “Vantagens da utilização do LabVIEW em pesquisas académicas”, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/10161>.
- [17] Nadovich, C.T., Synthetic Instruments Concepts and Applications. 2005: Newnes.
- [18] Datasheet General Semiconductor, Glass passivated single-phase bridge rectifier W006G.

Anexos

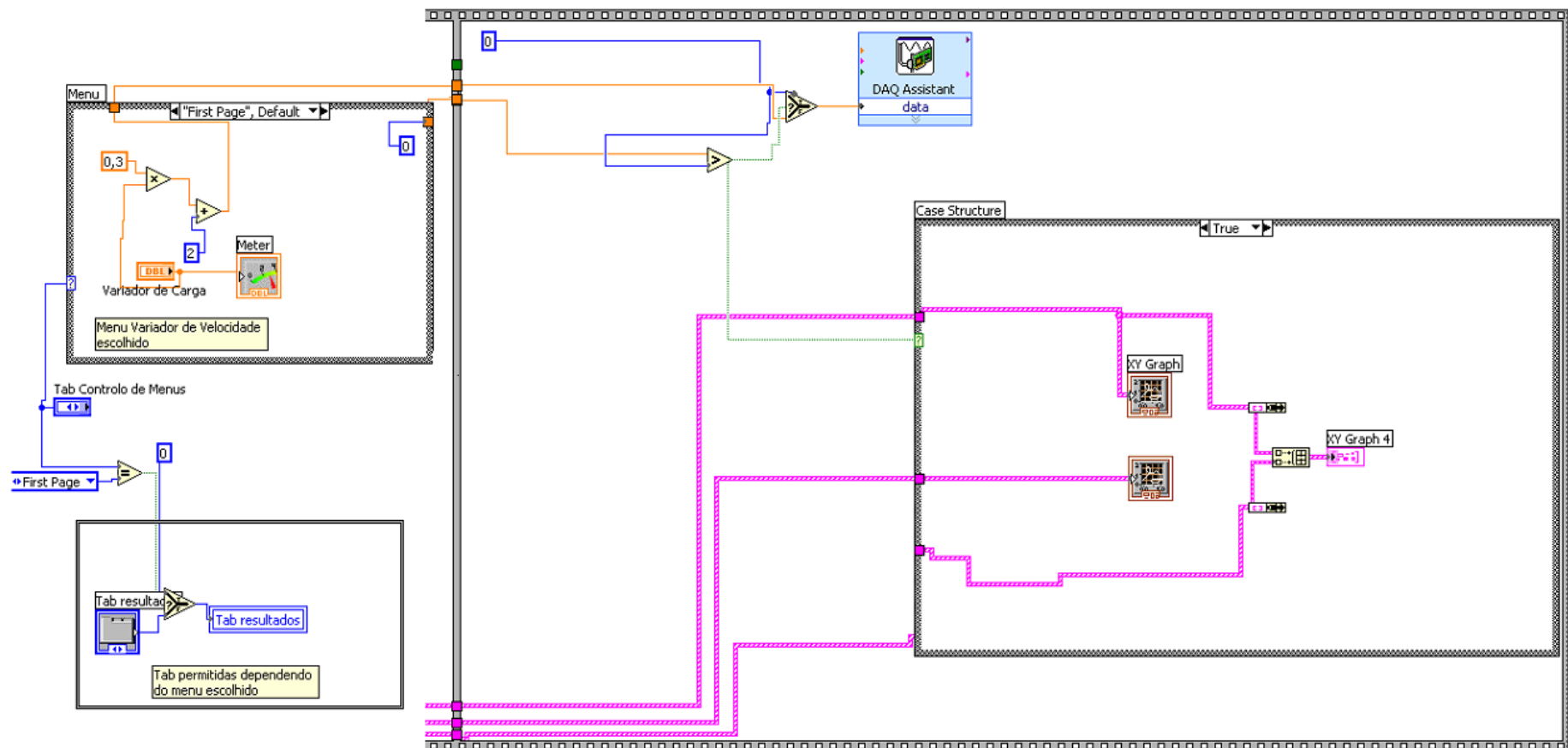
Anexo A – Módulos desenvolvidos em Labview.

Anexo A.1 – Menu “Variador de Velocidade”

Anexo A.1.1 – Front Panel

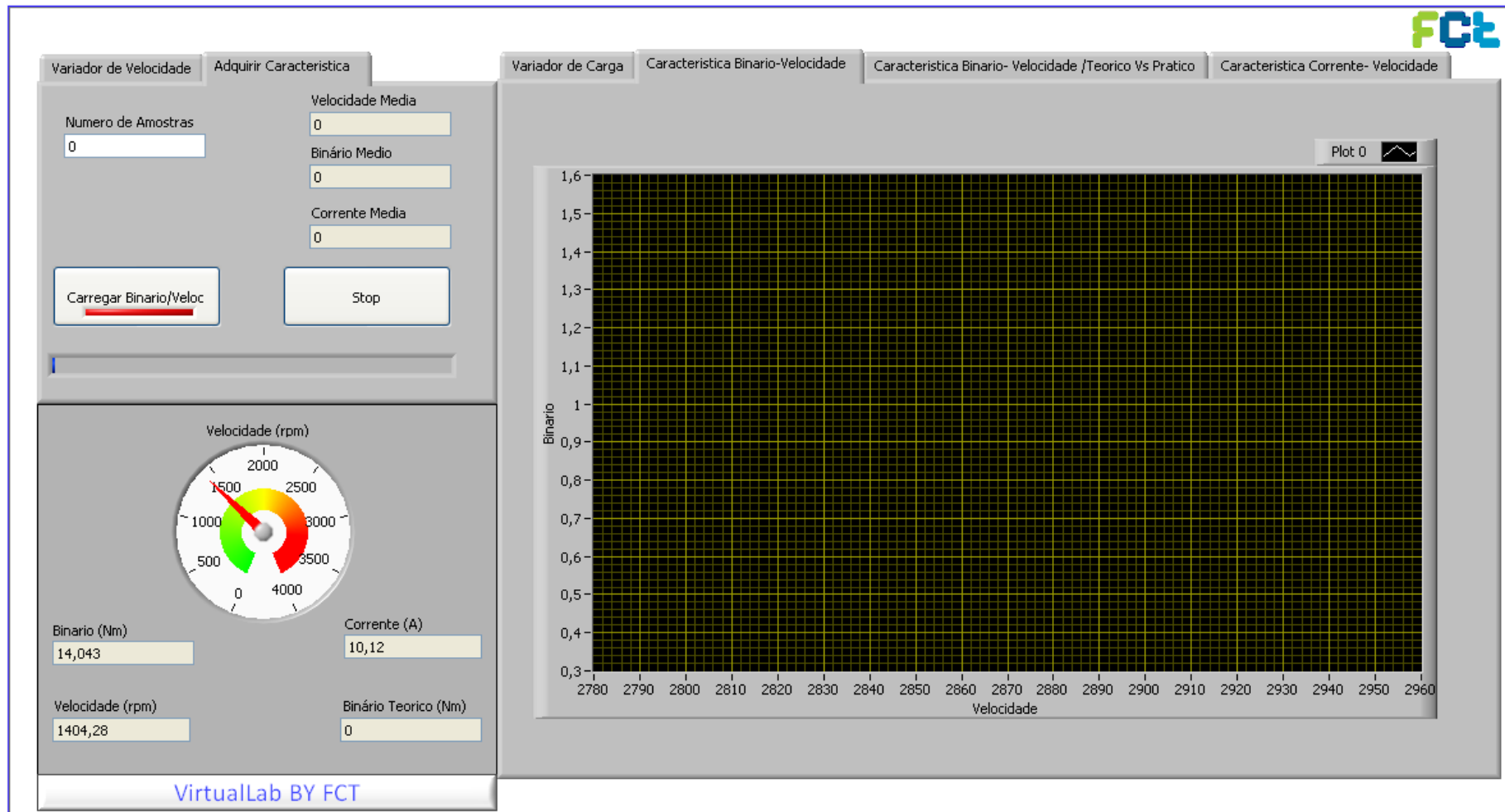


Anexo A.1.1 – Block Diagram

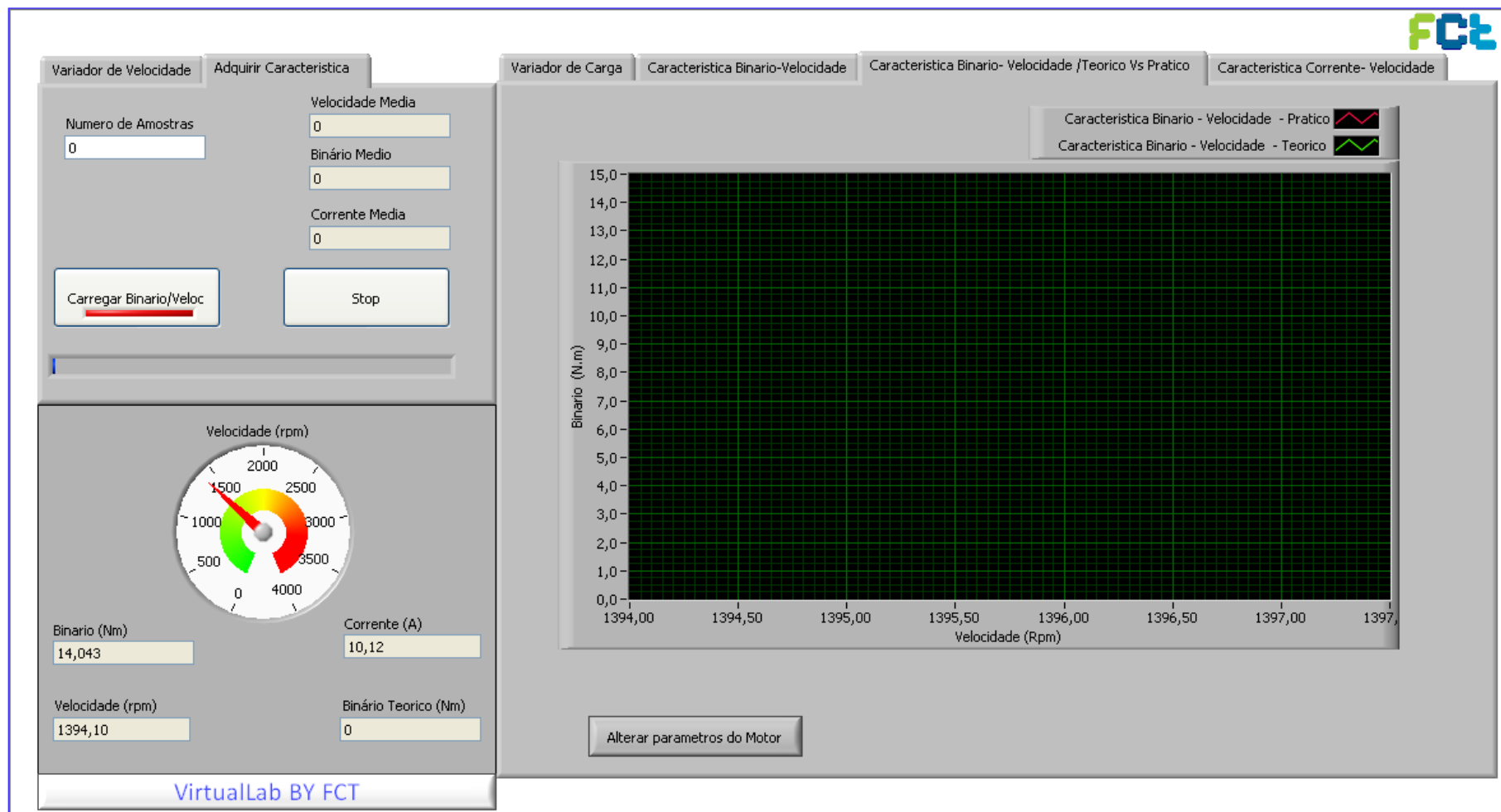


Anexo A.2 – Menu “Adquirir Característica”

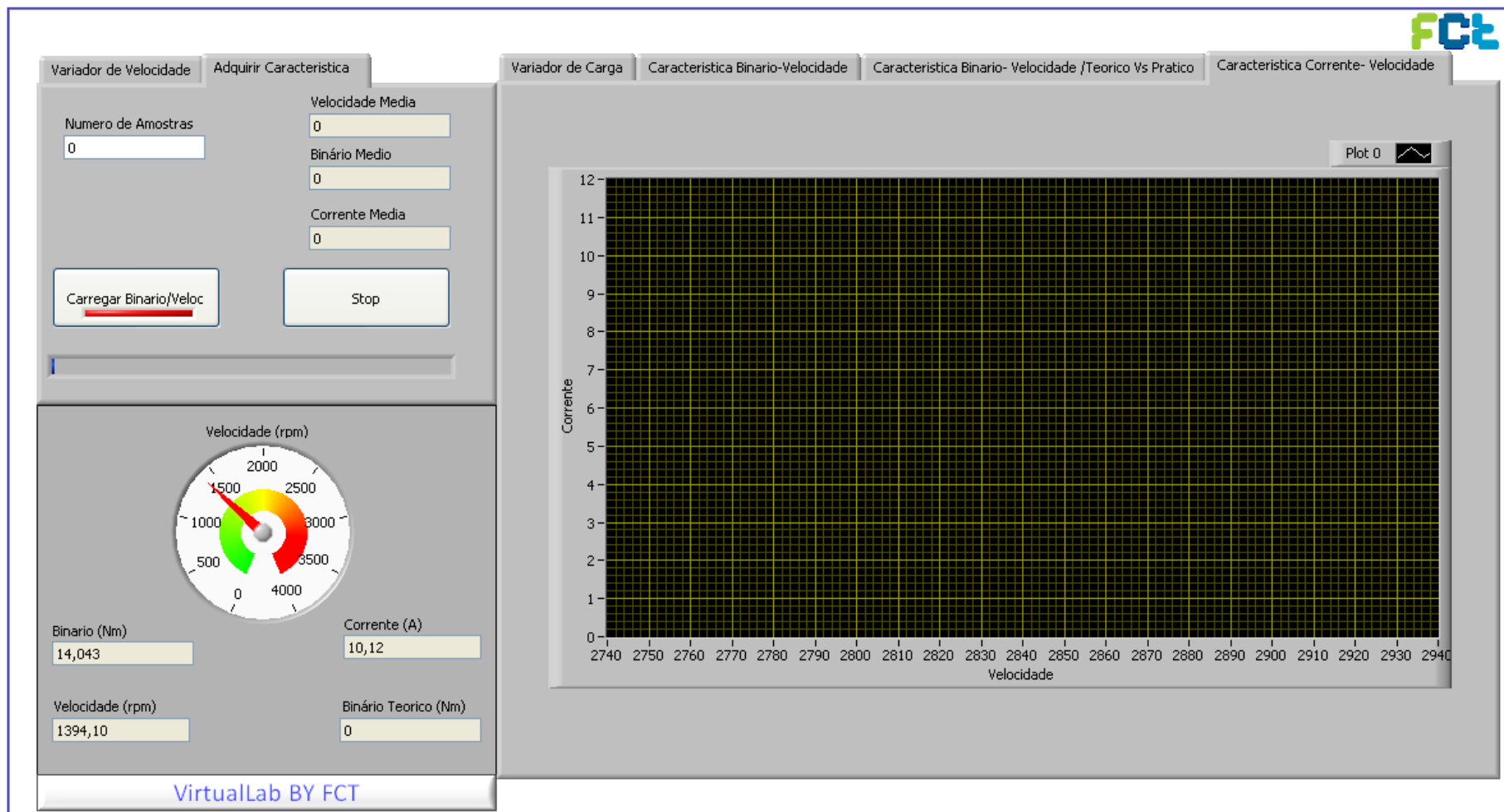
Anexo A.2.1 – Front Panel (1 - Característica Binário - Velocidade)



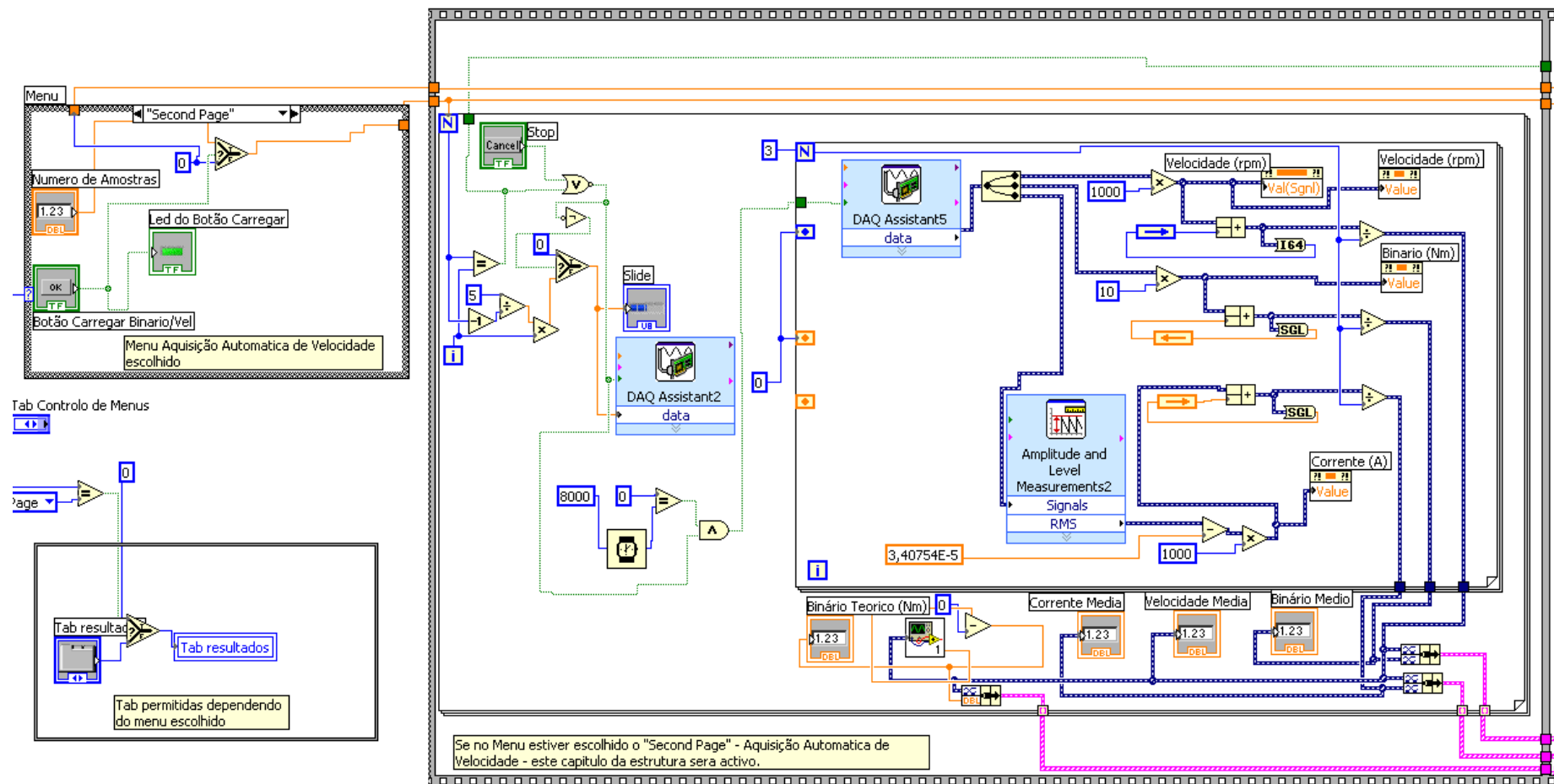
Anexo A.2.2 – Front Panel (2 - Característica Binário – Velocidade/ Teórico Vs Pratico)



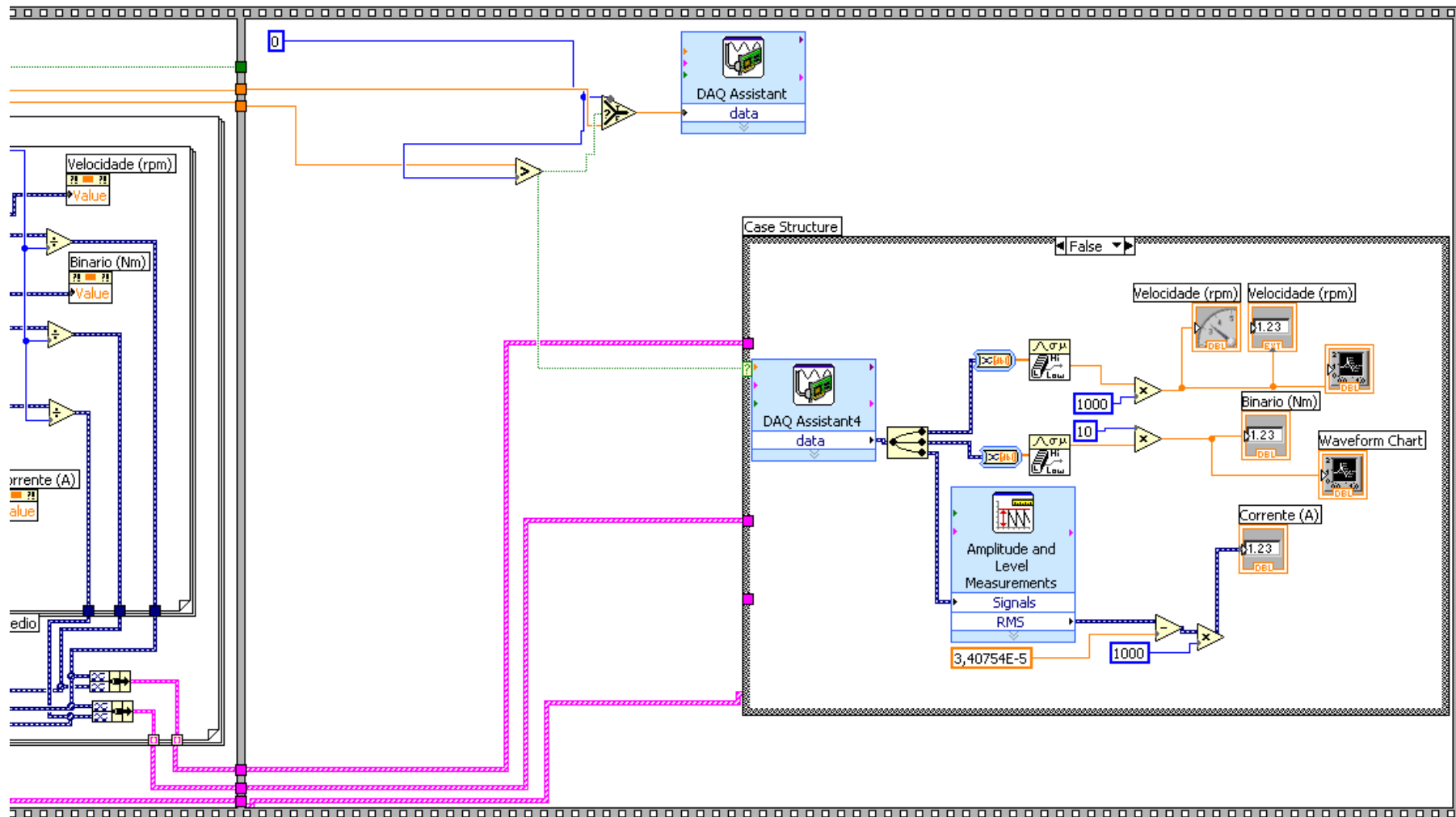
Anexo A.2.3 – Front Panel (3 - Característica Corrente - Velocidade)



Anexo A.2.4 – Block Diagram (1/2)



Anexo A.2.4 – Block Diagram (2/2)



Anexo A.3 – Sub VI Característica Teórica Vs Prático

Anexo A.3.1 – Front Panel (“Característica Máquina Assíncrona”)

Característica da Máquina Assíncrona

Simulação da Característica binário - velocidade

Características da Máquina Assíncrona

Unom (V) - Tensão Nominal	380	Re (Ohms) - Resistencia do Estator	4,8
Pn (kW) - Potência Nominal	1,1	Rr (Ohms) - Resistencia do Rotor	8,5
Inom (A) - Corrente Nominal	2,5	Nr (RPM) - Velocidade do Rotor	-11999
cos ϕ	0,9	T (N) - Binario de Carga	2,833
f (Hz) - Frequencia Nominal	50	Smax - Escorregamento maximo	0,319
Nnom (RPM) - Velocidade Nominal	2830	Tmax (N) - Binário máximo	15,851
p - Numero Par de Pólos	1		

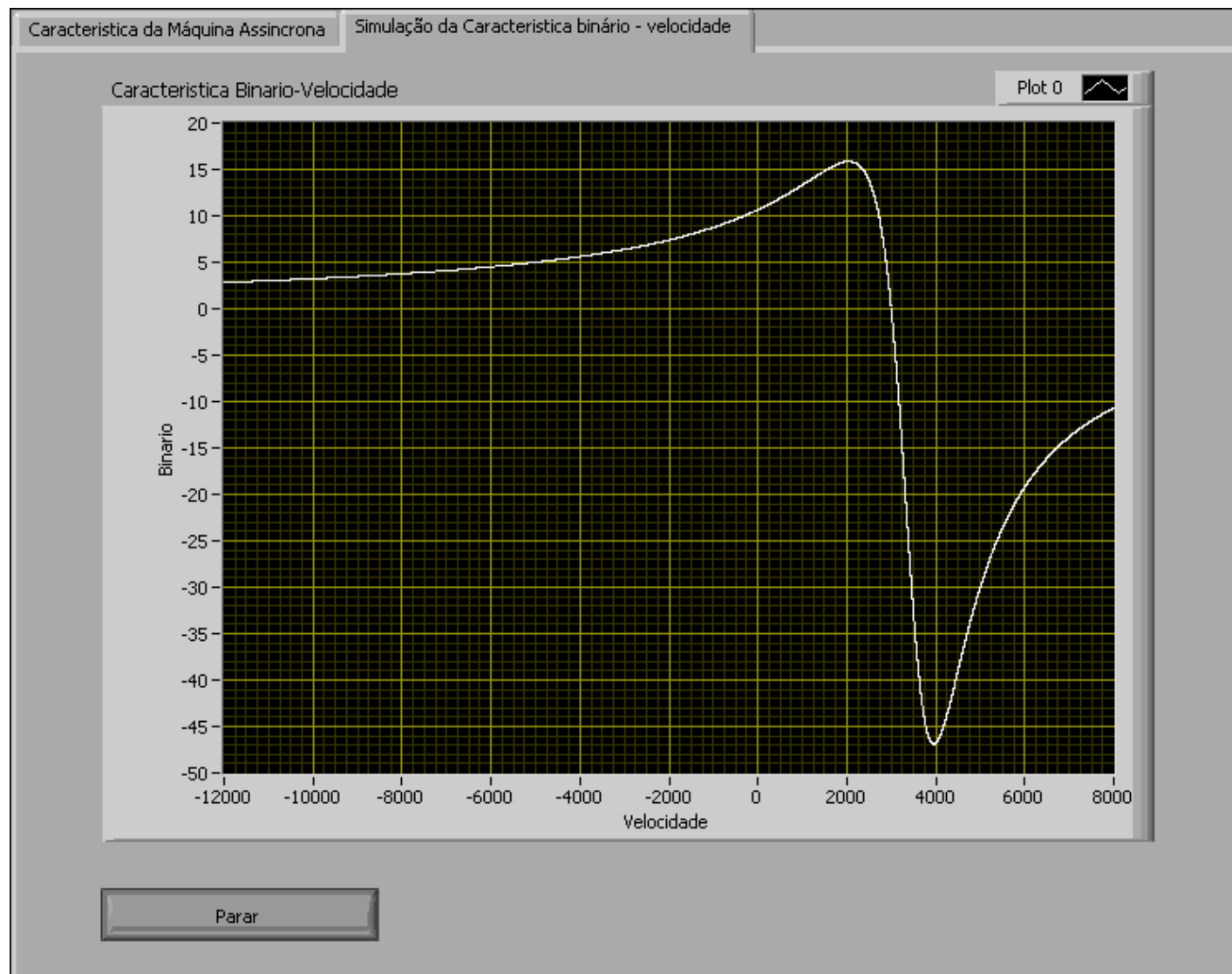
Resultados do Ensaio em vazio:

Io (A) - Corrente no Vazio	1,22	Zo (Ohms) - Impedancia no Vazio	179,83
Po (w) - Potência no Vazio	345	Cos (ϕ)	0,43
		weLm (Ohms)	199,149
		Lm (H) - Indutância mútua	0,634

Resultados do Ensaio em curto-circuito:

U (V) - Tensão aplicada ao estator	50	Zcc (Ohms) - Impedancia em CC	11,547
Icc (A) - Corrente curto-circuito	2,5	Cos (ϕ)	0,684
Pcc (w) - Potência de curto-circuito	148	Re+Rr' - (Ohms)	7,893
		we(Lle+Llr') - (Ohms)	8,428
		Rr' (Ohms) - Resistência do Rotor reduzida ao estator	3,093

Anexo A.3.2 – Front Panel (“Simulação da Característica binário - velocidade”)



Anexo A.3.3– Block Diagram

