

MODELAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE MOTOR DC

Marcos André da Silva Moura



Departamento de Engenharia Electrotécnica
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas

2014

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Marcos André da Silva Moura, Nº 1090419, 1090419@isep.ipp.pt

Orientação científica: Ramiro de Sousa Barbosa, rsb@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Electrotécnica
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas

2014

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Eng.º Ramiro Barbosa.

À minha família que sempre acreditou em mim.

Resumo

O modelo matemático de um sistema real permite o conhecimento do seu comportamento dinâmico e é geralmente utilizado em problemas de engenharia. Por vezes os parâmetros utilizados pelo modelo são desconhecidos ou imprecisos. O envelhecimento e o desgaste do material são fatores a ter em conta pois podem causar alterações no comportamento do sistema real, podendo ser necessário efetuar uma nova estimação dos seus parâmetros. Para resolver este problema é utilizado o *software* desenvolvido pela empresa MathWorks, nomeadamente, o Matlab e o Simulink, em conjunto com a plataforma Arduíno cujo *Hardware é open-source*. A partir de dados obtidos do sistema real será aplicado um Ajuste de curvas (*Curve Fitting*) pelo Método dos Mínimos Quadrados de forma a aproximar o modelo simulado ao modelo do sistema real. O sistema desenvolvido permite a obtenção de novos valores dos parâmetros, de uma forma simples e eficaz, com vista a uma melhor aproximação do sistema real em estudo. A solução encontrada é validada com recurso a diferentes sinais de entrada aplicados ao sistema e os seus resultados comparados com os resultados do novo modelo obtido. O desempenho da solução encontrada é avaliado através do método das somas quadráticas dos erros entre resultados obtidos através de simulação e resultados obtidos experimentalmente do sistema real.

Palavras-Chave

Motor, Corrente Contínua, Simulink, Matlab, Arduíno, Identificação, Estimação, Ajuste de Curvas, Mínimos Quadrados Não Lineares.

Abstract

The mathematical model of a real system allows the knowledge of its dynamic behaviour and is commonly used in engineering problems. Sometimes the parameters used by the model are unknown or inaccurate. The aging and wear of the material are all factors to be taken into account as they may cause changes in the behaviour of the real system and a new estimation of its parameters may be required. To solve this problem we will use the software developed by the company MathWorks, namely Matlab and Simulink in conjunction with the Arduino platform whose hardware is open-source. The Curve Fitting technique will be applied to the data obtained from the real system, using the least squares method in order to approximate the simulated model parameters to the actual real system model. The developed system allows one to obtain new values of the parameters in a simple and effective manner. The solution is validated using different input signals applied to the system and the results compared with the ones obtained from the new model. The performance of the solution found is evaluated through the calculation of an error function using the sum of the squared errors method between the results obtained through simulation and experimental results of the real system.

Keywords

Motor, Direct Current, Simulink, Matlab, Arduino, Identification, Estimation, Curve fitting, Non-linear Least Squares.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ACRÓNIMOS.....	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.CALENDARIZAÇÃO.....	2
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2. O MOTOR DC	5
2.1.CATEGORIZAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS	5
2.2.PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	6
2.2.1. <i>Estatótor</i>	7
2.2.2. <i>Rotor</i>	7
2.2.3. <i>Escovas e comutador</i>	7
2.3.TIPOS DE MOTORES DC.....	8
2.3.1. <i>Motor de excitação separada</i>	8
2.3.2. <i>Motor de excitação em série</i>	8
2.3.3. <i>Motor de excitação em paralelo</i>	9
2.3.4. <i>Motor de excitação composta</i>	10
2.3.5. <i>Motor de ímãs permanentes</i>	10
2.4.EQUAÇÕES DINÂMICAS DO MOTOR DC	11
2.4.1. <i>Características elétricas</i>	11
2.4.2. <i>Características mecânicas</i>	12
2.4.3. <i>Representação no espaço de estados</i>	13
2.4.4. <i>Função de transferência do diagrama de blocos</i>	14
3. HARDWARE E IMPLEMENTAÇÃO	17

3.1.ARQUITETURA DO SISTEMA	17
3.2.O MOTOR DC.....	18
3.3.MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO.....	20
3.4.ARDUÍNO.....	21
3.5.SENSORES.....	22
3.5.1. <i>Sensor de corrente</i>	23
3.5.2. <i>Sensor de velocidade</i>	25
3.6.CONDICIONAMENTO DE SINAL	26
3.7.TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO	27
3.7.1. <i>Escolha de um mosfet</i>	28
3.7.2. <i>Controlador mosfet</i>	30
3.8.PONTE-H	32
3.9.ALIMENTAÇÃO	33
4. SOFTWARE	37
4.1.PACOTE DE SUPORTE PARA O <i>HARDWARE</i> ARDUÍNO	37
4.2.SIMULINK	38
4.2.1. <i>Obtenção de dados</i>	38
4.2.2. <i>Descrição do modelo linear do motor DC</i>	44
4.3.FERRAMENTA DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS.....	45
4.3.1. <i>Como funciona a ferramenta de estimação</i>	46
4.3.2. <i>Método dos mínimos quadrados não lineares</i>	46
4.3.3. <i>Processo de estimação</i>	47
5. ENSAIOS E RESULTADOS.....	55
5.1.PARÂMETROS DO FABRICANTE	57
5.2.RESULTADOS COM RECURSO À RESPOSTA EM VELOCIDADE.....	59
5.2.1. <i>Onda quadrada</i>	59
5.2.2. <i>Ruído gaussiano</i>	62
5.2.3. <i>Ruído pseudoaleatório</i>	64
5.2.4. <i>Sinal composto</i>	66
5.3.RESULTADOS COM RECURSO ÀS RESPOSTAS EM VELOCIDADE E CORRENTE.....	69
5.3.1. <i>Onda quadrada</i>	70
5.3.2. <i>Ruído Gaussiano</i>	72
5.3.3. <i>Ruído pseudoaleatório</i>	75
5.3.4. <i>Sinal composto</i>	78
5.4.DISSCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
6. MODELO NÃO LINEAR.....	87
6.1.ATRITO DE COULOMB	88

6.2.CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	89
6.3.DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO NÃO LINEAR	90
6.4.RESULTADOS PARA OS DADOS DO FABRICANTE	90
6.5.ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS	92
6.5.1. <i>Resultados obtidos</i>	94
6.6.DISSCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	97
7. CONCLUSÕES.....	101
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	103
ANEXO A. ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE CONTROLO E AQUISIÇÃO DE DADOS	105
ANEXO B. CIRCUITO IMPRESSO E VISUALIZAÇÃO 3D	107
ANEXO C. PACOTE DE SUPORTE PARA <i>HARDWARE</i>	109
ANEXO D. INTERFACE GRÁFICA DESENVOLVIDA.....	115

Índice de Figuras

Figura 1	Princípio de funcionamento	6
Figura 2	Simple motor DC de dois pólos [3]	7
Figura 3	Motor de excitação separada [5]	8
Figura 4	Motor de excitação em série	9
Figura 5	Motor de excitação em paralelo	9
Figura 6	Motor de excitação composta	10
Figura 7	Diagrama do circuito elétrico do motor DC	11
Figura 8	Diagrama de blocos do motor DC	15
Figura 9	Arquitetura do sistema	18
Figura 10	Foto do motor utilizado	19
Figura 11	Onda PWM	20
Figura 12	Placa de desenvolvimento Arduíno Mega	21
Figura 13	Sistema típico de controlo de um motor DC	23
Figura 14	Sensor de corrente utilizado	24
Figura 15	Esquemático do sensor de corrente de efeito Hall	25
Figura 16	Esquemático do condicionamento de sinal	27
Figura 17	Corte transversal de um MOSFET [11]	28
Figura 18	MOSFET de potência IRF1018	30

Figura 19	Controlador MOSFET: a) Dispositivo e b) Entradas e saídas	31
Figura 20	Circuito em ponte-H	32
Figura 21	Circuito em ponte-H – Tensão aplicada ao motor: a) Tensão positiva e b) Tensão negativa	32
Figura 22	Esquemático do regulador de tensão	34
Figura 23	Esquemático base do inversor de tensão.	35
Figura 24	Modelo a correr na placa de desenvolvimento	39
Figura 25	Definições do modelo aplicado ao Arduino: a) Solver, b) <i>Hardware Implementation</i> e c) <i>Code Generation</i> .	40
Figura 26	Modelo a correr no Simulink – nível 1	41
Figura 27	Modelo a correr no Simulink – nível 2	42
Figura 28	Propriedades do bloco Interface Serial Motor	42
Figura 29	Modelo a correr no Simulink – nível 3	43
Figura 30	Modelo no Simulink do motor DC	44
Figura 31	Janela principal da ferramenta de estimação	45
Figura 32	Menu <i>Transient Data</i>	48
Figura 33	Aplicação do Simulink para Estimação de Parâmetros (GUI)	49
Figura 34	Escolha dos dados a ser usados no processo de estimação	49
Figura 35	Escolha dos parâmetros a estimar por ficheiro de estimação	50
Figura 36	Opções da estimação	51
Figura 37	Aproximações durante a estimação: a) Trajetória dos parâmetros e b) Outputs do modelo simulado vs. modelo real	52

Figura 38	Janela de validação dos dados obtidos	53
Figura 39	Sinais de excitação: a) onda quadrada, b) ruído gaussiano e c) ruído pseudoaleatório	57
Figura 40	Resultados do modelo para os parâmetros do fabricante para os diferentes sinais de excitação: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	58
Figura 41	Onda quadrada - Resultado da estimação – apenas velocidade	60
Figura 42	Onda quadrada - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	61
Figura 43	Ruído gaussiano - Resultado da estimação – apenas velocidade	62
Figura 44	Ruído gaussiano - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	64
Figura 45	Ruído pseudoaleatório - Resultado da estimação – apenas velocidade	65
Figura 46	Ruído pseudoaleatório - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	66
Figura 47	Sinal composto - Resultado da estimação – apenas velocidade: a) onda quadrada, b) ruído gaussiano e c) ruído pseudoaleatório	68
Figura 48	Sinal composto - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	69
Figura 49	Onda quadrada - Resultados da estimação – velocidade e corrente	71
Figura 50	Onda quadrada - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	72
Figura 51	Ruído gaussiano - Resultados da estimação – velocidade e corrente	73
Figura 52	Ruído gaussiano - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	75

Figura 53	Ruído pseudoaleatório - Resultados da estimação – velocidade e corrente	76
Figura 54	Ruído pseudoaleatório - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	77
Figura 55	Sinal composto - Resultados da estimação – velocidade e corrente: a) onda quadrada, b) ruído gaussiano e c) ruído pseudoaleatório	79
Figura 56	Sinal composto - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	80
Figura 57	Cálculo dos erros quadráticos (em escala logarítmica de base 2) para estimações apenas a partir de dados de velocidade	85
Figura 58	Cálculo dos erros quadráticos (em escala logarítmica de base 2) para estimações a partir de dados de velocidade e corrente	85
Figura 59	Modelo não linear do atrito de Coulomb	88
Figura 60	Zona não linear do motor DC	89
Figura 61	Diagrama de blocos do modelo não linear do motor DC	90
Figura 62	Resultados do modelo para os parâmetros do fabricante para os diferentes tipos de excitação: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	92
Figura 63	Sinais usados na estimação para o modelo não linear do motor	94
Figura 64	Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular	96
Figura 65	Cálculo dos erros quadráticos (em escala logarítmica de base 2) para estimações a partir de dados de velocidade e corrente	98
Figura 66	Sinal de excitação sinusoidal	99
Figura 67	Respostas em corrente: a) Modelo não linear e b) Modelo linear	99

Figura 68	Ambiente de trabalho MATLAB	109
Figura 69	Janela de escolha do método de instalação ou desinstalação	109
Figura 70	Pacotes de suporte disponíveis	110
Figura 71	Janela de <i>log in</i>	110
Figura 72	Licenças e condições de uso do <i>software</i> a ser instalado	111
Figura 73	Processo de instalação	112
Figura 74	Instalação dos <i>drivers</i> necessários	112
Figura 75	Documentação e exemplos relativos ao pacote de suporte	113
Figura 76	Exemplo dos blocos fornecidos pelo pacote de suporte	113
Figura 77	Interface gráfica desenvolvida	116
Figura 78	Resultado da funcionalidade de validação	116

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização das tarefas	2
Tabela 2	Símbolos utilizados na descrição do motor DC	13
Tabela 3	Especificações gravadas no motor	18
Tabela 4	Especificações do motor na <i>datasheet</i>	19
Tabela 5	Características da placa de desenvolvimento	22
Tabela 6	Características do sensor de corrente	24
Tabela 7	Tabela de verdade do controlador MOSFET	31
Tabela 8	Estados do motor em relação às entradas da ponte-H	33
Tabela 9	Requisitos de alimentação	33
Tabela 10	Estados do motor relativamente aos sinais PWM aplicados	38
Tabela 11	Onda quadrada - Resultados da estimação – apenas velocidade	59
Tabela 12	Onda quadrada - Opções da estimação – apenas velocidade	60
Tabela 13	Ruído gaussiano - Resultados da estimação – apenas velocidade	62
Tabela 14	Ruído gaussiano - Opções da estimação – apenas velocidade	62
Tabela 15	Ruído pseudoaleatório - Resultados da estimação – apenas velocidade	64
Tabela 16	Ruído pseudoaleatório - Opções da estimação – apenas velocidade	64
Tabela 17	Sinal composto - Resultados da estimação – apenas velocidade	67
Tabela 18	Sinal composto - Opções da estimação – apenas velocidade	67

Tabela 19	Onda quadrada - Resultados da estimação – velocidade e corrente	70
Tabela 20	Onda quadrada - Opções da estimação – velocidade e corrente	70
Tabela 21	Ruído gaussiano - Resultados da estimação – velocidade e corrente	73
Tabela 22	Ruído gaussiano - Opções da estimação – velocidade e corrente	73
Tabela 23	Ruído pseudoaleatório - Resultados da estimação – velocidade e corrente	75
Tabela 24	Ruído pseudoaleatório - Opções da estimação – velocidade e corrente	76
Tabela 25	Sinal composto - Resultados da estimação – velocidade e corrente	78
Tabela 26	Sinal composto - Opções da estimação – velocidade e corrente	78
Tabela 27	Parâmetros obtidos	82
Tabela 28	Cálculo dos erros quadráticos para estimacões apenas a partir de dados de velocidade	83
Tabela 29	Cálculo dos erros quadráticos para estimacões a partir de dados de velocidade e corrente	84
Tabela 30	Resultados da estimacão – velocidade e corrente	95
Tabela 31	Opções da estimacão – velocidade e corrente	95
Tabela 32	Cálculo dos erros quadráticos para estimacões a partir de dados de velocidade e corrente	98

Acrónimos

AC – *Alternating Current*

DC – *Direct Current*

FHP – *Fractional Horsepower Motor*

FCEM – *Força Contra-Eletromotriz*

GUI – *Graphical User Interface*

MOSFET – *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect-Transistor*

PWM – *Pulse Width Modulation*

USB – *Universal Serial Bus*

ADC – *Analog to Digital Converter*

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os motores de corrente contínua são atuadores relativamente pequenos, rápidos, eficientes e baratos. Estes dispositivos desempenham um papel fundamental em inúmeros sistemas de controlo.

Atualmente, grande maioria dos dispositivos eletrónicos são rapidamente ultrapassados por versões mais avançadas, ficando assim sem utilidade. Neste tipo de dispositivos, por exemplo, impressoras, *scanners* e secadores de cabelo podemos encontrar motores de corrente contínua que podem ser reutilizados em outros projetos. Um dos grandes problemas é a não existência de informação sobre estes motores, o que dificulta o seu estudo. Esta informação refere-se aos parâmetros que descrevem o modelo matemático do motor de forma a possibilitar o seu estudo em *software* de simulação, tais como o MATLAB e Simulink. O modelo matemático poderá ser utilizado na análise, projeto e simulação de sistemas de controlo. Um modelo com parâmetros imprecisos é uma das causas da baixa eficiência de um sistema.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a obtenção dos modelos matemáticos, precisos, do motor DC (*Direct Current*) através da aproximação dos dados experimentais do sistema real com dados obtidos a partir da simulação de um modelo do motor. Para alcançar este objetivo, primeiramente é projetado um sistema de aquisição de dados com os devidos sensores. São usados vários modelos matemáticos que representam as dinâmicas do sistema real. Os parâmetros do modelo usado são estimados através do método dos Mínimos Quadrados Não Lineares e a validação dos resultados obtidos com recurso a funções de cálculo de erro e comparações gráficas das respostas do sistema real com as respostas do sistema simulado.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

Sendo a obtenção dos modelos matemáticos, precisos, do motor DC a motivação deste trabalho, a sua prossecução conduziu à calendarização apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 Calendarização das tarefas

Atividade \ Data	2013				2014										
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pesquisa sobre o projeto															
Seleção do material pesquisado															
Estudo do material pesquisado															
Formulação de uma solução															
Aquisição de material															
Testes dos componentes usados															
Desenvolvimento do Hardware															
Estudo do software															
Desenvolvimento do software															
Testes e ensaios															
Realização do relatório															

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O desenvolvimento deste trabalho (capítulo 1) iniciou-se com um enquadramento do que é a realidade e o destino de muitos motores de corrente contínua e sobre o problema que é a falta de documentação e informação sobre os mais variados motores. Posteriormente, são identificados os objetivos principais deste trabalho e a calendarização que conduz á prossecução do mesmo.

No capítulo seguinte, 2, é efetuado um estudo do motor DC. Neste capítulo é estudado o princípio de funcionamento dos motores DC, e apresentados alguns dos diferentes tipos destes. É realizado um estudo sobre as equações dinâmicas que descrevem o comportamento do motor DC, incluindo as características elétricas e mecânicas, bem como as suas representações no espaço de estados e em diagrama de blocos.

No capítulo 3 é efetuado um estudo sobre o *hardware* bem como a sua implementação. Neste capítulo são analisados todos os componentes usados no desenvolvimento do sistema e a forma como são implementados.

Com vista a conexão do sistema com o computador, o capítulo 4 descreve o *software* usado para atingir esse objetivo, e também a ferramenta de estimação de parâmetros do Simulink usada para obter os novos valores dos parâmetros do motor DC.

No capítulo 5 são efetuadas várias experiências e todos os resultados obtidos são apresentados. Para cada estimação são apresentados vários gráficos com comparações entre os resultados das respostas simuladas e as respostas do sistema real.

No capítulo 6 é realizado um estudo do modelo não linear do motor DC e realizadas todas as experiências necessárias à estimação dos novos parâmetros.

Por fim, o último capítulo, o 7, apresenta as principais conclusões e perspetivados desenvolvimentos para futuros trabalhos.

2. O MOTOR DC

Um motor DC (*Direct Current*) é uma máquina capaz de converter energia elétrica em energia mecânica através da interação de um campo magnético com condutores de corrente elétrica. O processo inverso, o qual converte energia mecânica em energia elétrica, é alcançado através de geradores ou dínamos.

O motor DC é constituído por circuito indutor, circuito induzido e circuito magnético. Sendo constituído por elementos fixos e móveis, dá-se o nome de estator à parte fixa do motor e o nome rotor à parte móvel do mesmo. No caso do motor DC o circuito indutor encontra – se no estator e o circuito induzido, no rotor.

Na maioria dos motores DC, o rotor é um 'eletroímã' que gira entre os pólos de ímanes permanentes estacionários. Para tornar o eletroímã mais eficiente o rotor contém um núcleo de ferro [1].

2.1. CATEGORIZAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS

De acordo com o tipo de alimentação os motores elétricos podem ser divididos em motores de corrente contínua (DC) e em motores de corrente alternada (AC). Esta categorização é apenas uma convenção pois existem motores capazes de funcionar em AC ou DC, são assim chamados de motores universais.

A potência nominal é também usada para categorizar motores, menos de 746 Watts que equivale a um cavalo de potência são denominados por Motores Fracionários de Potência (FHP). A tendência atual, com vista no controlo eletrónico, atrapalha um pouco mais esta designação, isto porque os *drivers* modernos tornaram possível a comutação sem o uso das escovas no interior do motor. Para estes novos tipos de motor, o circuito de controlo (*driver circuit*) é responsável por gerar correntes sinusoidais alternadas ou simplesmente uma aproximação das mesmas. Um exemplo será o motor de passo, que requer um circuito eletrónico de controlo, externo [2].

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Quando a bobina é alimentada, a corrente que a percorre, gera um campo magnético em torno da armadura, e os ímanes do estator atraem ou repelem o rotor magnetizado, criando assim um binário de rotação (ver Figura 1). No momento em que ocorre o alinhamento do rotor com o íman permanente, o comutador inverte o sentido da corrente na bobina fazendo com que esta seja repelida pelo estator.

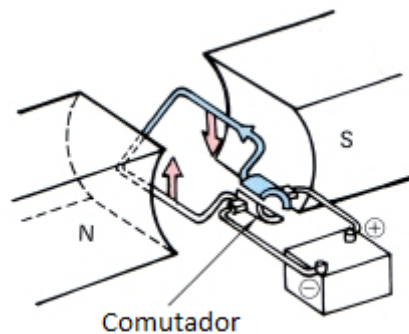


Figura 1 Princípio de funcionamento

Os constituintes de um simples motor DC com escovas são apresentados na Figura 2. Estes motores são todos constituídos pelos mesmos componentes básicos: o estator, o rotor, as escovas e o comutador.

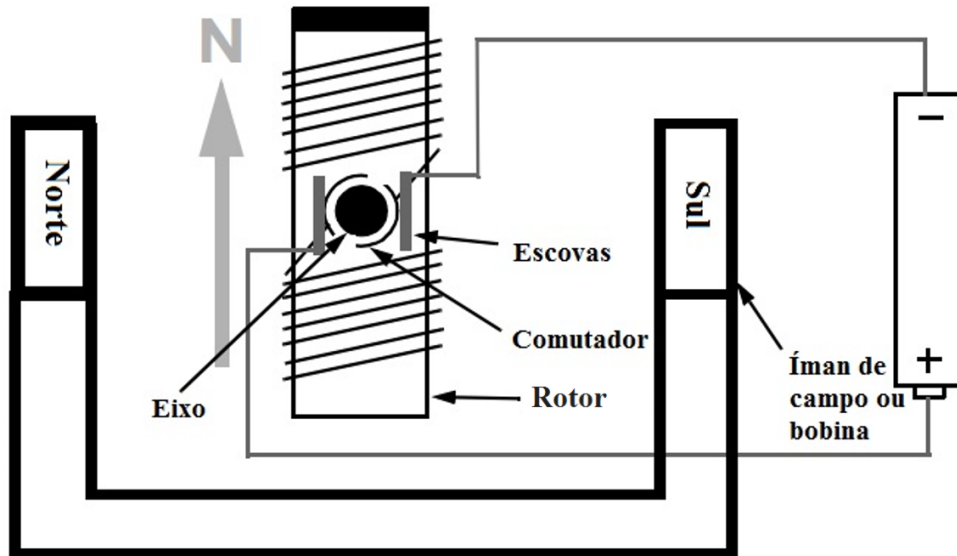


Figura 2 Simples motor DC de dois pólos [3]

2.2.1. ESTATOR

O estator gera um campo magnético estático à volta do rotor. Este campo magnético é gerado através de ímãs permanentes ou enrolamentos eletromagnéticos. Os diferentes tipos de motores DC com escovas são identificados através dos constituintes do estator ou pela forma como os enrolamentos eletromagnéticos se encontram conectados à fonte de alimentação.

2.2.2. ROTOR

O rotor, também designado por amadura, é constituído por um ou mais enrolamentos. Quando estes enrolamentos são conectados a uma fonte de alimentação é gerado um campo magnético. Os pólos, do campo magnético, do rotor são atraídos pelos pólos opostos gerados pelo estator, originando uma rotação no rotor. À medida que o motor gira, a alimentação nos enrolamentos é invertida constantemente para que os pólos magnéticos gerados pelo rotor não se alinhem com os do estator, permitindo assim uma rotação contínua. Esta inversão na alimentação é denominada por comutação.

2.2.3. ESCOVAS E COMUTADOR

Ao contrário de outros tipos de motores elétricos (ex., DC sem escovas, AC de indução), os motores DC com escovas não necessitam de um controlador para alternar a corrente dos enrolamentos. Em vez disso, a comutação dos enrolamentos deste tipo de motor é efetuada

mecanicamente. Enquanto o motor gira, as escovas deslizam sobre o comutador, entrando em contacto com diferentes segmentos do mesmo. Os segmentos são conectados a diferentes enrolamentos do rotor e, por conseguinte, é gerado um campo magnético, dinâmico, no interior do motor, desde que uma tensão seja aplicada através das escovas do motor.

2.3. TIPOS DE MOTORES DC

2.3.1. MOTOR DE EXCITAÇÃO SEPARADA

Quando a armadura de um motor DC gira dentro do campo do estator, é criada uma tensão induzida no enrolamento da armadura. Num motor de corrente contínua, este efeito é denominado por Força Contra-eletromotriz (fcm). Usando a Lei de Faraday é possível calcular a tensão gerada por esta força [4]. O circuito de excitação e o circuito da armadura são totalmente separados. A corrente de efeito de campo é fornecida a partir de uma fonte de alimentação diferente da usada para a alimentação da armadura. A Figura 3 apresenta o diagrama elétrico de um motor de excitação separada.

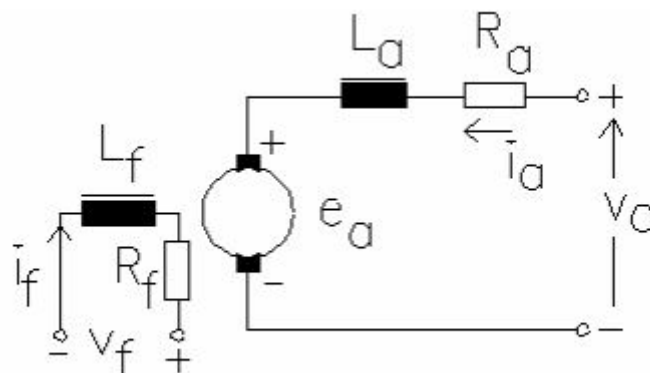


Figura 3 Motor de excitação separada [5]

2.3.2. MOTOR DE EXCITAÇÃO EM SÉRIE

Nos motores de excitação em série o circuito de excitação está diretamente ligado à fonte de alimentação e em série com a armadura do motor. Na Figura 4 é possível verificar que a corrente da armadura passa através do enrolamento de efeito de campo, sendo assim responsável pelo fluxo gerado. A velocidade do motor diminui de forma inversamente proporcional à intensidade de corrente na armadura.

Este tipo de motores é caracterizado por um torque inicial bastante elevado sendo, geralmente, usado para arranques de cargas elevadas. No entanto é necessário ter em atenção a velocidade do motor pois para baixas cargas a velocidade poderá aumentar para além de limites estáveis, podendo causar a destruição do motor.

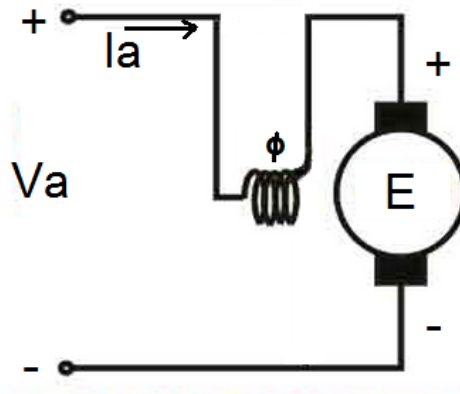


Figura 4 Motor de excitação em série

2.3.3. MOTOR DE EXCITAÇÃO EM PARALELO

Nos motores de excitação em paralelo o circuito de excitação está diretamente ligado à fonte de alimentação e em paralelo com a armadura do motor. Nesta configuração, é apenas necessário uma fonte de alimentação para ambos os circuitos, respetivamente, o circuito de armadura e o circuito de efeito de campo, pois ambos se encontram em paralelo. Como o enrolamento de efeito campo está em paralelo com o circuito da armadura, é possível utilizar o mesmo tipo de condutor como no caso da excitação independente. A velocidade deste tipo de motor poderá ser controlada mais facilmente, através da variação de tensão aplicada ao enrolamento de efeito de campo. A Figura 5 apresenta o diagrama elétrico de um motor de excitação em paralelo.

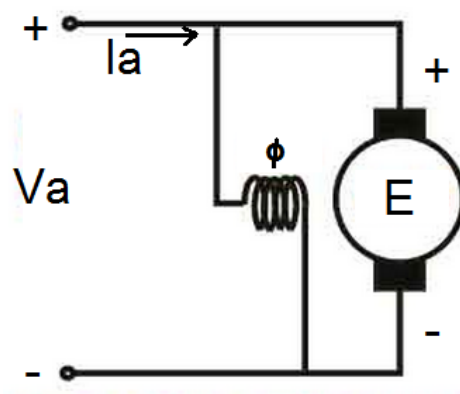


Figura 5 Motor de excitação em paralelo

2.3.4. MOTOR DE EXCITAÇÃO COMPOSTA

Relativamente às vantagens de ambos os motores, o motor de excitação em série tem uma maior capacidade de torque, enquanto o motor de excitação paralela tem uma velocidade que é mais facilmente controlável e mais estável para uma maior gama de cargas aplicadas. Estas duas vantagens podem ser incluídas num único motor, utilizando ambas as formas de excitação, em série e em paralelo, no mesmo motor, dando origem ao motor de excitação composta. A Figura 6 apresenta o diagrama elétrico de um motor de excitação composta.

O motor composto apresenta uma melhor resposta para cargas mais elevadas do que motor de excitação em paralelo, isto deve-se ao aumento da corrente através dos enrolamentos de efeito de campo em série. Devido ao enrolamento em série a intensidade do efeito de campo aumenta, proporcionando um torque e velocidade mais elevados. O enrolamento adicionado em paralelo irá limitar a velocidade máxima que o motor de excitação série tende a ultrapassar para pequenas cargas e desta forma elimina a hipótese deste se autodestruir.

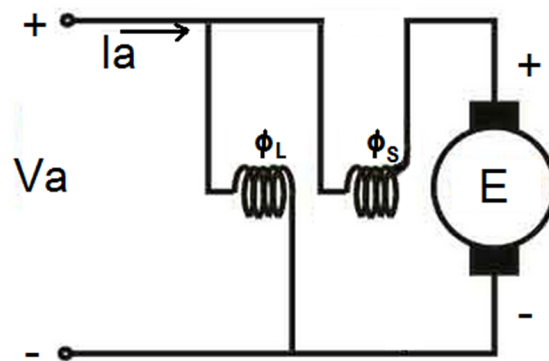


Figura 6 Motor de excitação composta

2.3.5. MOTOR DE ÍMANES PERMANENTES

O campo magnético de excitação dos motores de ímanes permanentes é gerado, como o nome indica, por ímanes permanentes, desta forma não é necessário fornecer energia para gerar este campo magnético. O fluxo magnético do estator permanece, essencialmente, constante para qualquer valor de corrente na armadura e, por consequência, a relação entre a velocidade e binário do motor é sensivelmente linear. A Figura 7 apresenta o diagrama do circuito elétrico, equivalente, do motor DC.

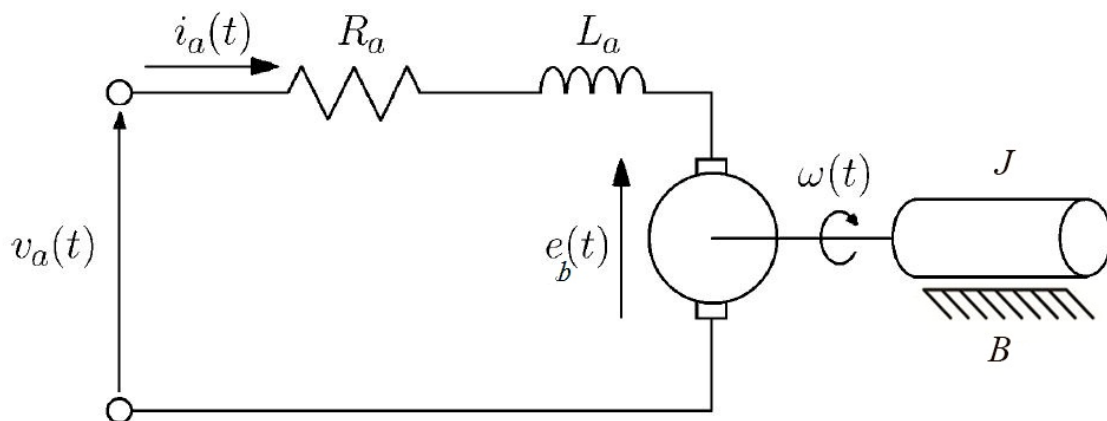


Figura 7 Diagrama do circuito elétrico do motor DC

Este tipo de motor é frequentemente usado em aplicações que requerem pequenos motores em que não é necessário um controle preciso, por exemplo, em brinquedos, secadores de cabelo, sistemas de ar condicionado e muitas outras aplicações.

2.4. EQUAÇÕES DINÂMICAS DO MOTOR DC

2.4.1. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

No controle do motor DC através da armadura, assumimos que, o efeito da desmagnetização da armadura é desprezável, o circuito magnético como sendo linear e o efeito de campo constante pois este é gerado por ímanes permanentes [6][7].

O diagrama do circuito equivalente do motor DC é ilustrado na Figura 7. Este é representado por uma queda de tensão (V_a) através dos enrolamentos do motor. O circuito equivalente dos enrolamentos do motor é representado por uma resistência (R_a) em série com uma indutância (L_a) e uma tensão induzida (e_b) que se opõe à tensão de alimentação. A tensão induzida é gerada através da rotação dos enrolamentos do motor através do campo magnético fixo gerado pelos ímanes sendo denominada por força contra-eletromotriz.

Através das leis de Kirchoff é possível obter a equação diferencial que descreve o circuito equivalente do motor:

$$V_a - V_{Ra} - V_{La} - e_b = 0 \quad (1)$$

De acordo com a lei de Ohm, a tensão através da resistência é representada como:

$$V_{Ra} = R_a I_a \quad (2)$$

A queda de tensão no indutor é proporcional à variação de corrente, através do mesmo, em relação ao tempo e pode ser escrita como:

$$V_{La} = L_a \frac{d}{dt} I_a \quad (3)$$

Por fim, a força contra-eletromotriz é diretamente proporcional à velocidade do rotor e pode ser escrita como:

$$e_b = K_e \omega \quad (4)$$

Substituindo as equações (2) e (3) na equação (1), obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$V_a - R_a I_a - L_a \frac{d}{dt} I_a - e_b = 0 \quad (5)$$

2.4.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Analisando o sistema, podemos concluir que a soma dos torques do motor deve ser nula, assim:

$$T_e - T_{\omega'} - T_{\omega} - T_c = 0 \quad (6)$$

O torque eletromagnético é proporcional à corrente através da armadura, logo:

$$T_e = K_t I_a \quad (7)$$

Sempre que o rotor do motor é sujeito a uma aceleração, a inércia deste origina um torque, assim:

$$T_{\omega'} = J \frac{d}{dt} \omega \quad (8)$$

Tendo em conta que o rotor do motor não está livre do efeito do atrito viscoso, o torque originado através deste fenómeno é dado por:

$$T_{\omega} = B \omega \quad (9)$$

Substituindo as equações (7), (8) e (9) na equação (6), obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$K_t I_a - J \frac{d}{dt} \omega - B \omega - T_c = 0 \quad (10)$$

Os símbolos utilizados nas equações dinâmicas do motor encontram-se descritos na Tabela 2.

Tabela 2 Símbolos utilizados na descrição do motor DC

Símbolo	Descrição	Unidades
V_a	Tensão aplicada aos terminais do motor	Volt (V)
I_a	Corrente na armadura	Ampére (A)
e_b	Força contra-eletromotriz	Volt
ω	Velocidade do rotor	rad/s
T_e	Torque eletromagnético do motor	Nm
T_c	Torque de carga	Nm
T_ω	Torque proporcional à velocidade do rotor	Nm
$T_{\omega'}$	Torque devido à aceleração rotacional do rotor	Nm
B	Atrito viscoso	Nm.s/rad
J	Inercia do rotor	Kg.m ²
K_t	Constante de torque	Nm/A
K_e	Constante elétrica	V.s/rad
L_a	Indutância dos enrolamentos do motor	Henry
R_a	Resistência dos enrolamentos do motor	Ohms

2.4.3. REPRESENTAÇÃO NO ESPAÇO DE ESTADOS

As equações diferenciais representadas pelas equações (5) e (10) para a corrente na armadura e velocidade angular podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} I_a = -\frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_e}{L_a} \omega + \frac{V_a}{L_a} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{K_t}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_c}{J} \quad (12)$$

Representando as equações (11) e (12) na forma de espaço de estados, obtemos:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Simbolicamente poderemos representar as equações anteriores da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt}\underline{x} = \underline{A}\underline{x} + \underline{B}\underline{u} \quad (15)$$

$$\underline{y} = \underline{C}\underline{x} + \underline{D}\underline{u} \quad (16)$$

Em que \underline{x} é o vetor de estados, \underline{u} é o vetor de entrada e \underline{y} é o vetor de saída.

2.4.4. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO DIAGRAMA DE BLOCOS

O diagrama de blocos para este sistema pode ser obtido através das equações diferenciais obtidas, apresentadas nas equações (11) e (12). Aplicando a transformada de Laplace a cada uma obtém-se:

$$sI_a(s) - I_a(0) = -\frac{R_a}{L_a}I_a(s) - \frac{K_e}{L_a}\omega(s) + \frac{V_a(s)}{L_a} \quad (17)$$

$$s\omega(s) - \omega(0) = \frac{K_t}{J}I_a(s) - \frac{B}{J}\omega(s) - \frac{T_C(s)}{J} \quad (18)$$

Considerando as condições iniciais nulas, as equações anteriores podem ser reescritas da seguinte forma:

$$I_a(s) = \frac{-K_e\omega(s) + V_a(s)}{L_a s + R_a} \quad (19)$$

$$\omega(s) = \frac{K_t I_a(s) - T_C(s)}{J s + B} \quad (20)$$

Para determinar a relação entre as saídas do sistema e a tensão de entrada é útil construir um diagrama de blocos. As equações dinâmicas acima mencionadas são usadas para construir o diagrama de blocos do motor DC. A partir do diagrama de blocos pode-se determinar a função de transferência do motor DC (ver Figura 8).

Nas várias experiências efetuadas, nos próximos capítulos, ao motor DC, não será aplicada uma carga ao motor, sendo que o torque de carga (T_C) poderá ser omitido de forma a simplificar o diagrama de blocos.

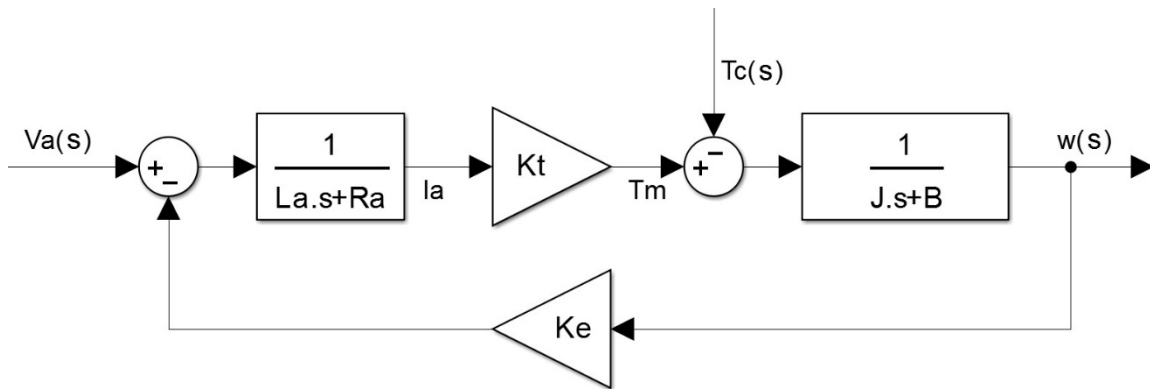


Figura 8 Diagrama de blocos do motor DC

Simplificando o diagrama de blocos representado pela Figura 8, obtém-se a seguinte a função de transferência que relaciona a tensão de entrada na armadura, $V_a(s)$, com a velocidade rotacional, $\omega(s)$:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{(JL_a)s^2 + (JR_a + BL_a)s + (K_eK_t + R_aB)} \quad (21)$$

Obtém-se também a seguinte equação que relaciona a tensão de entrada, $V_a(s)$, com a corrente $I_a(s)$, na armadura:

$$\frac{I_a(s)}{V_a(s)} = \frac{s + \frac{B}{J}}{L_a s^2 + (R_a + \frac{BL_a}{J})s + \frac{K_eK_t + R_aB}{J}} \quad (22)$$

3. *HARDWARE* E IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo descrever todo o *hardware* usado no sistema desenvolvido, a sua escolha e a sua implementação.

3.1. ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema desenvolvido é constituído pelos componentes apresentados na Figura 9, nomeadamente:

- Motor DC controlado através da armadura
- Sistema de interface (Arduíno mega)
- Circuito de alimentação
- Circuito controlador em ponte-H
- Circuito sensor de velocidade
- Circuito sensor de corrente

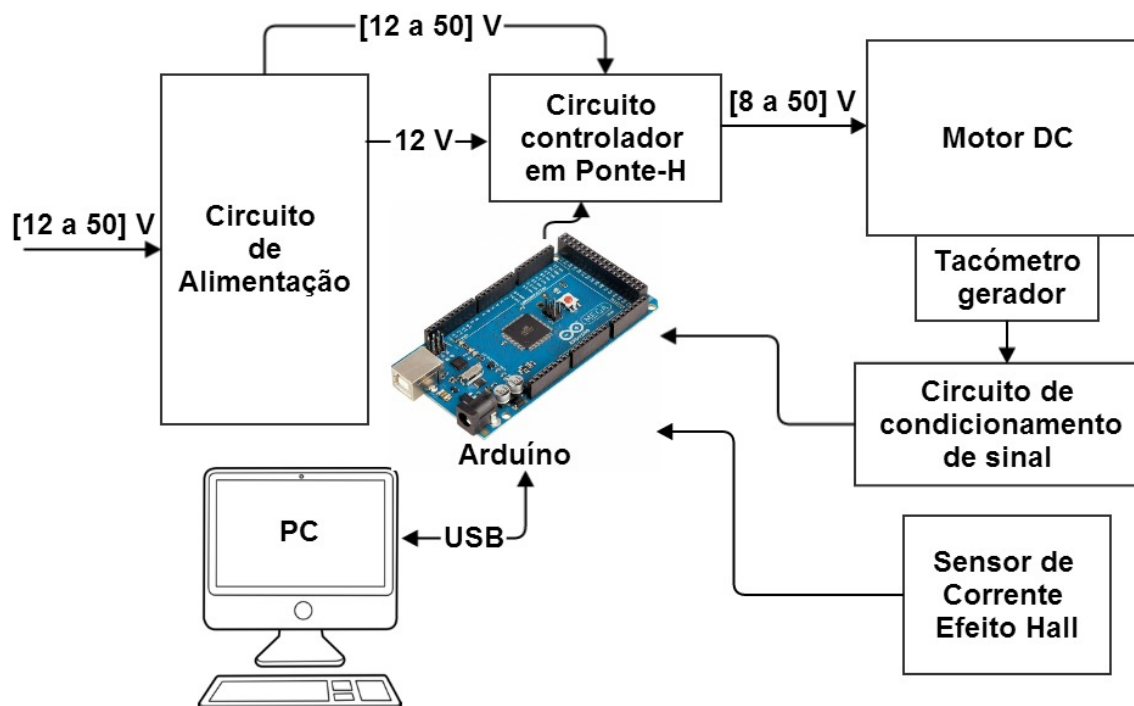


Figura 9 Arquitetura do sistema

3.2. O MOTOR DC

A especificação do *hardware* começa com a escolha de um motor DC, o ideal é encontrar um motor cujos parâmetros sejam fornecidos pelo fabricante. O motor encontrado foi o MT14202C652-R2 da Pittman, como apresentado na Figura 10. Os dados mais revelantes, gravados na placa do motor, encontram-se transcritos na Tabela 3.

Tabela 3 Especificações gravadas no motor

Modelo	MT14202C652-R2
Tensão de alimentação	30.3 VDC
Data de fabrico	10-24-94

Depois de uma pesquisa mais aprofundada, devido à idade do motor, as restantes especificações para os motores da marca Pittman do modelo MT14202 foram encontradas e apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 Especificações do motor na *datasheet*

Modelo	MT14202
Tensão de alimentação	30,3 VDC
Corrente na armadura	11,06 A
Potência contínua nominal	36 W
Velocidade do rotor em vazio	4010 rpm
Tacómetro	2 V / 1000 rpm
Atrito de Coulomb	0.0085 Nm
Atrito viscoso	$1,14e^{-5}$ Nm.s/rad
Inércia do rotor	$1,62e^{-5}$ Kg.m ²
Constante de torque	0,07 Nm/A
Constante elétrica	0,07 V.s/rad
Indutância dos enrolamentos do motor	$4,05e^{-3}$ Henry
Resistência dos enrolamentos do motor	2,74 Ohms

O motor usado é constituído por um ímã permanente, com quatro conexões, duas para a tensão de alimentação (fio preto e laranja) e outras duas para leitura do valor do tacómetro (fio azul e branco), tal como mostra a Figura 10.



Figura 10 Foto do motor utilizado

3.3. MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO

A modulação PWM (*Pulse Width modulation*) é uma forma de controlar circuitos analógicos usando as saídas digitais dos microprocessadores. Variando a razão cíclica (*duty cycle*), do sinal digital, a uma dada frequência é possível emular um sinal analógico. Este tipo de modulação tem como vantagem a sua simplicidade de implementação.

O PWM é basicamente uma onda quadrada modulada, caracterizada através da sua frequência e razão cíclica (Figura 11). A amplitude do sinal permanece constante durante o tempo (exceto nos tempos de subida e descida). O *duty cycle* é medido em percentagem e a frequência em Hertz.

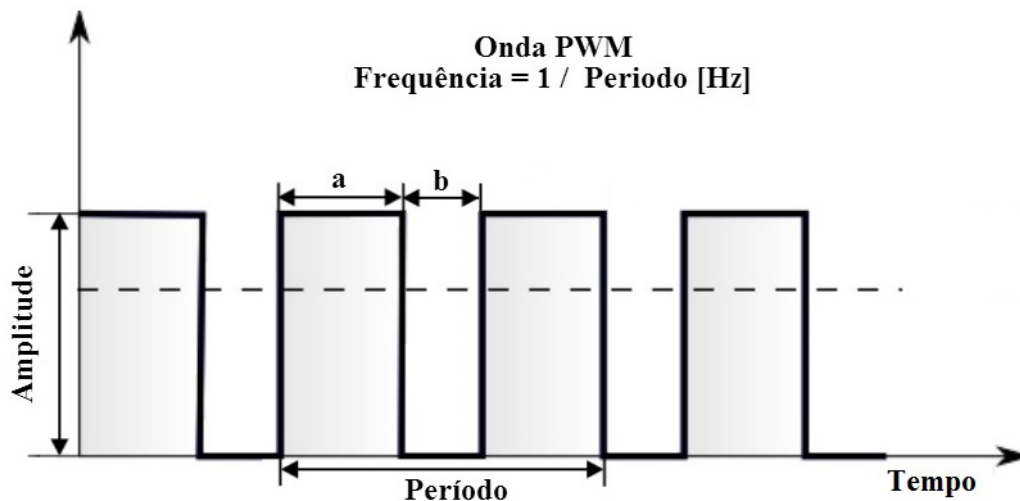


Figura 11 Onda PWM

Com recurso à Figura 11 obtém-se as seguintes equações:

$$Duty\ cycle = \frac{a}{a + b} \quad (23)$$

$$Valor\ analógico = Amplitude * Duty\ cycle \quad (24)$$

A potência total fornecida à carga é diretamente proporcional ao *duty cycle*, sendo assim, é possível alterar a potência fornecida pela fonte variando o *duty cycle*.

Este sinal PWM será gerado com recurso à plataforma Arduino e é usado para controlar a direção e potência aplicadas ao motor.

3.4. ARDUÍNO

O projeto Arduino foi criado na Itália em 2005 com o objetivo de oferecer uma plataforma de prototipagem eletrônica de baixo custo e de fácil utilização por qualquer pessoa. A plataforma Arduino é composta por uma placa e um ambiente de desenvolvimento (*software*) para a criação de projetos. O Arduino é um projeto *open-source* onde toda a documentação está disponível para qualquer pessoa. A placa de desenvolvimento do Arduino contém várias entradas e saídas, analógicas e digitais, e também uma interface série via conexão USB (*Universal Serial Bus*) para comunicação com o computador.

O Arduino Mega, apresentado na Figura 12, foi a versão da placa de desenvolvimento escolhida pois disponibiliza um grande número de entradas e saídas, o que é conveniente numa fase de desenvolvimento, considerando futuros desenvolvimentos. Esta placa utiliza um microcontrolador da Atmel, mais especificamente, o Atmega1280. Uma das grandes vantagens da plataforma Arduino é a existência do pacote de suporte para Arduino no Simulink que permite de forma simples e intuitiva a conexão da placa ao Simulink bem como a sua programação a partir deste. A Tabela 5 apresenta as principais características da placa de desenvolvimento do Arduino Mega.

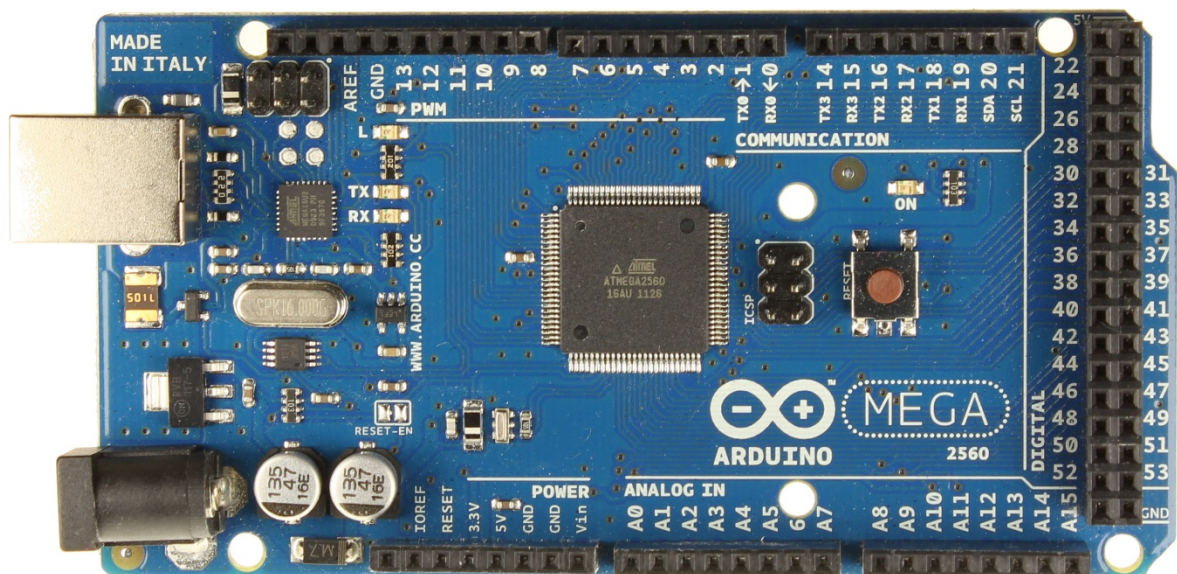


Figura 12 Placa de desenvolvimento Arduino Mega

Tabela 5 Características da placa de desenvolvimento

Microcontrolador	ATmega1280
Tensão de operação (V_{cc})	5 V
Tensão de alimentação (recomendada)	7-12 V
Tensão de alimentação (limites)	6-20 V
Pinos Digitais de E/S	54 (dos quais, 15 permitem saída em PWM)
Entradas analógicas	16
Corrente máx. contínua por pino de E/S	40 mA
Corrente contínua para o pino de 3,3 V	50 mA
Memória <i>Flash</i>	128 KB dos quais 4 KB são usados pelo <i>bootloader</i>
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade do relógio	16 MHz

A placa de desenvolvimento Arduíno Mega comunica com o Simulink através de uma conexão de USB, podendo também ser usada para a alimentação do dispositivo. A leitura dos sensores é efetuada através das entradas A0 e A4 e o controlo de velocidade e direção do motor através dos pinos 11 e 12. O *ground* do Arduíno Mega é comum a todos os componentes. Por fim, a saída 5 V é usada como referência na obtenção dos dados de velocidade (ver secção 3.6).

3.5. SENSORES

Os sensores são um componente indispensável num sistema de controlo de um motor [8]. São usados para medir corrente, posição, velocidade e sentido de rotação do motor. Os avanços tecnológicos têm vindo a melhorar a precisão e a fiabilidade dos sensores, reduzindo também o seu custo. Muitos dos sensores que estão agora disponíveis integram o sensor e o circuito de condicionamento de sinal num único dispositivo. Na maioria dos sistemas de controlo de motores, são usados vários sensores para fornecer dados sobre o motor. Estes sensores são utilizados no circuito de controlo para melhorar a fiabilidade, detetando anomalias e condições de erro que podem danificar o motor. Como exemplo, a Figura 13 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controlo de motores de corrente contínua. Abaixo é apresentado uma lista de sensores que podem ser usados para obter informação de *feedback* de um motor.

Sensores de velocidade:

- Tacómetro
- *Encoder*

Sensores de corrente:

- Resistência *shunt*
- Sensor de corrente de efeito Hall
- Transformadores de corrente

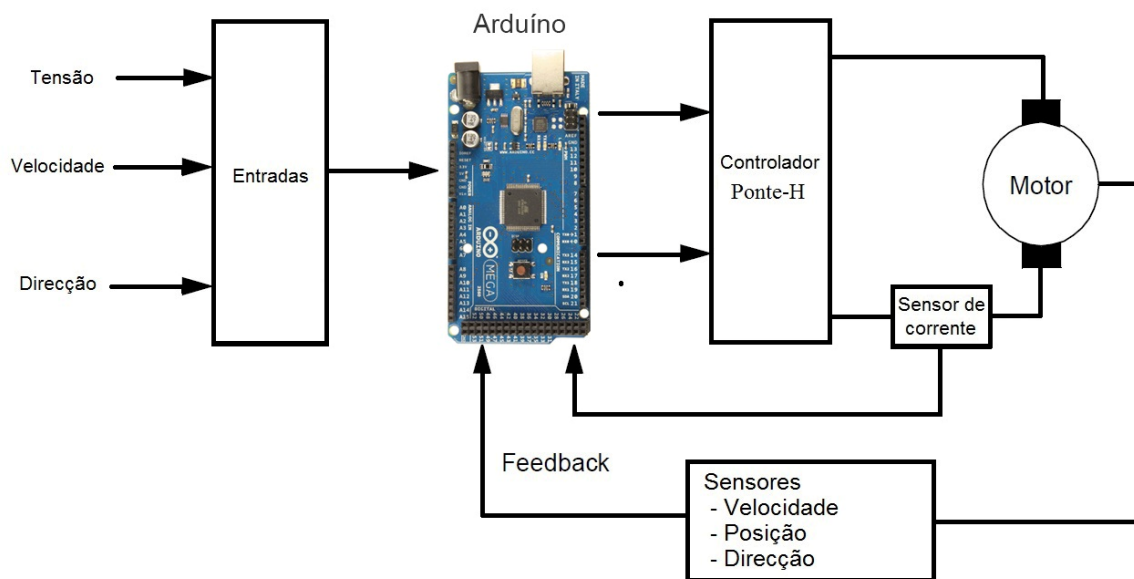


Figura 13 Sistema típico de controlo de um motor DC

3.5.1. SENSOR DE CORRENTE

As resistências *shunt* são populares entre os sensores de corrente porque permitem uma medida exata a um baixo custo. Os sensores de corrente de efeito Hall têm um uso mais abrangente, pois efetuam uma medição não-intrusiva e integram o sensor e o circuito de condicionamento de sinal num único dispositivo. Os transformadores usados para medição de corrente são muitas vezes usados, principalmente em sistemas de alta corrente ou corrente alternada.

O sistema desenvolvido está equipado com um sensor de efeito Hall, ACS711EX da allegro, como mostra a Figura 14. A Tabela 6 apresenta um conjunto de características do sensor de corrente. Este sensor é capaz de funcionar com tensões entre 3 V a 5,5 V, o que facilita a sua integração com a plataforma Arduino.

Tabela 6 Características do sensor de corrente

Característica	Valor	Unidades
Tensão lógica máxima	5,5	V
Tensão lógica mínima	3	V
Corrente de entrada	±15,5	A
Corrente de funcionamento	4	mA
Sensibilidade de saída para 3,3 V	90	mV/A
Resistência á passagem da corrente de entrada	0,6	mΩ
Isolamento elétrico	< 100	V
Temperatura de operação	[-40 , 125]	°C
Erro total de saída	±5	%

O sensor fornece uma tensão analógica linear com a corrente de entrada. A tensão de saída é de metade da tensão de alimentação para uma corrente nula e varia em 90 mV por Ampére da corrente de entrada (para uma tensão de alimentação de 3,3 V, 136 mV para 5 V), com uma corrente positiva a tensão de saída aumenta e com uma corrente negativa a tensão de saída diminui. A Figura 15 apresenta o esquemático usado para o sensor de corrente de efeito de Hall. A relação entre a corrente instantânea, I em Amperes, e tensão de saída do sensor, V_{out} em Volts, é representada pelas seguintes equações:

$$V_{out} = \frac{V_{cc}}{2} + I * \frac{V_{cc}}{36,7A} \quad (25)$$

$$I = 36,7A * \frac{V_{out}}{V_{cc}} - 18,3A \quad (26)$$

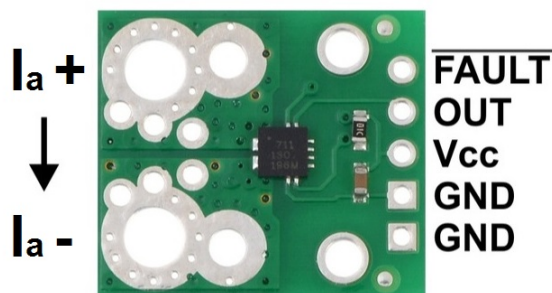


Figura 14 Sensor de corrente utilizado

A saída do sensor de corrente, OUT (Figura 14), é conectada diretamente ao pino A0 (Figura 12). A seguinte equação, com base na equação (26), é implementada no *software* para calcular a corrente no motor, sendo $Analog_{IN}A0$ o resultado do ADC depois de efetuar a leitura de tensão á saída do sensor de corrente.

$$I = 36,7A * \frac{Analog_{IN}A0}{1023} - 18,3A \quad (27)$$

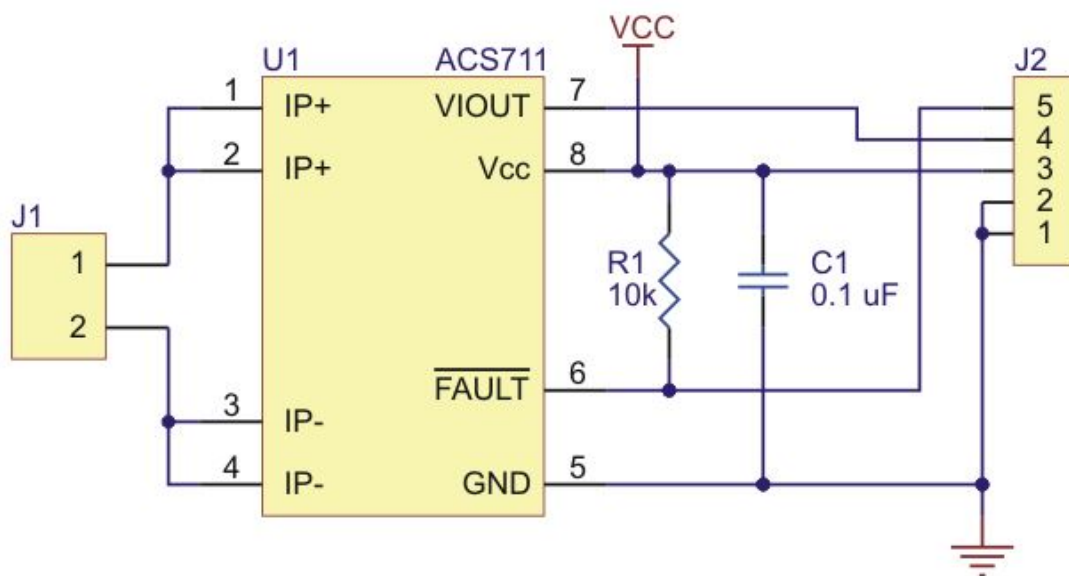


Figura 15 Esquemático do sensor de corrente de efeito Hall

3.5.2. SENSOR DE VELOCIDADE

Um *encoder* de quadratura pode ser usado para obter a velocidade, a direção e a posição do eixo de um motor. Este tipo de sensor, geralmente, oferece três saídas, das quais duas são usadas para determinar a velocidade e direção do motor e uma terceira para determinar a sua posição, tipicamente é gerado um impulso cada vez que o motor completa uma rotação [9].

Existem vários tipos de tacômetros, nomeadamente, os tacômetros com rotores dentados e tacômetros DC. Um tacômetro com rotor dentado consiste num sensor estacionário e um disco metálico dentado. Cada saliência do disco metálico dentado gera um impulso no sensor e é possível, desta forma, calcular a velocidade do motor. Um tacômetro DC é essencialmente um gerador DC que produz uma tensão de saída DC proporcional à velocidade do eixo. A polaridade da saída é determinada pela direção de rotação.

O motor usado para os testes vem equipado com um tacómetro DC, interno, o qual iremos usar para obter os dados de velocidade do motor. A relação entre a velocidade instantânea, ω em rad/s, e tensão de saída do sensor, $V_{tacómetro}$ em Volts, é representada pela seguinte equação:

$$V_{tacómetro} = \frac{2V}{1000 \text{ rpm}} * \omega * \frac{60}{2\pi} \quad (28)$$

A Figura 10, à esquerda, mostra o tacómetro inerente ao motor DC, sendo este a peça cilíndrica de menor dimensão.

3.6. CONDICIONAMENTO DE SINAL

O circuito de condicionamento de sinal processa o sinal obtido através do sensor de velocidade. A partir da equação (28) e do valor máximo da velocidade do rotor em vazio (4010 rpm em ambas as direções), é calculada a variação máxima do sinal que poderá variar entre os [-8,02 e 8,02] V, valores que impossibilitam a leitura da velocidade através do microcontrolador, cujo ADC (*Analog to Digital Converter*) apenas aceita valores entre [0 , V_{cc}] V, sendo V_{cc} a tensão de funcionamento do microcontrolador.

Para resolver este problema é utilizado um amplificador de instrumentação com ganho unitário, mais especificamente o INA128P cujo esquemático é apresentado na Figura 16. O sinal do tacómetro é aplicado à entrada 2 (V_{IN-}) do amplificador e um sinal de referência aplicado à porta 3 (V_{IN+}). O sinal de referência consiste num simples divisor de tensão, com recurso a duas resistências de 100 K Ω , aplicado à tensão de funcionamento do microcontrolador (V_{cc}), desta forma o sinal fica centrado em $\frac{V_{cc}}{2}$. Para que seja possível a leitura do sinal é necessário converter a saída do tacómetro para um intervalo entre [-2,5 , 2,5] V. O sinal do tacómetro é reduzido por um fator, no mínimo, de 3,2. É utilizado, novamente, um divisor de tensão com recurso a uma resistência de 100 K Ω e outra de 39K Ω , resultando numa redução por um fator de 3,5641.

A equação que relaciona as entradas com a saída do amplificador é a seguinte:

$$V_o = V_{IN+} - V_{IN-} \quad (29)$$

Por fim, a saída do circuito de condicionamento de sinal, é a seguinte:

$$V_o = \frac{V_{cc}}{2} - \frac{V_{tacómetro}}{3,5641} \quad (30)$$

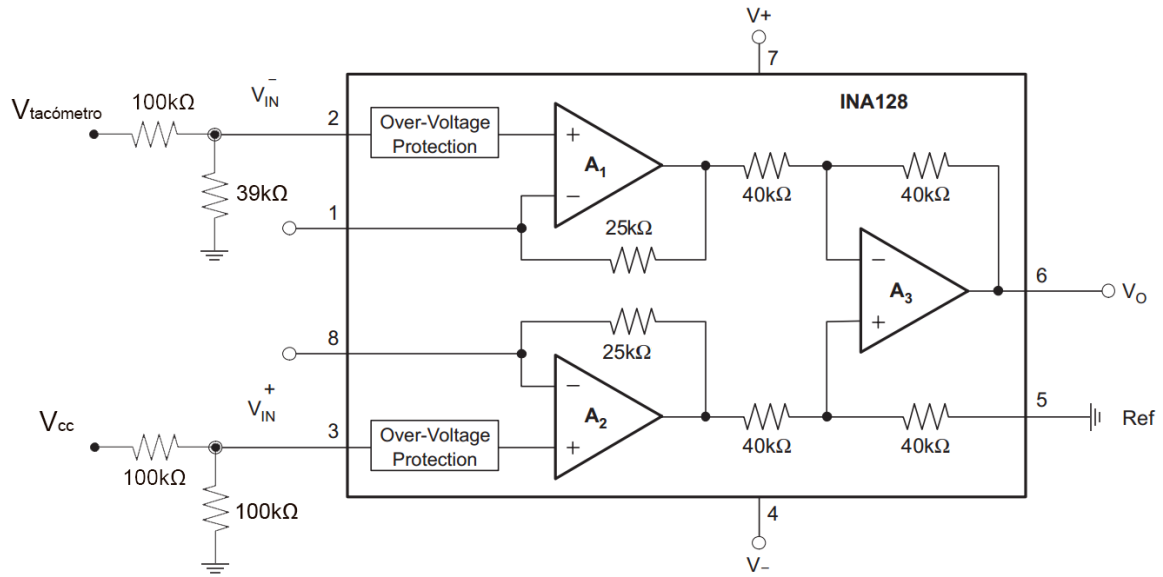


Figura 16 Esquemático do condicionamento de sinal

Resolvendo em ordem a $V_{tacómetro}$ (sinal gerado pelo tacómetro), obtém-se:

$$V_{tacómetro} = \left(\frac{V_{cc}}{2} - V_o \right) * 3,5641 \quad (31)$$

A saída do amplificador (V_o) é conectada diretamente ao pino A4 (Figura 12). A seguinte equação, com base nas equações (28) e (31), é utilizada para calcular a velocidade do motor no Simulink, sendo $Analog_{IN44}$ o resultado do ADC depois de efetuar a leitura de tensão à saída do amplificador de instrumentação.

$$\omega \left(\frac{rad}{s} \right) = \left(\frac{V_{cc}}{2} - V_{cc} * \frac{Analog_{IN44}}{1023} \right) * 3,5641 * \frac{1000}{2} * \frac{2\pi}{60} \quad (32)$$

3.7. TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Os transístores são dispositivos semicondutores que podem funcionar como interruptor eletrónico de alta velocidade ou como amplificador. A condutividade elétrica de materiais semicondutores e a funcionar na região de saturação é um pouco menor do que certos materiais considerados bons condutores (ex. cobre), e a funcionar na zona de corte não se opõem totalmente à passagem de corrente como acontece no caso dos materiais isolantes, de que são exemplo a borracha e o vidro. A resistência à passagem de corrente pode ser controlada através da tensão na Porta no caso do MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor*

Field Effect-Transistor) [6]. O MOSFET possui, normalmente, três terminais: Porta, Fonte e Dreno (ou *Gate*, *Source* e *Drain*, respetivamente). Existem dois tipos essenciais: o canal N e o canal P, que se distinguem pela polarização. A corrente fornecida a um circuito, que circulará entre a Fonte e o Dreno do MOSFET, é controlada pela tensão aplicada na Porta. A Figura 17 apresenta um corte transversal de um MOSFET.

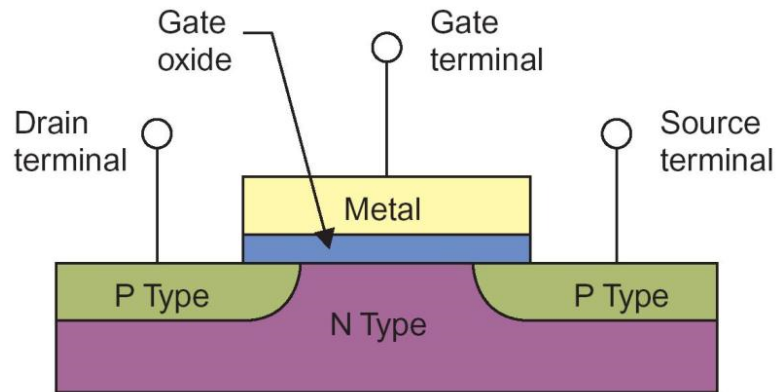


Figura 17 Corte transversal de um MOSFET [11]

Os MOSFET são, talvez, os transístores mais usados hoje em dia pois necessitam de uma corrente de entrada muito baixa, são de construção relativamente fácil e consomem o mínimo de potência. Em termos de aplicações, os MOSFET são usados em circuitos com resistência controlada por tensão e em circuitos de comutação.

3.7.1. ESCOLHA DE UM MOSFET

Escolher o MOSFET de potência que será usado para conduzir a corrente requerida pelo motor DC é uma parte bastante importante. Esta escolha depende da tensão máxima e corrente máxima do motor, da frequência de comutação, que terá de ser mais elevada que a frequência de PWM usada nos sinais de entrada e da resistência R_{DSon} (resistência entre o dreno e a fonte quando o MOSFET está saturado), que, idealmente, deverá ser o mais baixa possível. Se não for possível encontrar um MOSFET com uma corrente de Dreno suficiente, é possível conectar mais que um em paralelo de forma a aumentar o valor máximo da corrente de Dreno.

Para garantir a comutação de um MOSFET a altas velocidades é necessário ter em atenção à corrente na porta pois terá de ser elevada o suficiente. Apenas o microcontrolador em si poderá não ter a capacidade de fornecer esta intensidade de corrente e daí ser necessário o

uso de um controlador MOSFET. Esta corrente na porta está associada à frequência de comutação, ou seja, à frequência de PWM que será usada.

A relação entre a corrente e capacitância na Porta e tempos de transição é dada por:

$$dt = \frac{dV * C}{I} \quad (33)$$

Em que dt é o tempo de subida (tempo que o MOSFET leva a ficar ativado), dV é a diferença de tensão aplicada na Porta, C é a capacitância da Porta e I é a corrente de pico na Porta.

A capacitância total da Porta do MOSFET pode ser calculada através da seguinte equação em que Q_g é a carga total da Porta do MOSFET que é um valor fornecido no *datahseet*:

$$C = \frac{Q_g}{V} \quad (34)$$

Sendo assim, usando a equação (34) pode-se simplificar a equação (33) e exprimir o resultado em função da corrente na Porta, da seguinte forma:

$$I = \frac{Q_g}{dt} \quad (35)$$

Este controlador terá de ser capaz de dissipar a energia gerada por estas correntes mais elevadas. A capacidade de dissipação de energia de um controlador MOSFET é determinadas por três fatores chave, a dissipação de energia devido à carga e descarga da capacitância na Porta do MOSFET, a dissipação de energia devido à corrente de repouso (*quiescent-current*) e a dissipação de energia devido à corrente de pico (*shoot-through*) no controlador MOSFET [12].

Destes três elementos, o mais importante é a dissipação de energia devido à carga e descarga da capacitância na Porta do MOSFET, dado por:

$$P_c = C_g * V_{dd}^2 * f \quad (36)$$

Onde C_g é a carga da Porta do MOSFET, V_{dd} é a tensão de alimentação do MOSFET e f a frequência de comutação.

A Figura 18 apresenta o MOSFET escolhido, este é caracterizado pelas elevadas frequências de comutação na ordem dos MHz e pela sua baixa resistência de condução (tipicamente 7,1 mOhms). Este MOSFET tem uma tensão de rutura de 60 V e uma corrente contínua no dreno de 79 A.



Figura 18 MOSFET de potência IRF1018

3.7.2. CONTROLADOR MOSFET

Em geral, para ativar um MOSFET de potência, a Porta deve apresentar uma diferença de potencial de pelo menos 10 volts em relação à fonte (terminal do MOSFET) (e cerca de 4 volts para MOSFET de nível lógico). Este valor é um pouco superior ao parâmetro V_{gsth} (tensão para a qual o MOSFET começa a conduzir).

Uma característica dos MOSFET de potência é que estes têm uma grande capacidade elétrica parasita entre a Porta e os restantes terminais, C_{iss} . O efeito disto é que, quando um impulso chega à Porta, é necessário, primeiramente, carregar esta capacidade elétrica parasita, só depois disto acontecer é que a porta do MOSFET é carregada. Por conseguinte, o circuito do controlador MOSFET deve ser capaz de fornecer uma corrente razoável, para que esta capacidade elétrica parasita carregue o mais rápido possível. A melhor forma de alcançar estas exigências é utilizando um controlador MOSFET.

Sendo assim deveremos calcular a corrente mínima na Porta do MOSFET para que os tempos de comutação sejam atingidos sem problema.

É usada uma frequência de 62 KHz para a onda PWM, sendo que o tempo de subida escolhido para o MOSFET será pelo menos 1% do período do PWM, desta forma reduzindo significativamente o tempo em que o MOSFET se encontra na zona ativa. Substituindo na equação (35) o valor da carga total da Porta do MOSFET bem como o tempo de subida, obtém-se uma corrente de 287,5 mA. O valor total da carga na Porta é fornecido pelo fabricante através do *datasheet*.

O controlador MOSFET terá de ser capaz de fornecer no mínimo duas vezes o valor de corrente acima mencionado, isto porque os MOSFET são ativados aos pares, no circuito em ponte-H. Sendo assim o controlador MOSFET deverá de ser capaz de fornecer, pelo menos, uma corrente de 575 mA.

Existem vários controladores de MOSFET e o que melhor se adapta às necessidades do sistema é o HIP4081, *Full bridge driver*, da Intersil. Este controlador é caracterizado pelas altas frequências de comutação, e a capacidade de controlar uma ponte-H constituída por quatro MOSFET de canal N que apresentam uma baixa resistência de condução. A Figura 19 a) apresenta o dispositivo controlador e a Figura 19 b) a descrição das suas entradas e saídas.

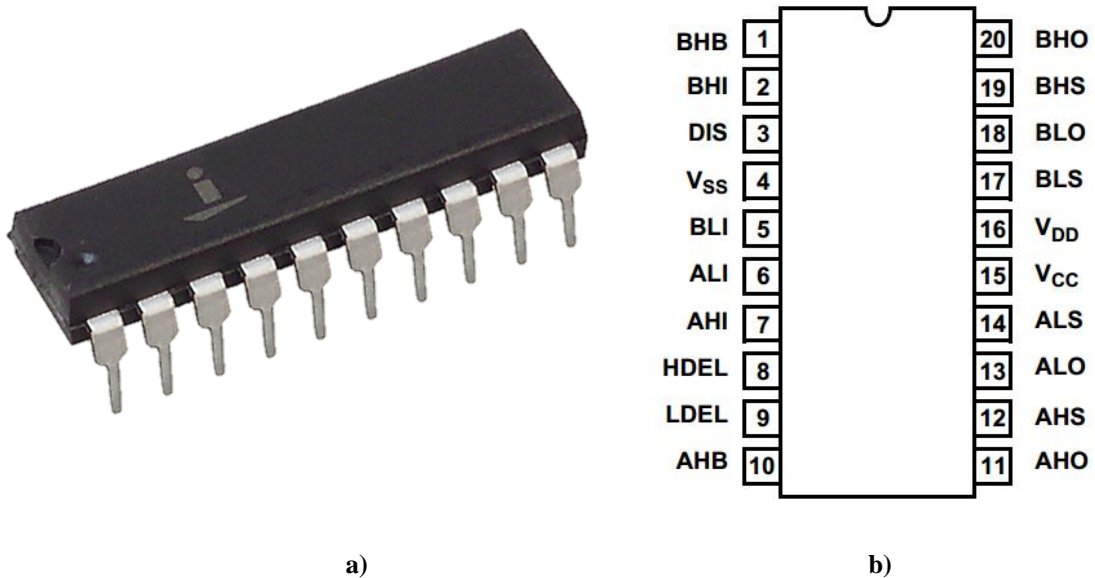


Figura 19 Controlador MOSFET: a) Dispositivo e b) Entradas e saídas

A Tabela 7 demonstra a relação entre as entradas e as saídas do controlador MOSFET.

Tabela 7 Tabela de verdade do controlador MOSFET

Entradas			Saídas	
ALI, BLI	AHI, BHI	DIS	ALO, BLO	AHO, BHO
X	X	1	0	0
1	X	0	1	0
0	1	0	0	1
0	0	0	0	0
X	X	X	0	0

3.8. PONTE-H

A Ponte H é um circuito eletrônico que permite que uma tensão seja aplicada em ambas as direções, a uma carga. A ponte-H permite também, a um sistema microcontrolado, a aplicação de potências mais elevadas, a uma carga. Na aplicação em estudo a carga utilizada é um motor de corrente contínua a ser controlado em ambas as direções com uma potência variável. A Figura 20 demonstra um simples exemplo de um circuito em ponte-H onde S1, S2, S3 e S4 representam os dispositivos MOSFET, M representa o motor DC e V_{in} a tensão de alimentação.

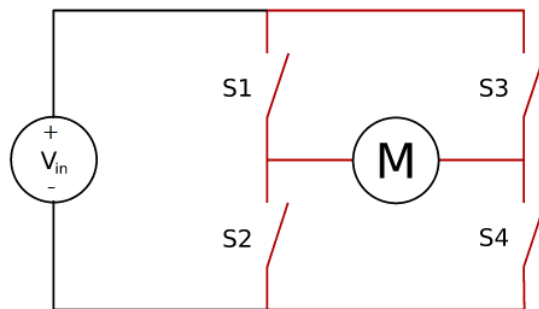


Figura 20 Circuito em ponte-H

Através da alteração do estado dos interruptores é possível ligar e desligar o motor e também alterar a sua direção, como demonstrado na Figura 21.

É de grande importância assegurar que os interruptores de cada lado da ponte-H nunca sejam ativados ao mesmo tempo pois resulta numa condição de curto-circuito e assim danificando o circuito.

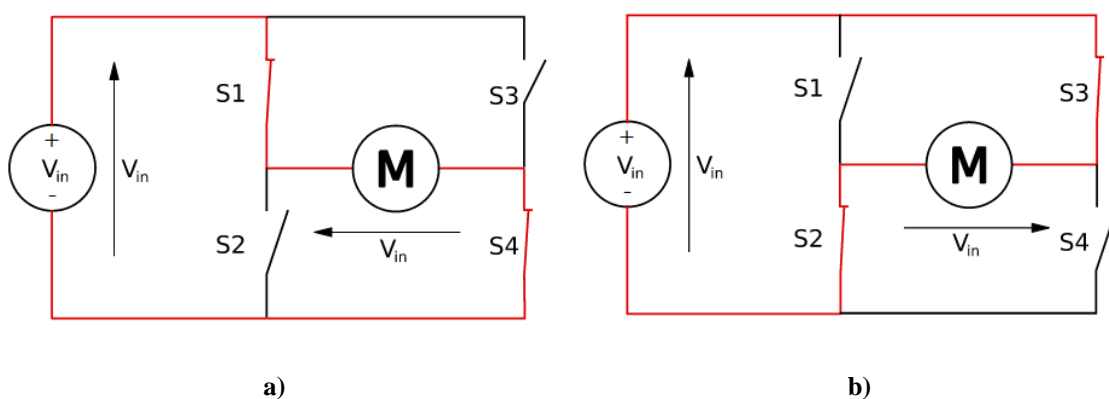


Figura 21 Circuito em ponte-H – Tensão aplicada ao motor: a) Tensão positiva e b) Tensão negativa

O controlador MOSFET escolhido tem a capacidade de controlar a ponte-H através de apenas duas entradas. A Tabela 8 descreve as saídas do motor em relação aos estados dos interruptores da ponte-H.

Tabela 8 Estados do motor em relação às entradas da ponte-H

Entradas				Saída do motor
S1	S2	S3	S4	
0	0	0	0	Desligado/Rotação livre
1	0	0	1	Sentido 1
0	1	1	0	Sentido 2
0	1	0	1	Travão
1	0	1	0	Travão

3.9. ALIMENTAÇÃO

Primeiramente apresenta-se na Tabela 9 os vários componentes do sistema e as suas necessidades em termos de alimentação.

O sistema está projetado para funcionar entre os 12 V e os 35 V, principalmente, devido aos limites de tensão do Regulador de tensão. Este regulador está encarregue de fornecer a corrente e tensão de alimentação ao Controlador MOSFET e ao circuito de condicionamento de sinal. O controlador MOSFET tem uma corrente de pico máxima de 2,5 A.

O Circuito de condicionamento de sinal está equipado com um inversor de tensão de forma a transformar os +12 V, fornecidos através do regulador de tensão, em -12 V, em termos de corrente necessária esta pode atingir um máximo de 1 mA.

Tabela 9 Requisitos de alimentação

Componente	Tensão de alimentação		Consumo de corrente	
Arduíno Mega	[6 , 12]	V	[50 , 120]	mA
Controlador MOSFET	[9,5 , 15]	V	13	mA
Motores DC	[0 , 50]	V	15,5	A
Sensor de corrente	[3,3 , 5.5]	V	4	mA
Regulador de tensão	[12 , 35]	V	8	mA
Circuito de condicionamento de sinal	[-18 , 18]	V	1	mA

O Arduíno Mega é alimentado através da conexão USB. O sensor de corrente é alimentado através do Arduíno Mega. Assim para um funcionamento dentro da tensão desejada apenas é necessário uma fonte de tensão, a mesma que irá alimentar o motor DC e idealmente com uma capacidade de corrente adicional de 2 A, para além da corrente necessária para o motor.

Utilizando um Motor com um requisito de tensão acima dos 35 V, apenas, é necessário uma fonte de alimentação extra entre os 12 V e os 35 V para alimentar o regulador de tensão com uma capacidade de corrente de 2 A.

Para os casos em que a tensão de alimentação do motor não possa ultrapassar os 9,5 V é necessário, novamente, utilizar uma fonte de alimentação extra para alimentar o regulador de tensão.

Em suma é necessário fornecer pelo menos 12 V ao regulador de tensão, uma capacidade de corrente por volta dos 2 A e uma ligação USB ao microcontrolador.

O regulador de tensão escolhido foi o LM7812CT, este é um regulador de tensão linear com uma tensão de saída fixa, de 12 V. O esquemático utilizado para o regulador de tensão encontra-se apresentado na Figura 22.

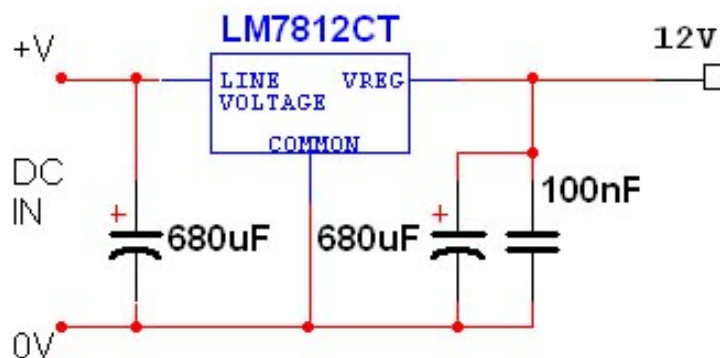


Figura 22 Esquemático do regulador de tensão

Relativamente ao inversor de tensão, o componente usado foi o Max1044 cujo valor máximo de tensão de alimentação é 10 V e para que fosse possível integrar este componente em conjunto com o regulador de tensão foi necessário adicionar 4 díodos em série com a entrada de forma a decrementar a tensão de entrada para o máximo aceitável. O Max1044 apresenta uma queda de tensão de 0,5 V por cada 10 mA de corrente na saída, este valor é mais do que suficiente. O ideal seria utilizar o LT1054 cuja tensão de alimentação máxima atinge os 15 V mas como o Max1044 estava disponível foi tornado possível a sua integração sem a

necessidade de adquirir o LT1054. A Figura 23 apresenta o esquemático base do inversor de tensão Max1044. Por fim, o Anexo A apresenta o esquemático de todo o sistema.

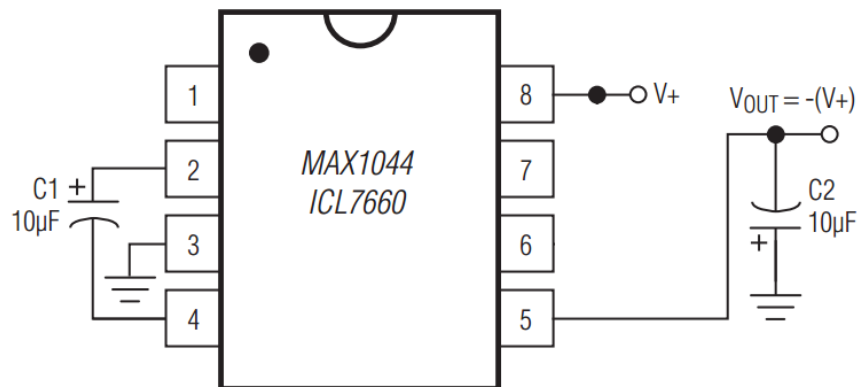


Figura 23 Esquemático base do inversor de tensão.

4. SOFTWARE

Este capítulo tem como objetivo descrever todo o *software* utilizado. Primeiramente é descrito o processo de instalação dos pacotes de suporte para *hardware*. Estes pacotes permitem a integração do *hardware* com o Matlab e Simulink. De seguida é efetuada uma descrição dos modelos desenvolvidos para a obtenção de dados experimentais do sistema. Por fim, a ferramenta de estimação de parâmetros é apresentada bem como as suas funcionalidades.

4.1. PACOTE DE SUPORTE PARA O *HARDWARE* ARDUÍNO

A MathWorks oferece suporte para alguns tipos de *hardware*, tais como, o Arduíno, Raspberry Pi, webcams, entre outros. Estes pacotes de *hardware* estão disponíveis para *download* e instalação através do *software* MATLAB. Para mais detalhes sobre todos os pacotes de suporte disponíveis, é possível consultar o catálogo de suporte de *hardware* disponível no *software* MATLAB.

A instalação do pacote de suporte é um passo indispensável. No Anexo C apresenta-se um guia para a sua instalação e utilização. Este guia refere-se à versão R2014a do MATLAB sendo que em outras versões, especialmente as mais antigas, o interface poderá diferir um pouco.

4.2. SIMULINK

4.2.1. OBTENÇÃO DE DADOS

Nesta secção apresentam-se os modelos criados no Simulink que permitem a comunicação do *software* com o *hardware*. São também apresentadas as configurações usadas e os diagramas de blocos bem como as suas funções. A informação aqui apresentada poderia ser colocada em anexo mas considerou-se que dada a sua importância na compreensão de como os dados são obtidos deveria permanecer no texto principal.

Para que o *hardware* comunique com o *software* é necessário a criação de dois modelos. O primeiro corre na placa de desenvolvimento e tem como objetivos, ler os dados de tensão via porta série e aplicar a tensão pretendida ao motor, efetua também a leitura dos sensores e envia os resultados via porta série. A Figura 24 apresenta o modelo que corre na placa de desenvolvimento.

Como se pode observar este é constituído por duas partes. A primeira recebe os dados de tensão enviados pelo *software* Simulink através do bloco 'Serial Read'. Estes dados são posteriormente processados de forma a gerar duas saídas de PWM conectadas ao controlador MOSFET. Estes dois sinais de PWM tem como função controlar a direção e potência fornecidas ao motor. De seguida, a Tabela 10 apresenta os estados da ponte-H relativamente aos sinais aplicados na entrada do controlador MOSFET.

Tabela 10 Estados do motor relativamente aos sinais PWM aplicados

Entradas		Saídas do motor
PWM A	PWM B	
100%	100%	Travão
X	0	Sentido 1
0	X	Sentido 2
0	0	Travão

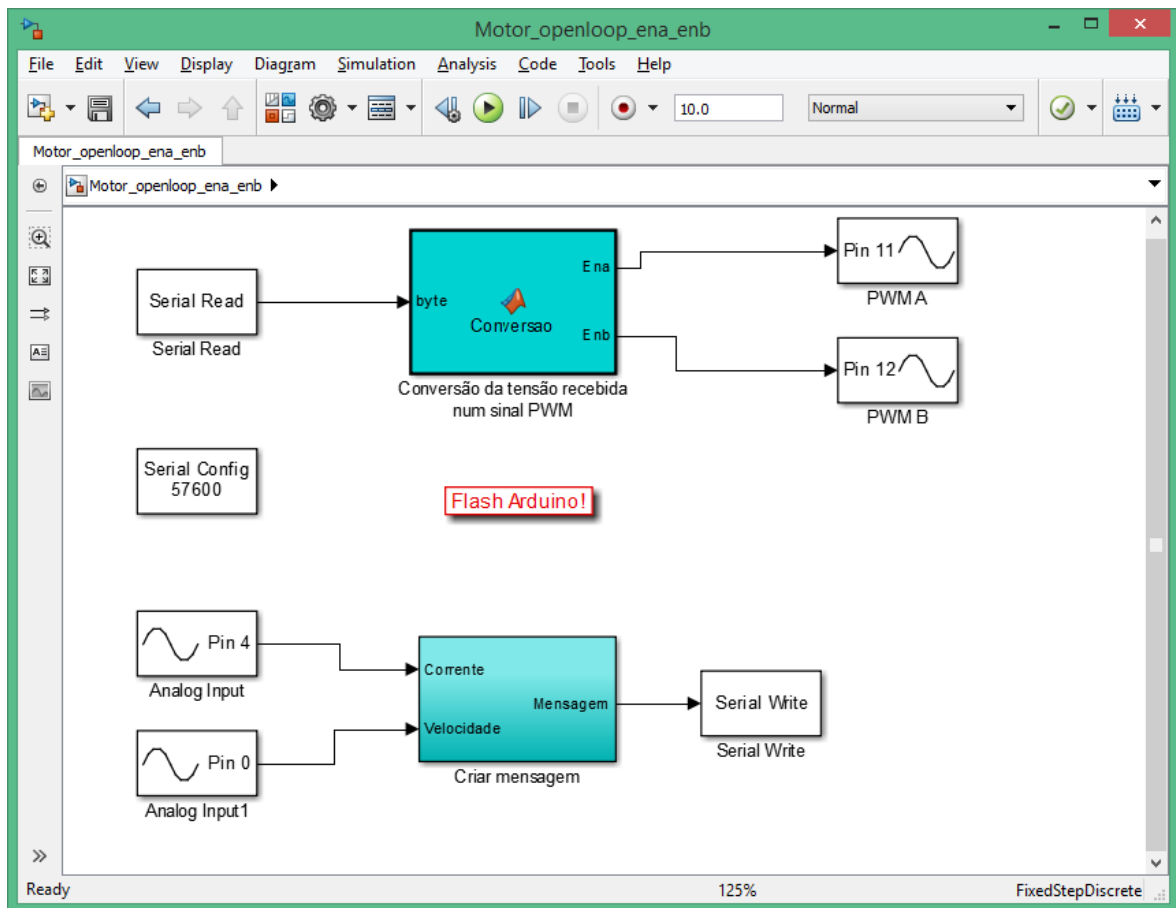
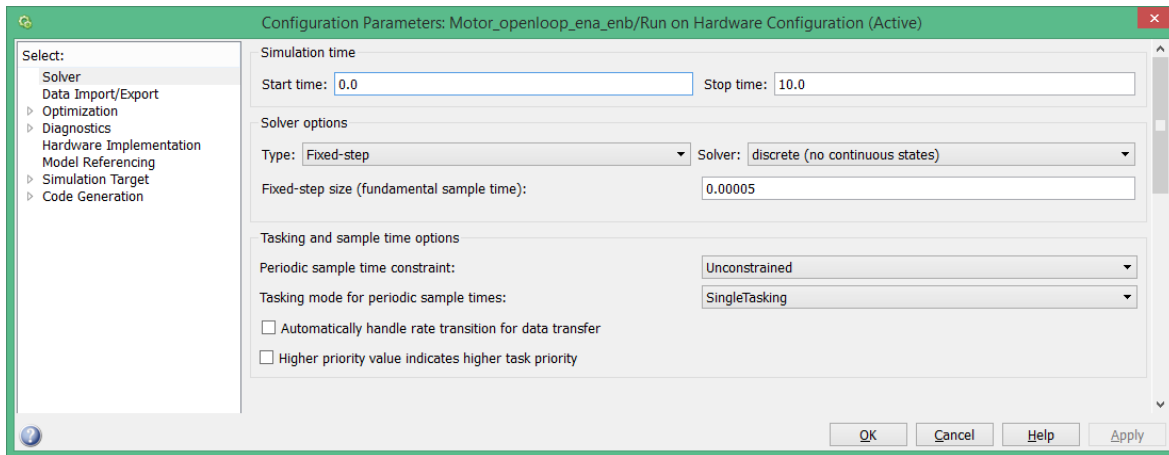
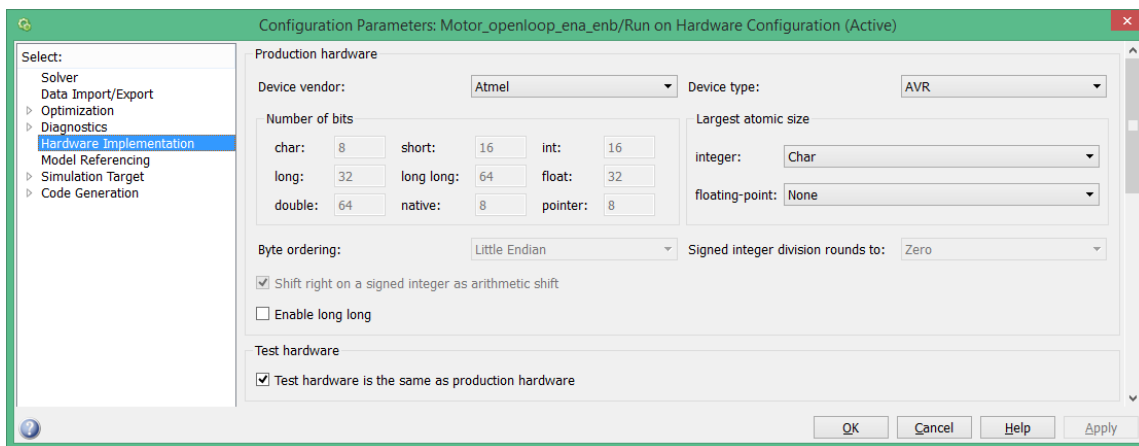


Figura 24 Modelo a correr na placa de desenvolvimento

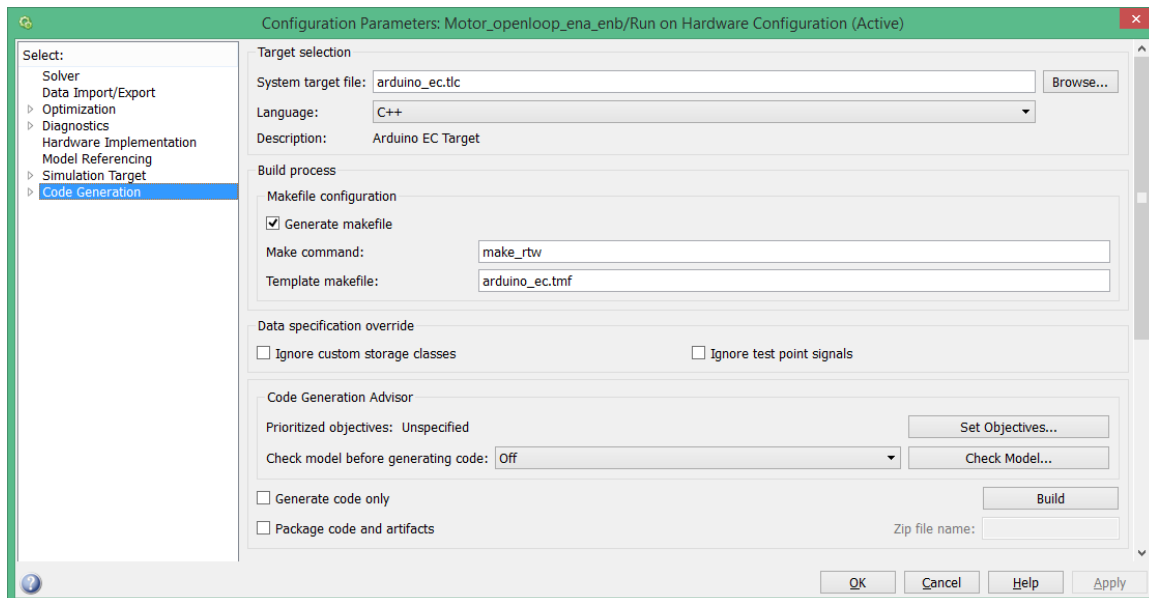
A segunda parte lê os valores fornecidos pelos sensores, converte os dados numa única mensagem e envia a mesma através da porta série. Os resultados são obtidos através de conversões de 10bits do conversor analógico digital. Os valores dos sensores são obtidos a uma frequência de 100 amostras por segundo. Este é o valor máximo conseguido pois o uso de frequências superiores causa um atraso no processamento de dados da parte do computador que aumenta cada vez mais, quebrando assim o sincronismo. A Figura 25 apresenta as definições aplicadas ao motor, respetivamente, *Solver*, *Hardware Implementation* e *Code Generation*.



a)



b)



c)

Figura 25 Definições do modelo aplicado ao Arduino: a) Solver, b) *Hardware Implementation* e c) *Code Generation*.

O segundo modelo corre no computador e envia e recebe dados através da porta série, processa-os e apresenta uma representação gráfica em tempo real dos dados obtidos. Estes dados referem-se à tensão aplicada ao motor, que é enviada por este modelo para a placa de desenvolvimento, e aos dados de velocidade e corrente que são recebidos e processados de forma adequada.

A Figura 26 demonstra o primeiro nível do modelo. Este é o nível principal, sendo composto por um construtor de sinal (*signal builder*) onde podemos criar e guardar sinais personalizados que são usados para excitar o motor. Todos os sinais criados no construtor de sinal devem variar entre -1 e 1, sendo que o valor 1 aplica a tensão máxima no sentido 1, e -1 aplica a tensão máxima no sentido 2. Estes sinais são aplicados ao bloco ‘Motor’ onde é necessário introduzir o valor da tensão que é aplicada ao motor. Este valor corresponde ao valor de tensão da fonte de alimentação usada. O bloco ‘Motor’ retorna dados obtidos da velocidade e corrente no motor.

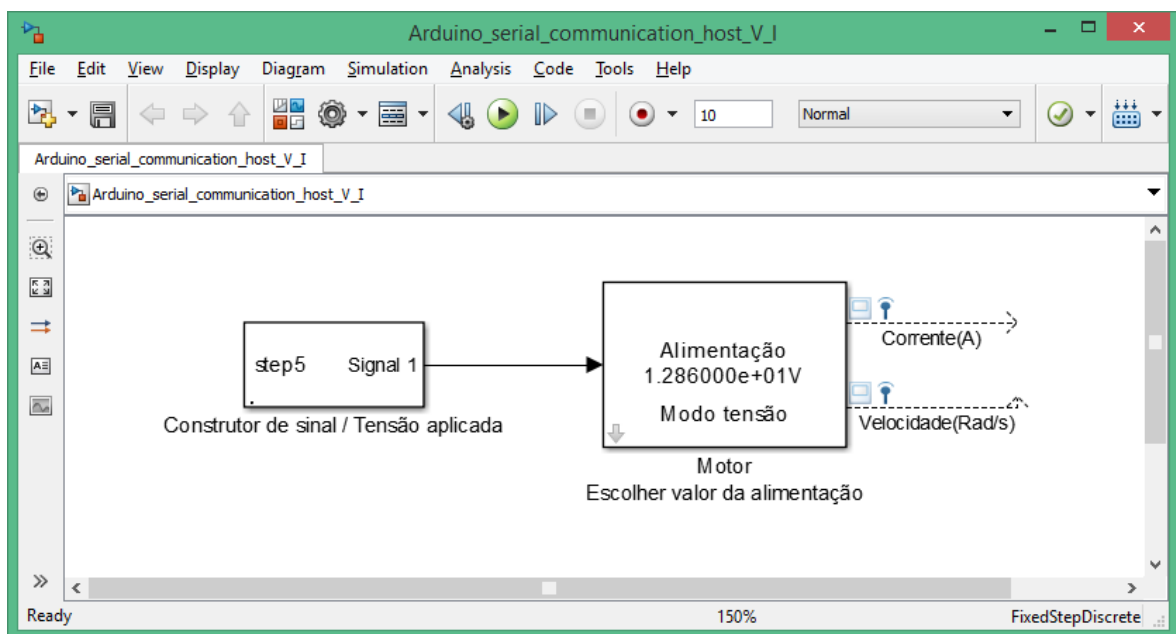


Figura 26 Modelo a correr no Simulink – nível 1

De seguida a Figura 27 apresenta o bloco ‘Motor’ expandido. O primeiro ganho multiplica o sinal proveniente do construtor de sinal e multiplica-o pelo valor de tensão de alimentação que é aplicado ao motor. Desta forma obtém-se o sinal de tensão aplicado ao motor e o mesmo é guardado pela simulação. O bloco ‘Tensão para uint8’ converte o sinal de tensão para uma gama que varia entre os 0 e 255 possibilitando assim o envio do sinal na forma de 8 bits através da porta série. Por fim o bloco ‘interface Serial Motor’ está encarregue de

enviar o sinal de tensão via série e receber os respectivos sinais de velocidade e corrente, enviados pelo microcontrolador.

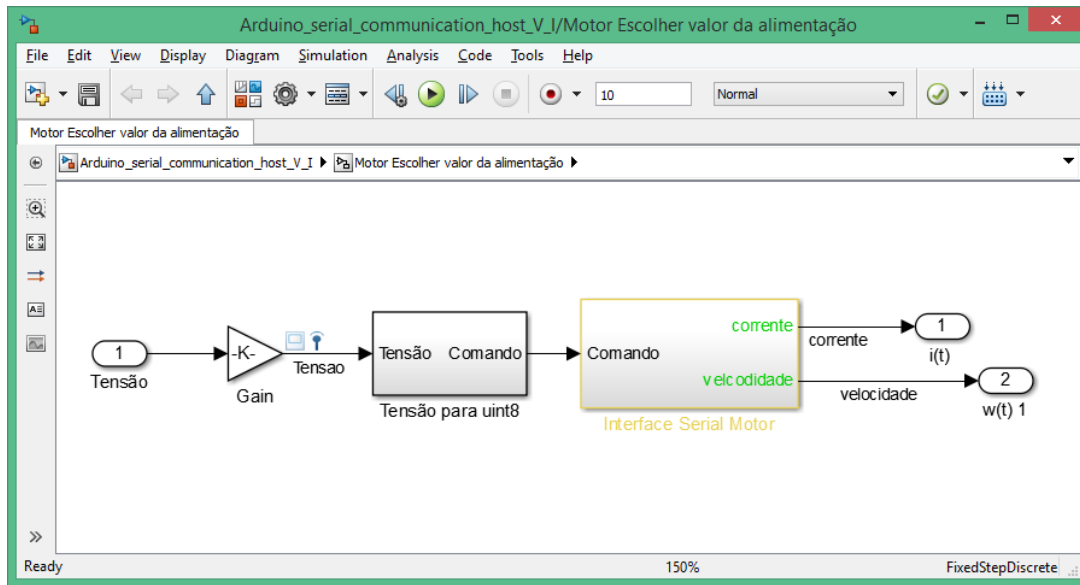


Figura 27 Modelo a correr no Simulink – nível 2

A Figura 28 apresenta as propriedades do bloco ‘Interface Serial Motor’ que devem ser aplicadas para que este funcione corretamente.

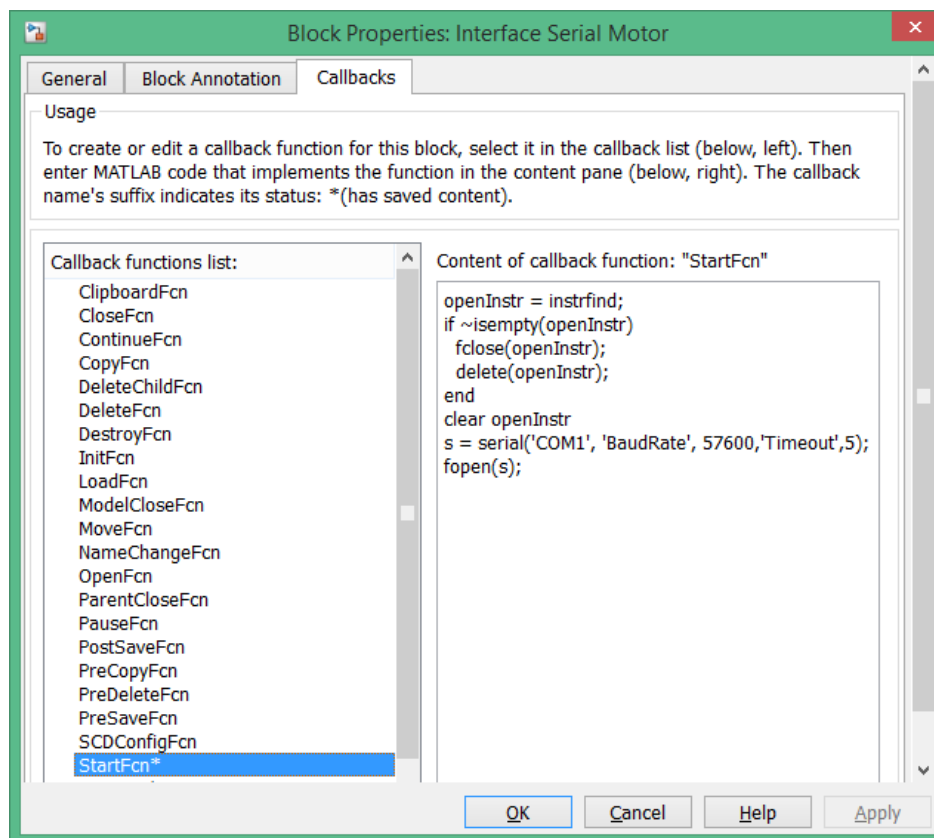


Figura 28 Propriedades do bloco Interface Serial Motor

De seguida a Figura 29 apresenta o bloco ‘Interface Serial Motor’ expandido. Este é constituído por um bloco denominado ‘Real-Time Pacer’ que está encarregue de sincronizar a simulação para correr em tempo real. Desta forma os blocos são executados no seu devido tempo e não mais rapidamente. A função ‘SerialFcn’ está encarregue de enviar e receber os dados via série. Os blocos ‘10-bit para Corrente’ e ‘10-bit para velocidade’ tem a função de converter o resultado da leitura do conversor analógico/digital para valores reais de velocidade e corrente, através das suas respetivas fórmulas.

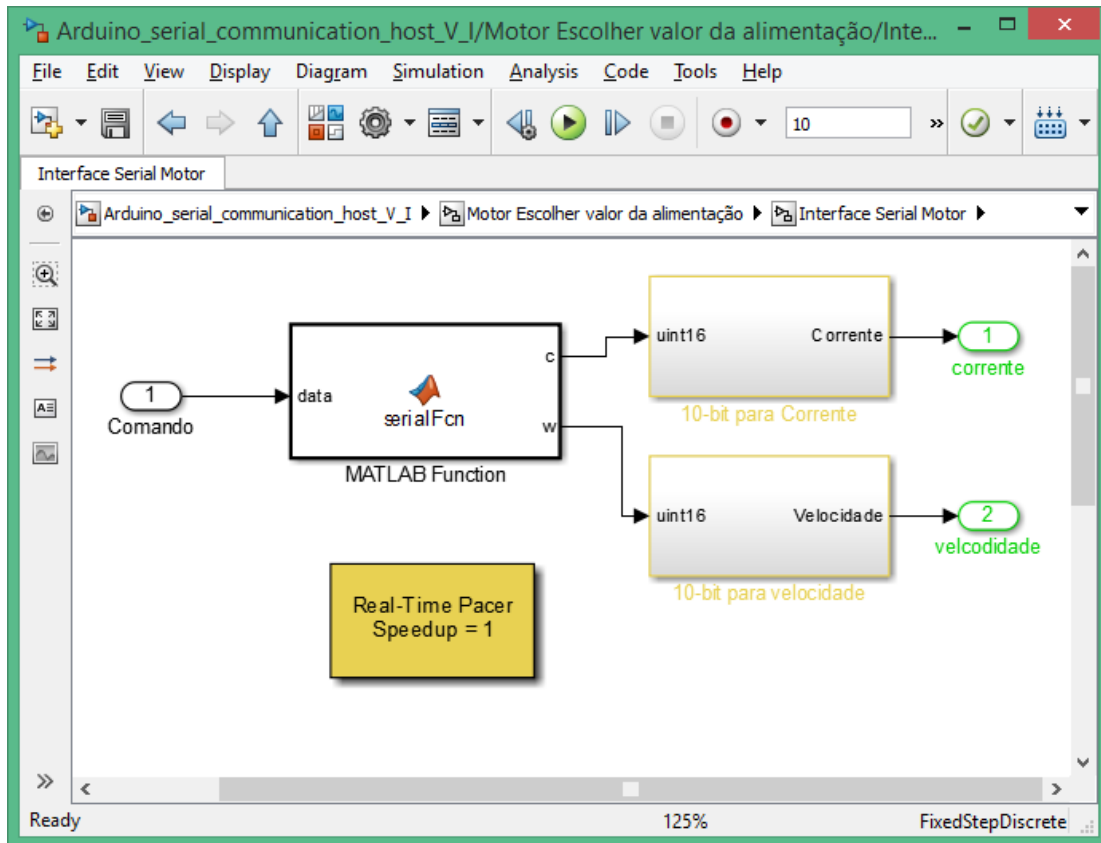


Figura 29 Modelo a correr no Simulink – nível 3

Depois de escolher um sinal, basta correr a simulação. No final da simulação é gerado uma variável denominada ‘logout’ no ambiente de trabalho MATLAB. Esta variável contém os resultados da simulação, mais especificamente, o sinal de tensão enviado e as respostas de velocidade e corrente.

Por fim, foi criado um *script* que transforma esta variável num vetor de 4 colunas contendo os dados da simulação, respetivamente e por ordem, sinal aplicado, valores de velocidade, valores de corrente, e tempo. Cada experiência é representada por um destes vetores que torna a sua aplicação, com a ferramenta de estimação, mais simples.

4.2.2. DESCRIÇÃO DO MODELO LINEAR DO MOTOR DC

O modelo do motor DC foi desenvolvido no Simulink, como discutido no capítulo 2. O modelo consiste numa porta de entrada correspondente ao sinal aplicado à armadura do motor DC e duas portas de saída correspondendo à velocidade do rotor do motor e a corrente na armadura. O modelo é apresentado na Figura 30.

Assumimos que as perdas eletromagnéticas são pequenas o suficiente para serem ignoradas. Isto implica que a potência mecânica seja igual à potência elétrica dissipada pela força contra-eletromotriz na armadura do motor. Sendo assim, a partir das equações (4) e (7) obtém-se a seguinte relação:

$$T_e \omega = e_b I \quad (37)$$

$$K_t I \omega = K_e \omega I \leftrightarrow K_t = K_e \quad (38)$$

A partir da equação (38), pode-se então simplificar o número de variáveis a serem estimadas.

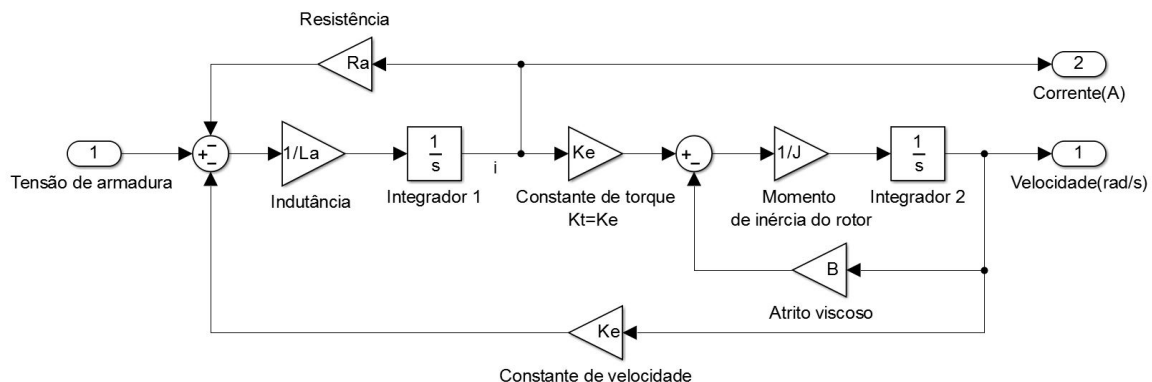


Figura 30 Modelo no Simulink do motor DC

Os valores dos parâmetros do motor são, normalmente, fornecidos pelos fabricantes mas não deixam de ser apenas estimativas. Com o uso e envelhecimentos do material estes valores tendem a variar, tornando o modelo do motor impreciso. Pretende-se, então, estimar estes parâmetros com a maior precisão possível para que o nosso modelo melhor se aproxime à representação exata do sistema real.

Quando se aplica uma tensão à entrada do motor, o eixo do motor gira em resposta. No entanto, se os parâmetros do modelo não correspondem aos parâmetros do motor, a resposta

do modelo, por sua vez, não corresponde à resposta do sistema real. O *software* de Estimação de Parâmetros do Simulink desempenha um papel fundamental nesta tarefa de estimação.

4.3. FERRAMENTA DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Esta ferramenta, incluída no Simulink, é usada para a identificação dos parâmetros do motor de corrente contínua. A Figura 31 apresenta a janela principal desta ferramenta. A ferramenta de identificação de parâmetros do Simulink é usada para estimar e calibrar parâmetros de modelos com base em dados experimentais. Esta ferramenta suporta os seguintes tipos de estimativas:

- *Transient Estimation*: Estima os parâmetros comparando dados obtidos através do modelo com dados experimentais para uma dada entrada.
- *Initial Condition Estimation*: Estima as condições iniciais do sistema usando dados experimentais.
- *Adaptive Lookup Tables*: Estima dados que variam com o tempo, durante a simulação.

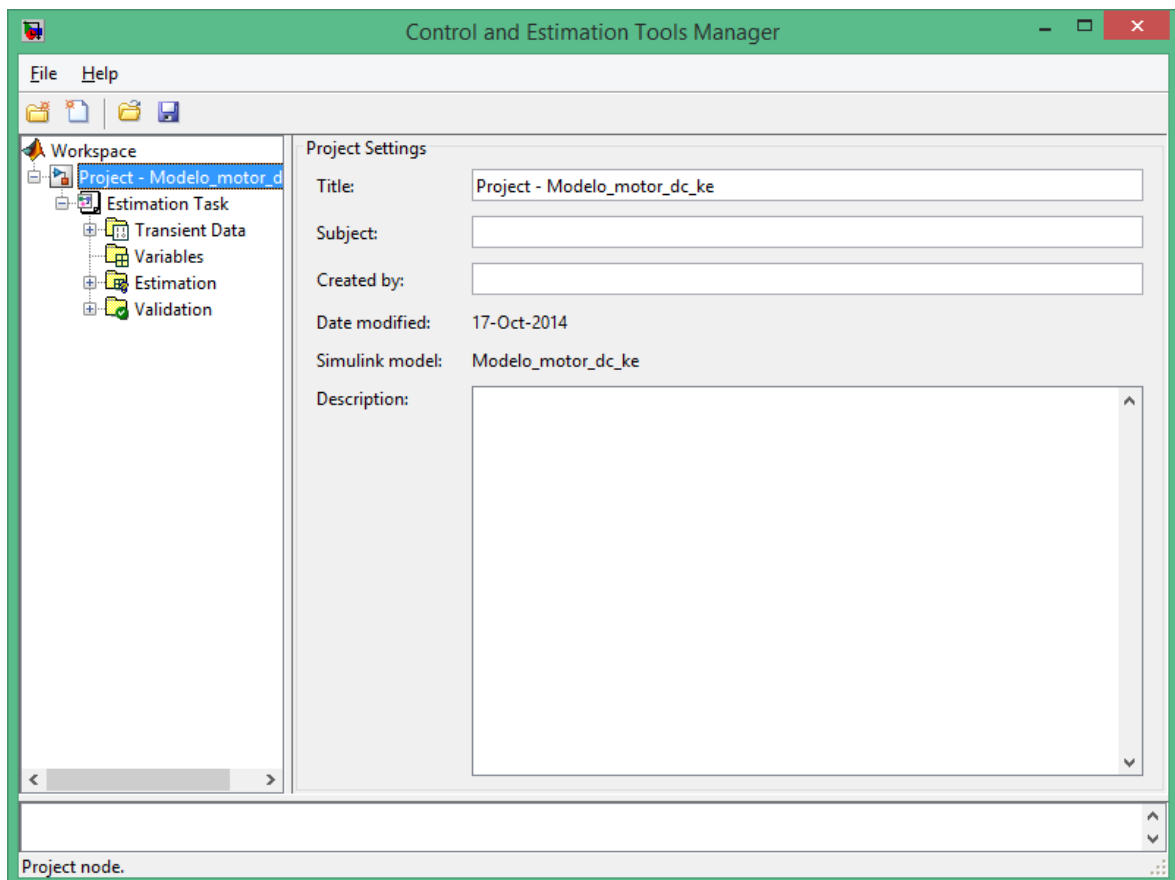


Figura 31 Janela principal da ferramenta de estimação

4.3.1. COMO FUNCIONA A FERRAMENTA DE ESTIMAÇÃO

A ferramenta de Estimação de Parâmetros do Simulink compara dados experimentais obtidos de um sistema real com dados obtidos através de um modelo do Simulink. Usando técnicas de otimização, a ferramenta estima os parâmetros e opcionalmente os estados iniciais do sistema de forma a minimizar uma função custo. A função custo calcula o erro a partir do método dos Mínimos Quadrados Não Lineares entre os dados experimentais e os dados da simulação.

De seguida apresenta-se um conjunto de passos que resumem o procedimento de configuração e execução de um processo de estimação:

- Com o modelo do Simulink aberto, selecionar *Analisis* → *Parameter Estimation*.
- Importar os dados experimentais obtidos do sistema real, dados de entrada e de saída do sistema.
- Selecionar os parâmetros e opcionalmente condições iniciais a estimar bem como os limites dos mesmos se necessário.
- Configurar as opções da estimação, tais como, tolerâncias, métodos e algoritmos.
- Dar início ao processo de estimação.
- Validar os resultados através de representações gráficas dos novos dados com os dados experimentais, através dos valores da função custo ou verificando se os valores dos parâmetros obtidos se encontram dentro de intervalos aceitáveis para os mesmos.

4.3.2. MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO LINEARES

O Método dos Mínimos Quadrados Não Lineares com o objetivo de estimar os parâmetros de um sistema real é uma importante etapa no estudo do mesmo. Este método pesquisa numericamente os parâmetros que resultam numa melhor aproximação entre as respostas simuladas e as respostas obtidas experimentalmente através do algoritmo Trust-Region-Reflective [13].

O método dos mínimos quadrados procura um vetor x^* que minimize a expressão:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i(x)^2 = \frac{1}{2} \|f(x)\|^2 = \frac{1}{2} f(x)^T f(x) \quad (39)$$

No caso de o método ser aplicado a uma aproximação de um modelo matemático y através de m pontos experimentais:

$$(t_1, y_1), \quad (t_2, y_2), \quad \dots \quad (t_m, y_m) \quad (40)$$

A expressão $F(x)$ representa o erro total $\|e(x)\|^2$ resultante da aproximação.

$$F(x) = \|e(x)\|^2 = \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (41)$$

Consequentemente a função $f(x)$ será:

$$f_i = y_i - y(t_i) \quad (42)$$

A aproximação de funções pelo método dos mínimos quadrados é executada através de um processo iterativo. A partir de um vetor inicial x_0 , o método produz uma série de vetores x_1, x_2, \dots que devem convergir para x^* . A maioria dos métodos utilizados, para convergirem, utilizam a seguinte condição, em que:

$$F(x_{k+1}) < F(x_k) \quad (43)$$

É importante salientar que no caso de $F(x)$ possuir diversos mínimos, o resultado x^* irá depender do valor inicial de x_0 . Desta forma desconhece-se qual dos mínimos será encontrado e assim, o vetor x^* obtido não é obrigatoriamente o melhor resultado.

4.3.3. PROCESSO DE ESTIMAÇÃO

O processo de estimação de parâmetros consiste num número de passos bem definido:

- Escolher o sinal a aplicar ao sistema real.
- Recolher dados do sistema real.
- Especificar os parâmetros a serem estimados (incluindo limites para os mesmos e/ou estados iniciais).
- Configurar as opções da nossa estimação bem como o algoritmo de estimação a ser usado.
- Validar os resultados obtidos, comparando-os com dados reais do sistema.

A Estimação de Parâmetros do Simulink fornece uma interface gráfica (GUI) simplificando cada passo do processo de estimação e ainda a opção para guardar o projeto para um uso futuro (ver Figura 31). É possível iniciar a ferramenta a partir do menu *Analysis* no modelo do Simulink. Automaticamente é criado um projeto de estimação padrão.

O primeiro passo no projeto de estimação consiste em importar os dados experimentais do sistema real, ou seja, do motor DC. Estes dados correspondem à tensão aplicada à armadura

do motor, à velocidade do rotor e à corrente que percorre a armadura. A Estimação de Parâmetros do Simulink fornece ferramentas de pré-processamento tais como, filtragem de ruído, exclusão de dados e remoção de *offsets* de forma a preparar os dados a usar na estimação. Depois de importar os dados é possível apresentá-los graficamente de forma a confirmar os mesmos. Para importar dados para a ferramenta clica-se na pasta *Transient Data* e posteriormente no botão *New*. Pode-se verificar este processo através da Figura 32, onde já foram adicionados vários sinais. Para adicionar um sinal basta preencher os campos nos menus *Input Data* e *Output Data*.

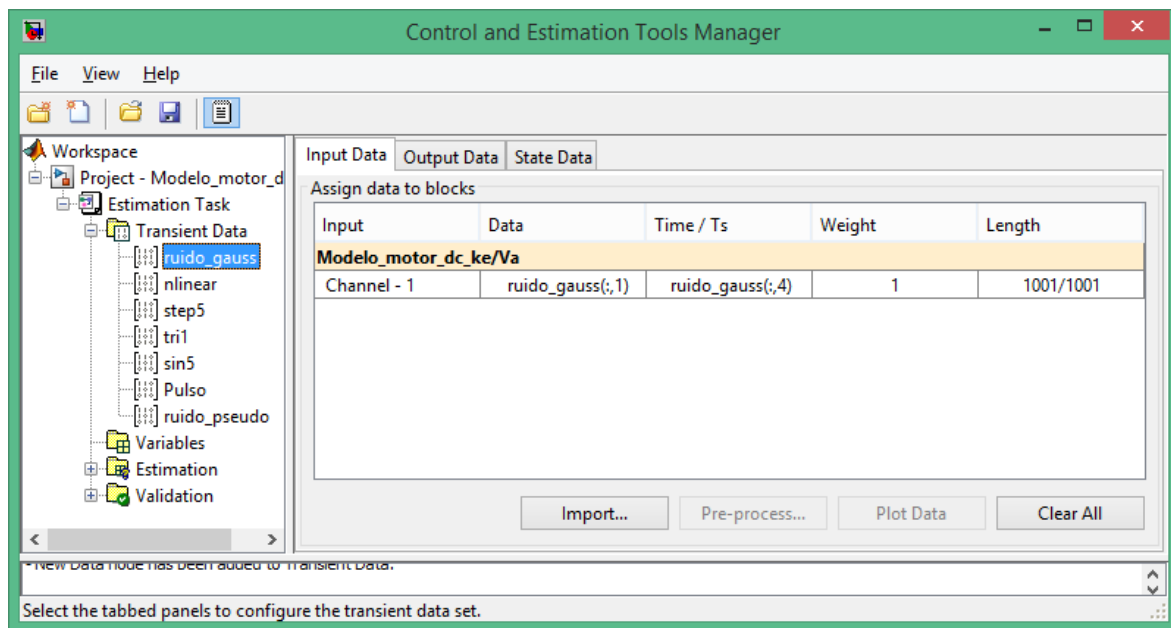


Figura 32 Menu *Transient Data*

De seguida são seleccionados os parâmetros cujos valores se quer estimar. A ferramenta apresenta, automaticamente, todos os parâmetros (variáveis) existentes no modelo e permite a sua escolha para o processo de estimação. Tendo todos os parâmetros necessários, seleccionados, define-se as estimativas iniciais bem como os limites máximos e mínimos para estes valores, como apresentado na Figura 33.

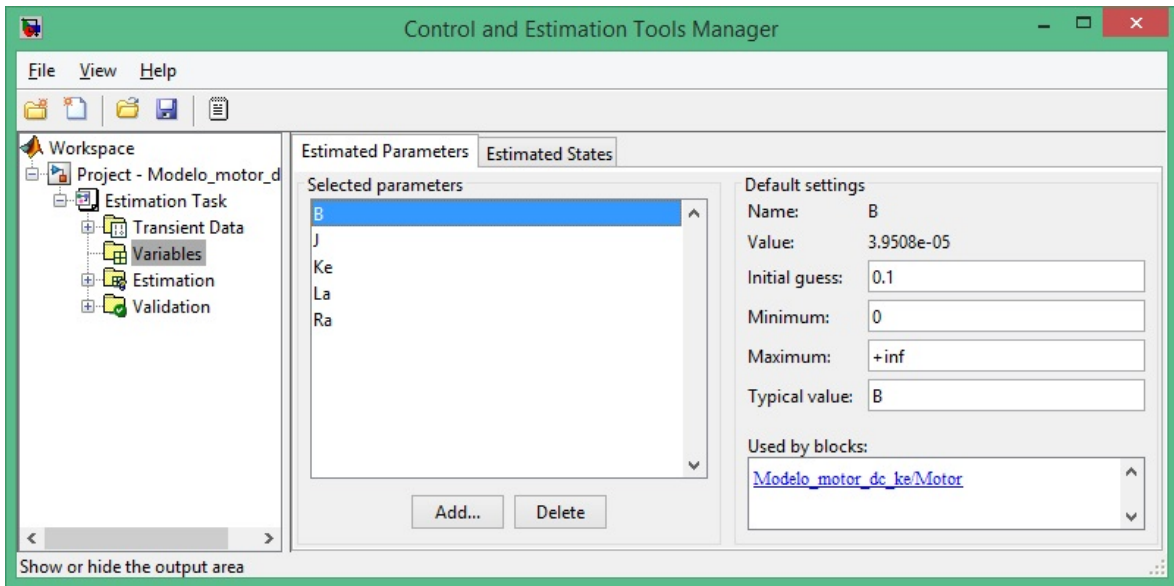


Figura 33 Aplicação do Simulink para Estimação de Parâmetros (GUI)

Neste caso usam-se os cinco parâmetros existentes no nosso modelo, respetivamente: B, J, Ke, La, Ra (ver Tabela 2).

Depois de importar os dados experimentais e seleccionar os parâmetros a estimar, é necessário criar um novo ficheiro de estimação e configurar as opções do mesmo. Cada estimação usa apenas os dados experimentais seleccionados sendo que os restantes são usados para validação dos novos parâmetros. Como podemos verificar na Figura 34, pode-se usar mais que uma experiência em simultâneo ou apenas uma.

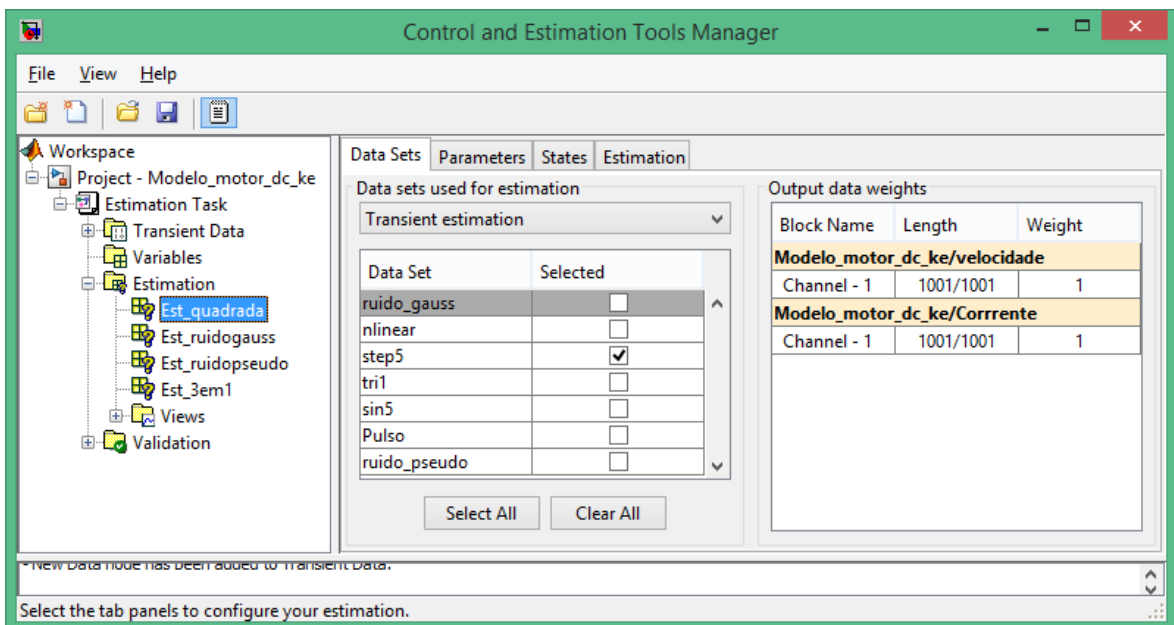


Figura 34 Escolha dos dados a ser usados no processo de estimação

Cada ficheiro de estimação tem as suas próprias definições, portanto para cada um é necessário configurar da forma que se achar mais adequada. Depois de escolhidas as experiências que se pretende usar para estimar os parâmetros do motor, escolhem-se novamente (pois cada ficheiro de estimação é independente) os parâmetros, a estimar através do menu *Parameters*, como demonstra a Figura 35.

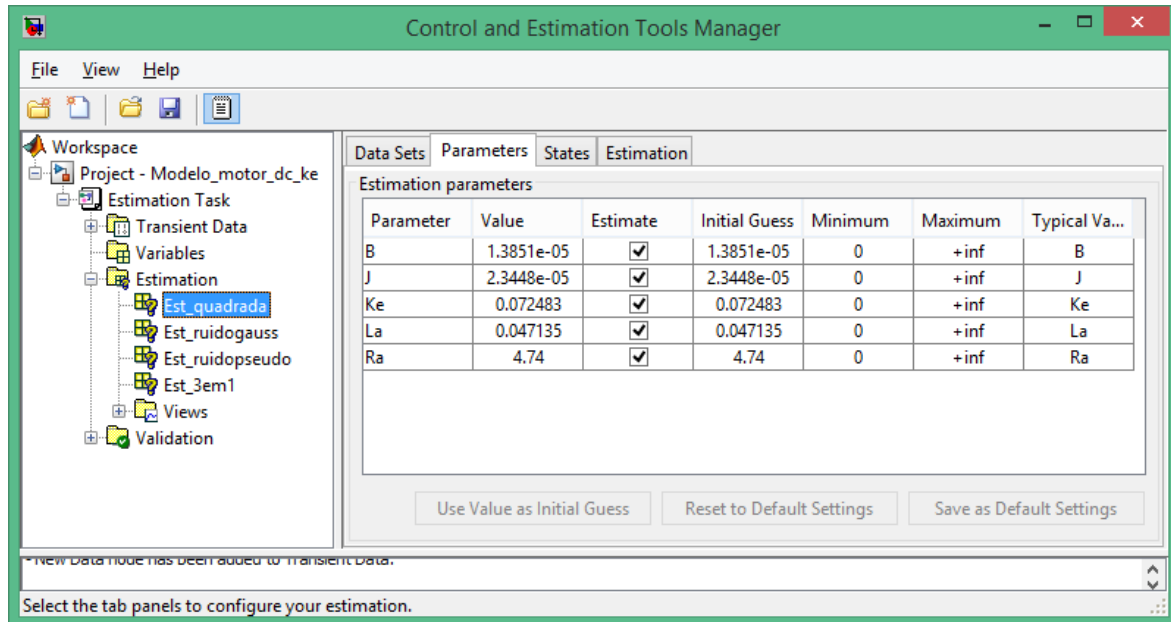


Figura 35 Escolha dos parâmetros a estimar por ficheiro de estimação

Esta ferramenta utiliza vários algoritmos de estimação, como por exemplo, o método dos Mínimos Quadrados não lineares, Nelder-Mead (*simplex search*), entre outros.

Neste estudo usa-se apenas o método dos Mínimos Quadrados não lineares pois é o que se revelou mais eficiente na obtenção dos valores dos parâmetros.

O próximo passo consiste na especificação das opções de estimação, um passo importante pois define a precisão dos valores encontrados por estimação. Estas opções são:

- *Diff max change*: A variação máxima permitida das variáveis para gradientes de diferenças finitas, é usado o valor padrão (0.1).
- *Diff min change*: A variação mínima permitida das variáveis para gradientes de diferenças finitas, é usado o valor de $1e^{-11}$.
- *Parameter tolerance*: O processo de estimação termina assim que a variação dos valores dos parâmetros for menor que este valor, é usado o valor de $1e^{-6}$.
- *Maximum fun evals*: O valor máximo de estimações, da função custo, permitidas. A estimação termina assim que este número é ultrapassado, é usado o valor padrão de 400.

- *Maximum iterations*: O valor máximo de iterações, permitidas. A estimação termina assim que este número é ultrapassado, é usado o valor padrão (100).
- *Function Tolerance*: O processo de estimação termina assim que a variação dos valores das funções forem menores que este valor, é usado o valor de $1e^{-6}$.

Estas opções determinam quando o processo de estimação termina, resultando assim em resultados mais ou menos precisos relativamente ao seu valor real. A Figura 36 apresenta a janela de configuração das opções da estimação.

Com o fim de cada estimação devem ser analisados os resultados obtidos e sempre que estes não apresentem a precisão pretendida, deve ser realizada uma nova estimação em que os valores iniciais devem ser os valores obtidos pela última estimação. Desta forma as respostas simuladas e as respostas reais aproximam-se cada vez mais.

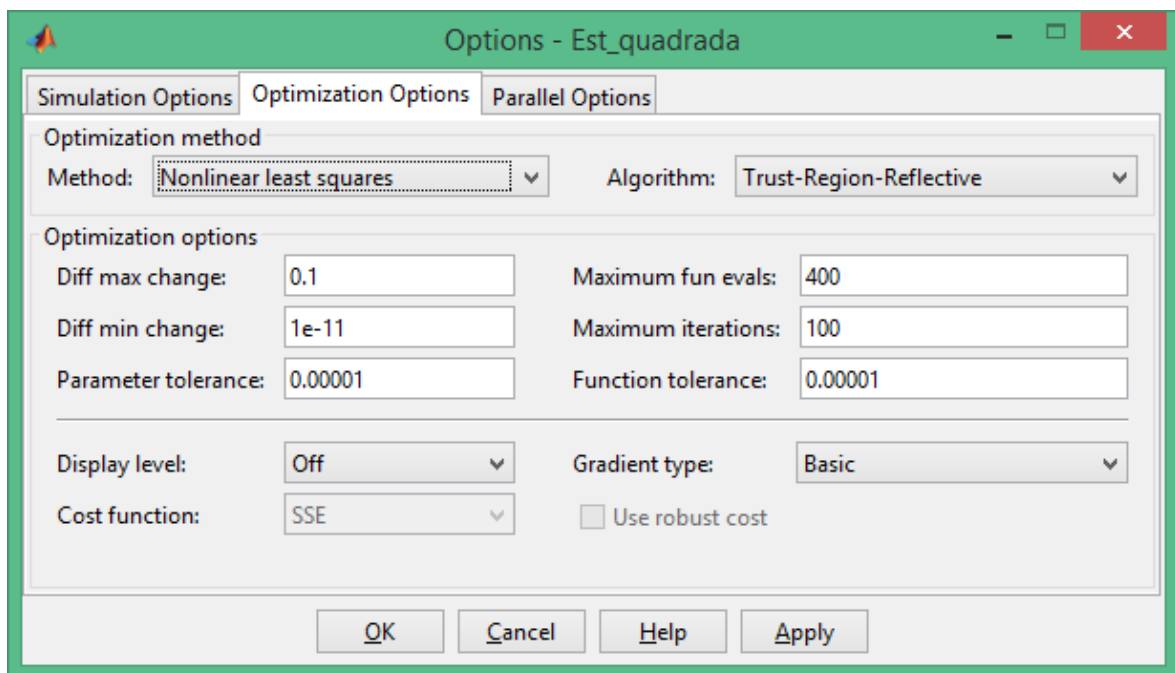
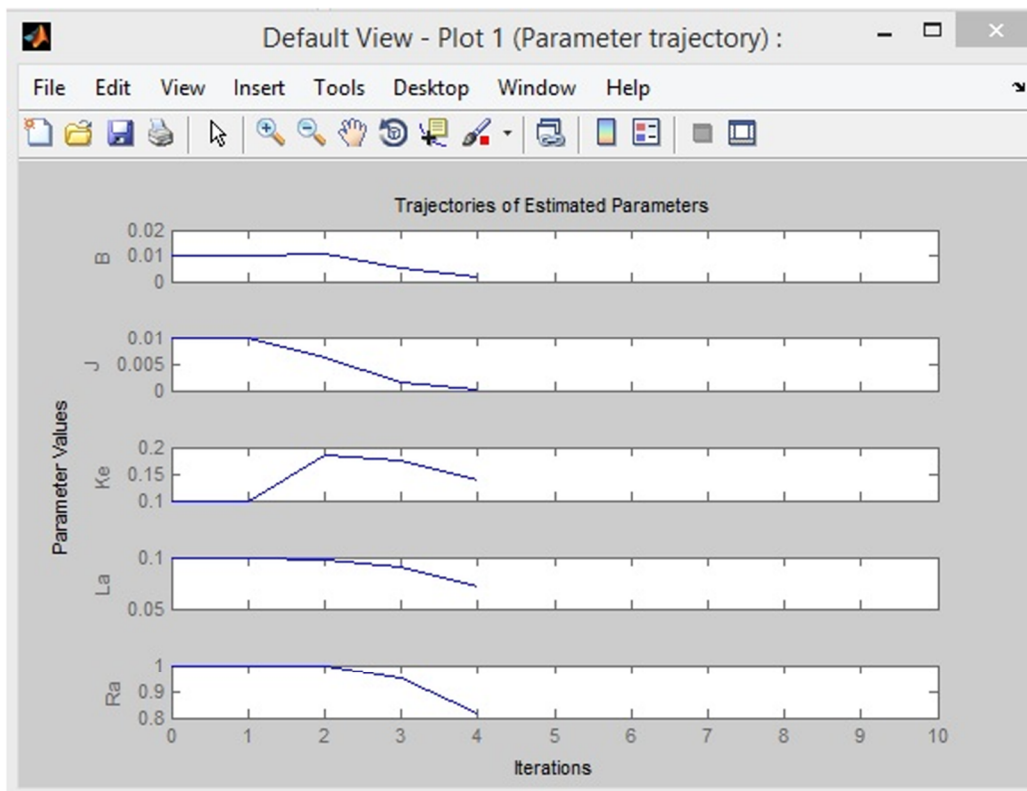
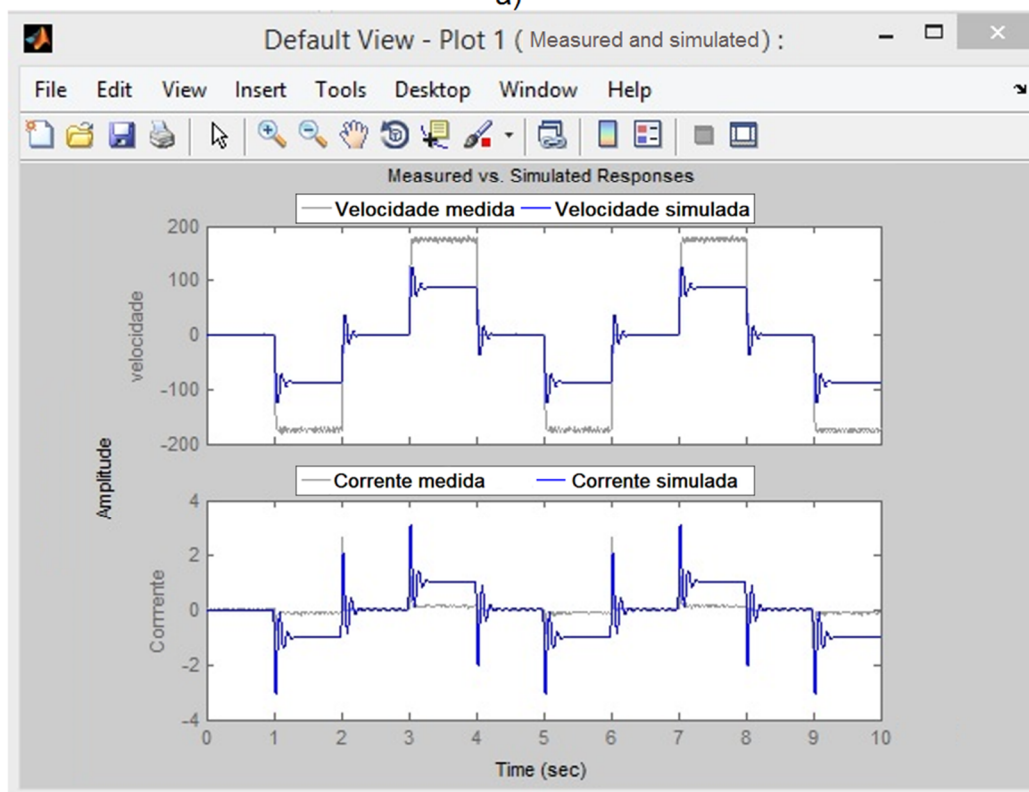


Figura 36 Opções da estimação

Com o fim da configuração pode-se dar início ao processo de estimação e verificar, enquanto este é executado, as sucessivas aproximações das respostas do modelo relativamente às respostas do sistema real, e ainda a variação dos parâmetros no decorrer da estimação, como podemos verificar na Figura 37, a qual exemplifica as iterações efetuadas pela ferramenta para o sinal de excitação denominado neste trabalho por onda quadrada.



a)



b)

Figura 37 Aproximações durante a estimação:

a) Trajetória dos parâmetros e b) Outputs do modelo simulado vs. modelo real

Por fim, depois da obtenção dos parâmetros estimados é possível comparar graficamente as respostas do modelo com os novos parâmetros com as respostas das diferentes experiências efetuadas ao motor e proceder então à validação dos novos valores. Para isso é necessário criar um novo ficheiro de estimação clicando na pasta *Validation* e em *New*.

Cada ficheiro de estimação tem guardado os valores dos parâmetros obtidos. Na janela de validação é possível seleccionar quais destes ficheiros são usados para gerar as respostas simuladas do sistema para cada um dos sinais de entrada no menu *drop-down* ‘*Validation data set*’. Depois de clicar em *Show Plots*, é gerado um gráfico com as respostas reais para o sinal escolhido, bem como as respostas simuladas para os ficheiros de estimação escolhidos. Desta forma é possível, não só comparar a precisão dos resultados com as respostas reais do sistema mas também comparar quais estimações geram melhores aproximações. A janela de validação é apresentada pela Figura 38.

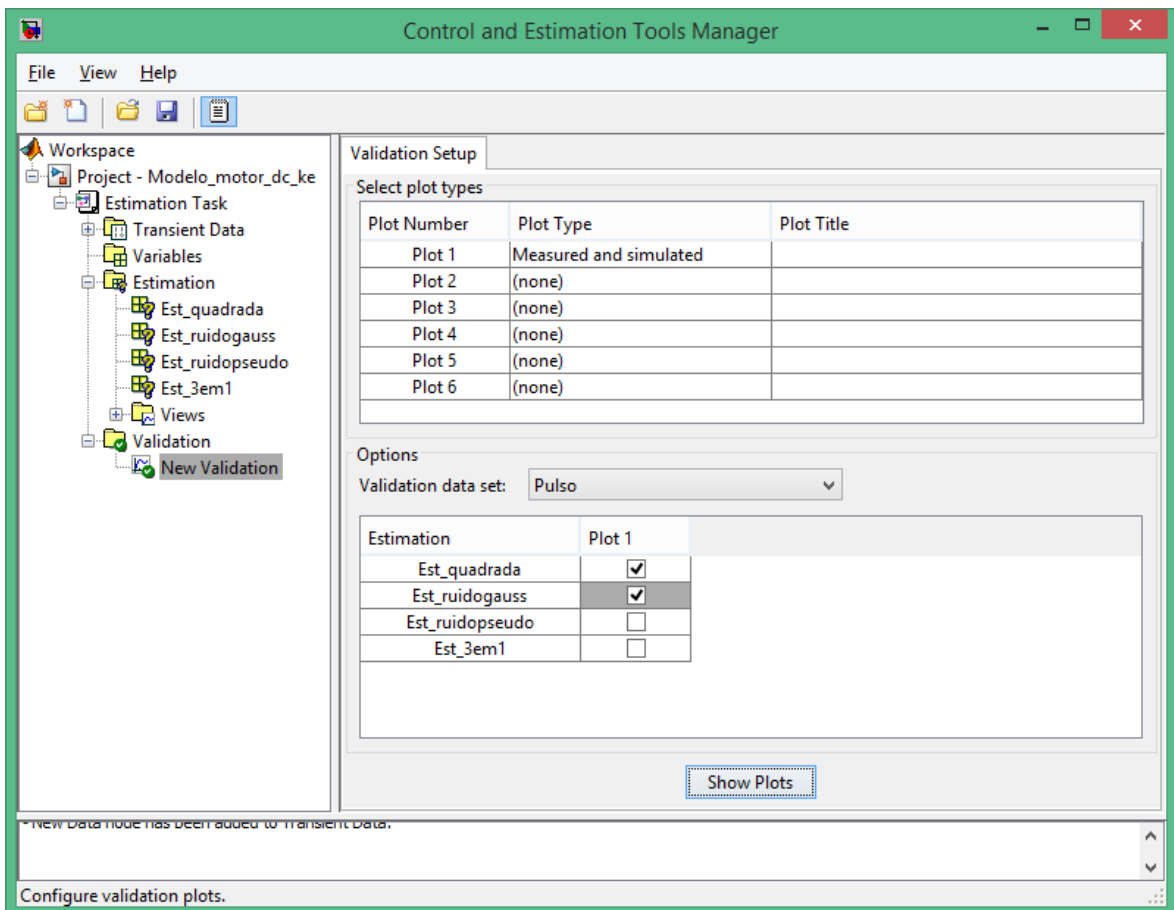


Figura 38 Janela de validação dos dados obtidos

5. ENSAIOS E RESULTADOS

Neste capítulo é utilizada a ferramenta de estimação de parâmetros do Simulink, em conjunto com os dados experimentais obtidos do motor DC, em estudo, com o objetivo de encontrar os parâmetros do motor que resultam numa melhor aproximação entre ambos os modelos, real e simulado.

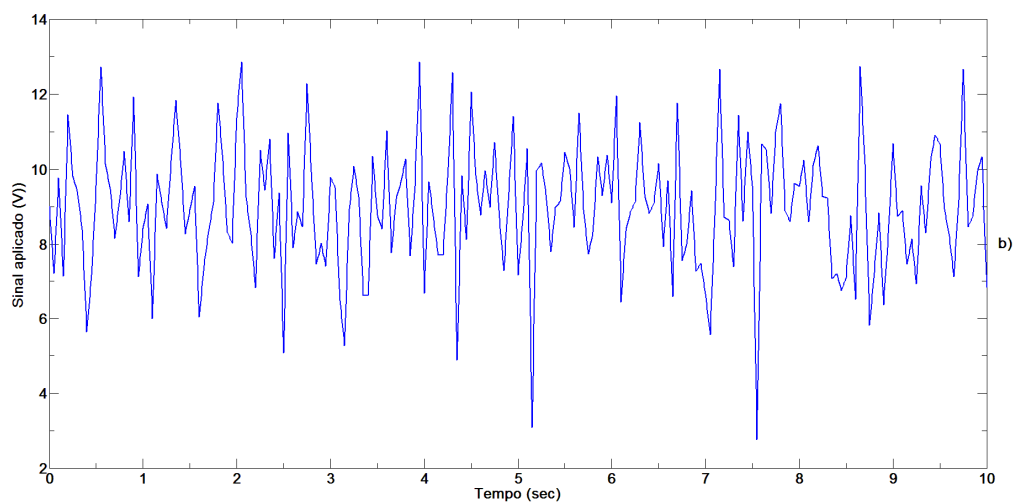
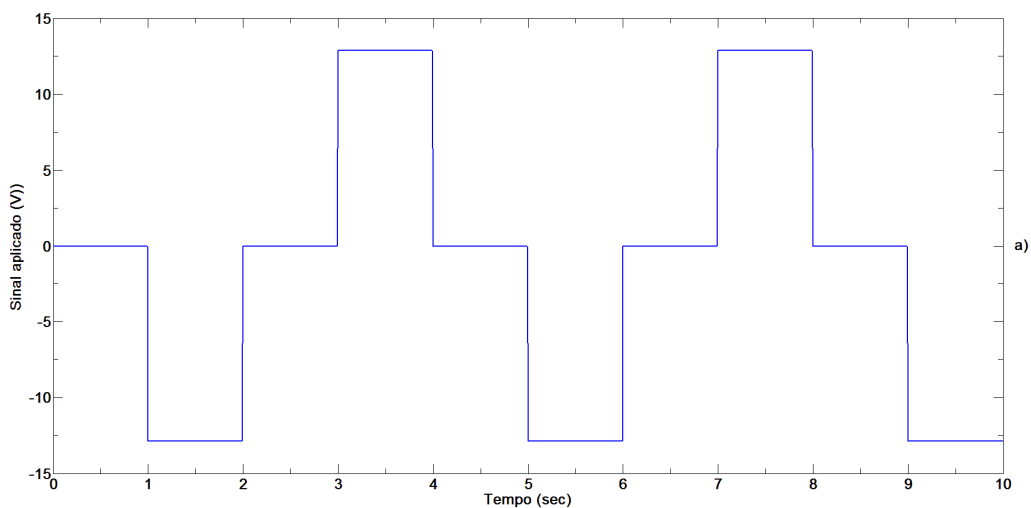
Os resultados das estimações são obtidos com recurso ao modelo linear do motor, e através de dados experimentais obtidos de ambas as respostas de velocidade e corrente e também a partir, unicamente, da resposta em velocidade.

No processo de obtenção dos parâmetros do motor iremos usar três diferentes sinais de excitação. Cada estimação é obtida através de um destes sinais e por fim uma última com recurso aos três combinados. A Figura 39 apresenta os sinais usados para excitar o motor, obtendo assim as suas respostas de velocidade e corrente. O sistema é excitado com recurso a uma onda quadrada e dois sinais de ruído, respetivamente, ruído gaussiano e ruído pseudoaleatório. O objetivo dos sinais de ruído é excitar o sistema para uma gama de potência e frequências maiores. São comparados os vários valores dos parâmetros do motor DC entre os diferentes sinais de excitação aplicados. Os resultados obtidos devem ser semelhantes e de preferência mais precisos que os resultados obtidos através do modelo usando os parâmetros do fabricante. São aplicados ao modelo linear do motor (ver Figura

30), criado no Simulink, os dados fornecidos pelo fabricante, obtendo assim as respostas em velocidade e corrente. Estas respostas são usadas posteriormente como um ponto de comparação relativamente às respostas obtidas, através da simulação do modelo, para os novos parâmetros.

De seguida são realizadas um conjunto de estimações com recurso, apenas, aos dados obtidos das respostas de velocidade do motor DC. Nestas condições é determinado se apenas valores de velocidade são suficientes para estimar os parâmetros do motor. De seguida efetua-se um novo conjunto de estimações com recurso às respostas obtidas de velocidade e corrente do motor DC. Nestas condições é esperada uma maior precisão e aproximação ao sistema real.

Por último são calculados os índices de erro entre as respostas do sistema real e as respostas das simulações como forma de comparação entre os resultados obtidos em termos de precisão.



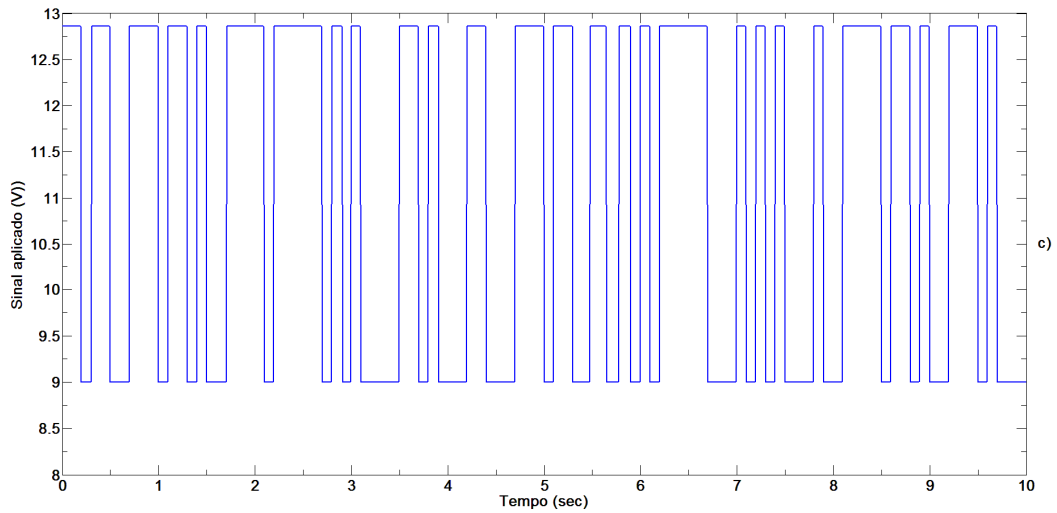
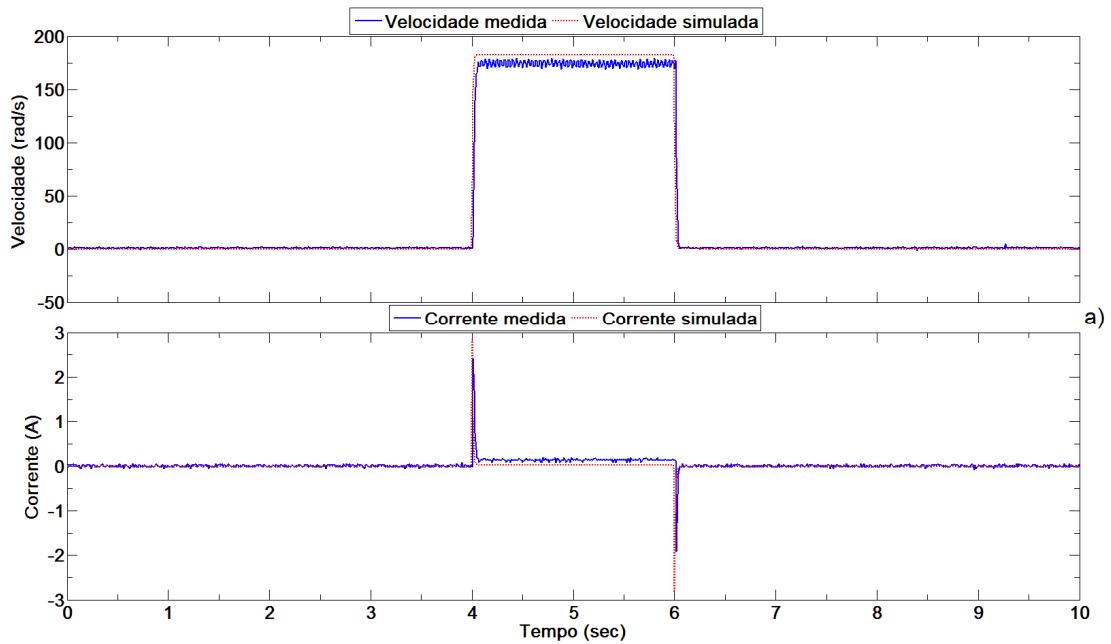


Figura 39 Sinais de excitação: a) onda quadrada, b) ruído gaussiano e c) ruído pseudoaleatório

5.1. PARÂMETROS DO FABRICANTE

Os parâmetros disponibilizados pelo fabricante (ver Tabela 4) são aplicados ao modelo do sistema no Simulink (ver Figura 30), e os resultados comparados aos dados obtidos do sistema real. A Figura 40 apresenta as respostas obtidas usando os parâmetros do fabricante para diferentes sinais de validação.



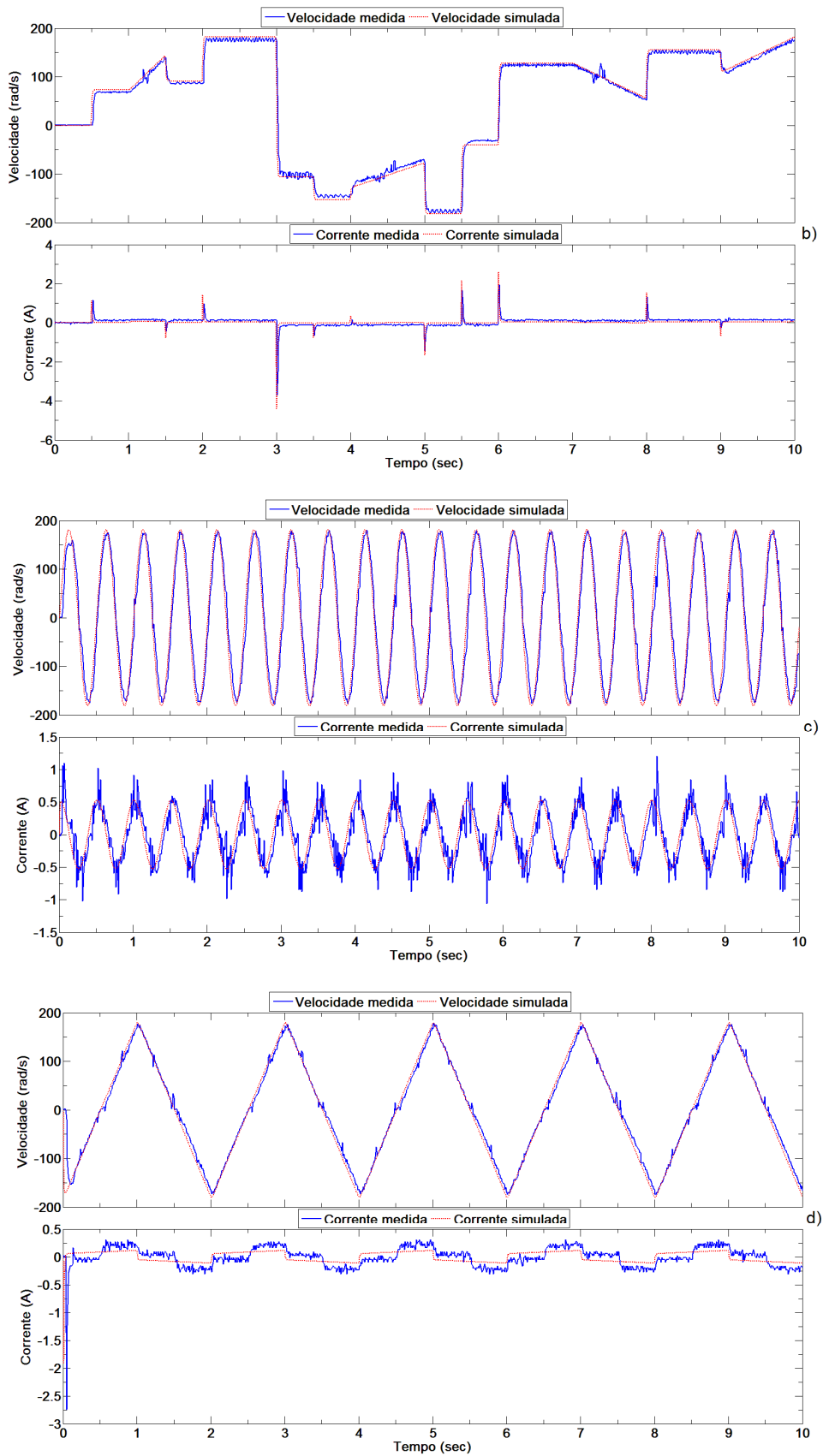


Figura 40 Resultados do modelo para os parâmetros do fabricante para os diferentes sinais de excitação: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

Para o motor em estudo podemos considerar que os parâmetros fornecidos pelo fabricante resultam numa boa aproximação relativamente às respostas reais do motor.

5.2. RESULTADOS COM RECURSO À RESPOSTA EM VELOCIDADE

Nesta secção é efetuado um conjunto de estimações apenas a partir da resposta em velocidade do motor. Os parâmetros obtidos são apresentados numa tabela e os sinais usados para estimação e validação são apresentados graficamente como forma de comparação com as respostas obtidas experimentalmente.

A Figura 41, Figura 43, Figura 45 e Figura 47 apresentam as respostas obtidas do sistema real e simulado a partir do sinal de excitação e a Figura 42, Figura 44, Figura 46 e Figura 48 apresentam as respostas obtidas do sistema real e simulado a partir dos sinais de validação. Como é possível reparar, a resposta em velocidade apresenta um resultado bastante satisfatório para todos os sinais de excitação e de validação. Relativamente à resposta em corrente já não podemos afirmar o mesmo pois obtemos uma diferença notável, especialmente na amplitude do valor de corrente para todos os sinais.

5.2.1. ONDA QUADRADA

É aplicada a onda quadrada, apresentada pela Figura 39 a). Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 11. A Tabela 12 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 11 Onda quadrada - Resultados da estimação – apenas velocidade

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos
B	0,1	0	0,5	$1,48e^{-7}$
J	0,1	0	0,5	0,000226819
Ke	0,1	0	+inf	0,073400317
La	0,1	$1e^{-9}$	1	0,00493316
Ra	1	0,5	100	0,5

Tabela 12 Onda quadrada - Opções da estimação – apenas velocidade

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001

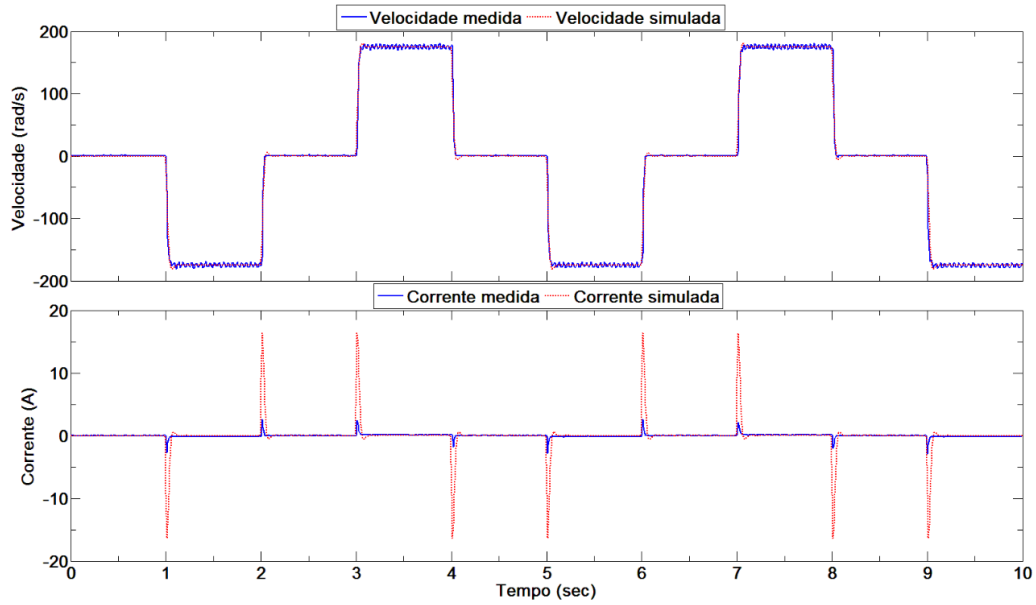
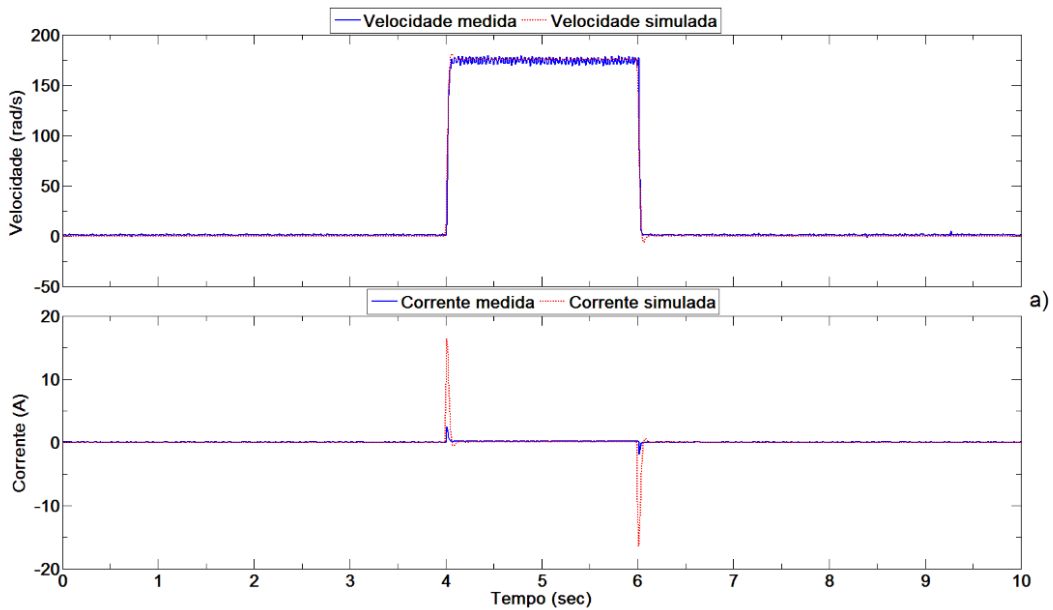


Figura 41 Onda quadrada - Resultado da estimação – apenas velocidade



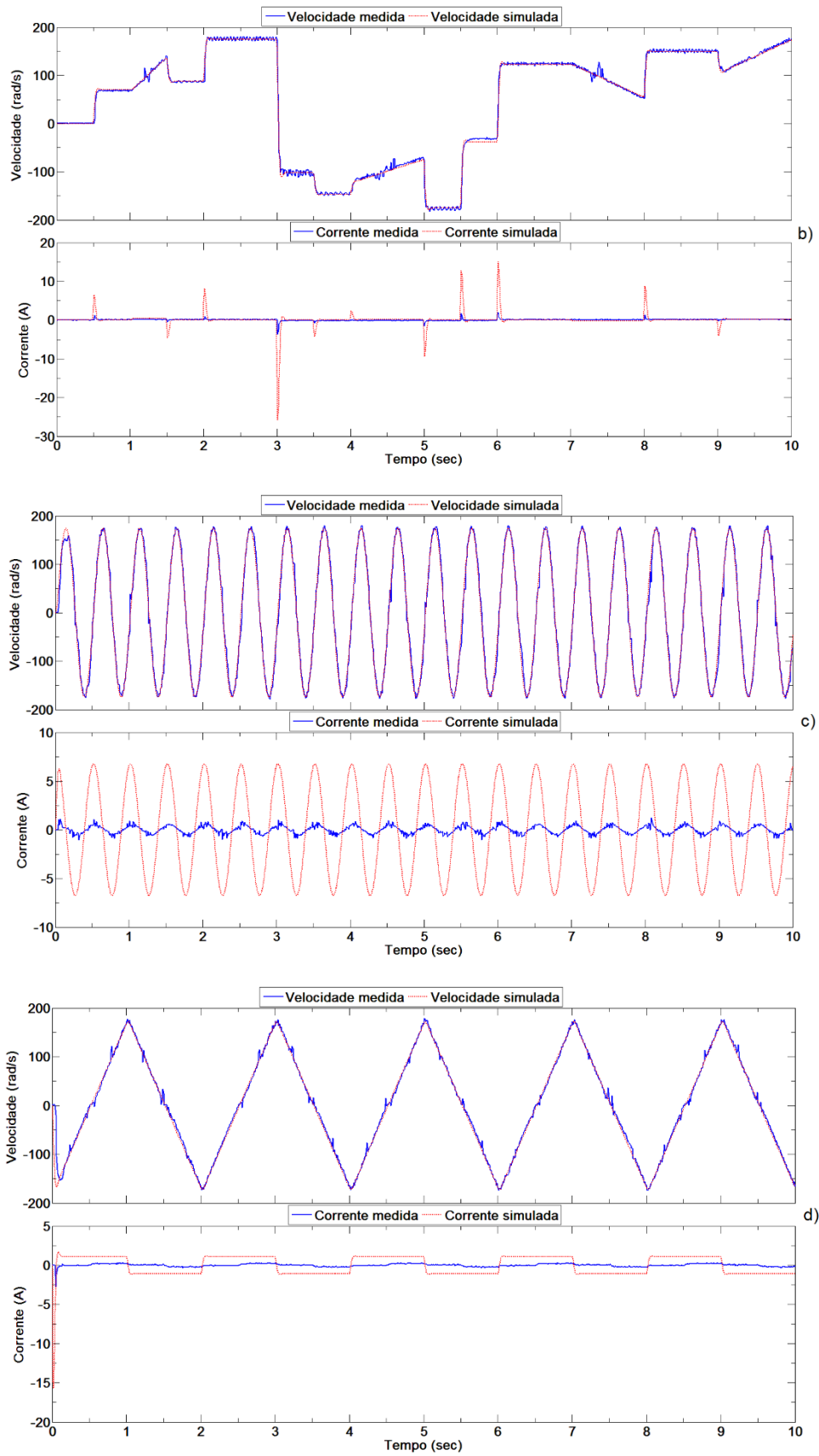


Figura 42 Onda quadrada - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.2.2. RÚIDO GAUSSIANO

É aplicado o sinal de ruído gaussiano, apresentado pela Figura 39 b). Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 13. A Tabela 14 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 13 Ruído gaussiano - Resultados da estimação – apenas velocidade

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	0,5	$4,33e^{-5}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	0,1	0	0,5	0,0002551	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0723665	0,07	V.s/rad
La	0,1	$1e^{-9}$	1	0,0052197	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	1	0,5	100	0,5015786	2,74	Ohms

Tabela 14 Ruído gaussiano - Opções da estimação – apenas velocidade

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001

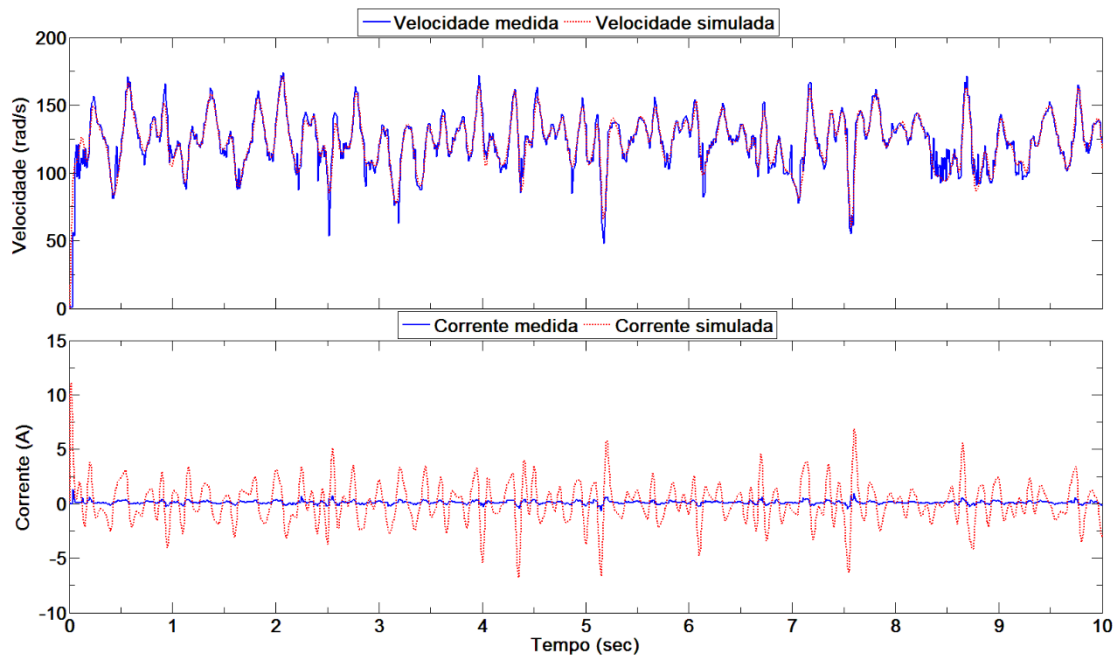
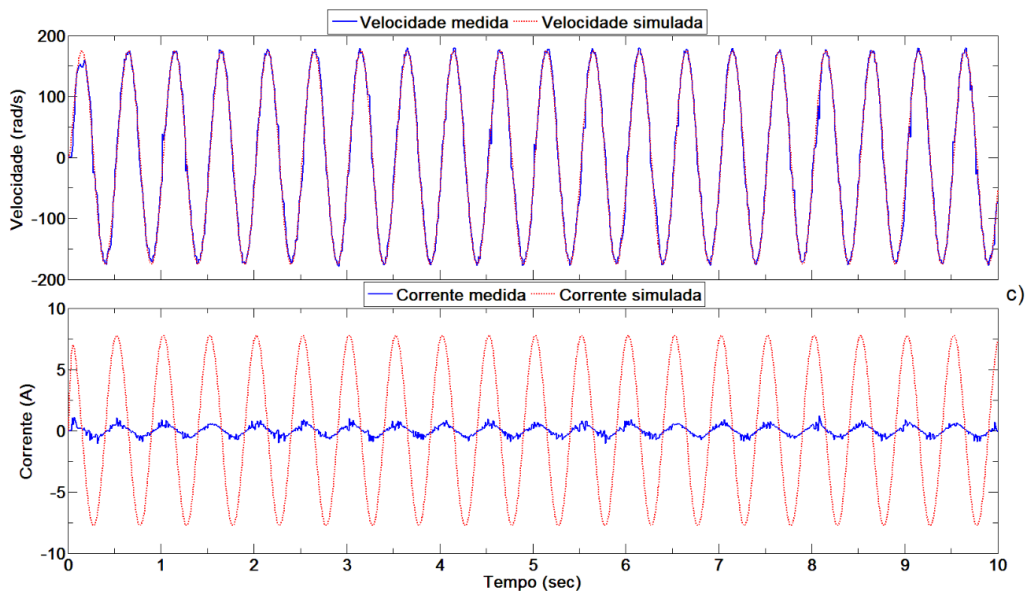
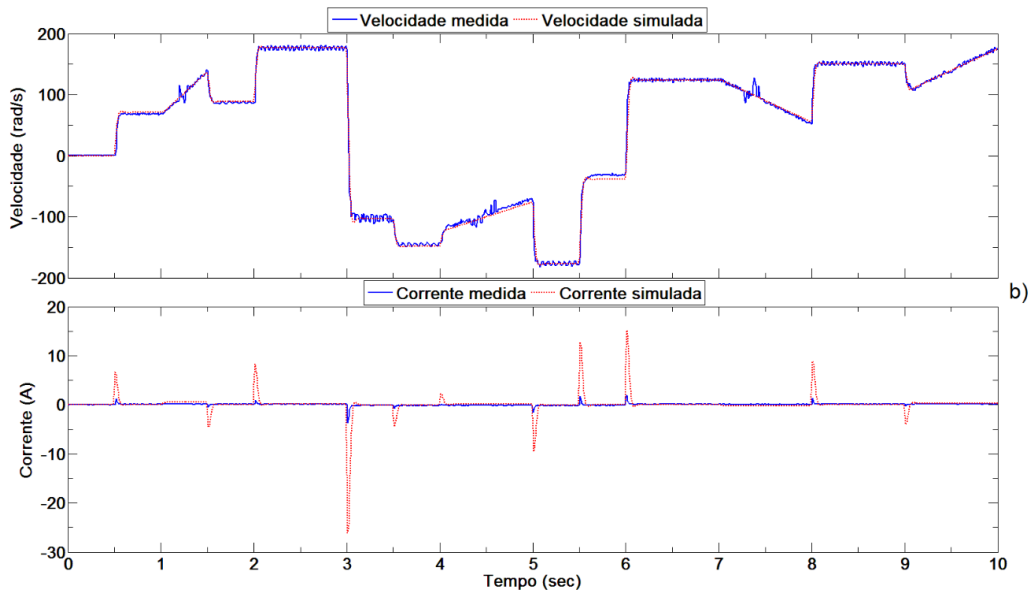
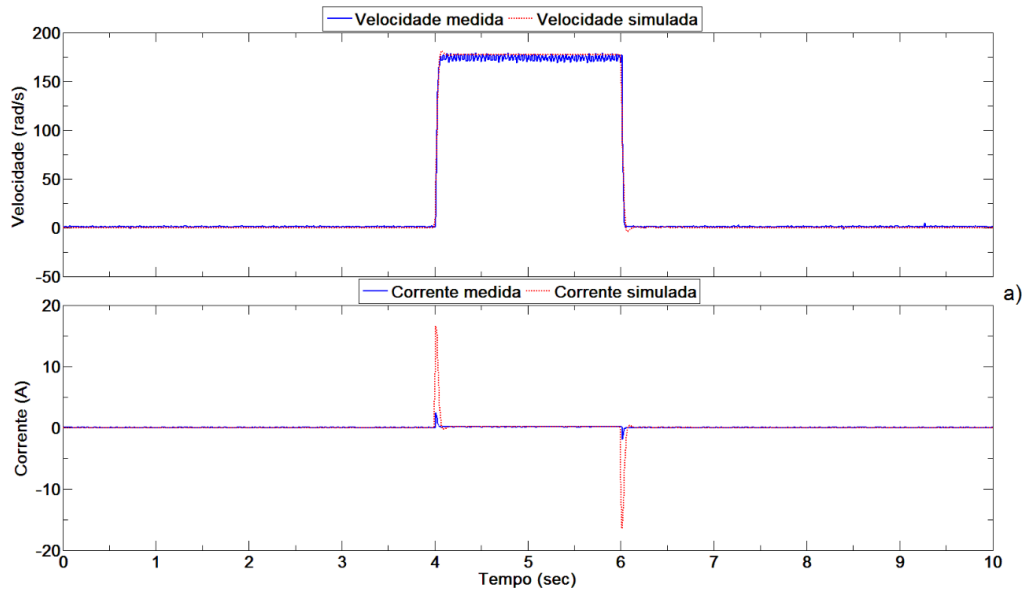


Figura 43 Ruído gaussiano - Resultado da estimação – apenas velocidade



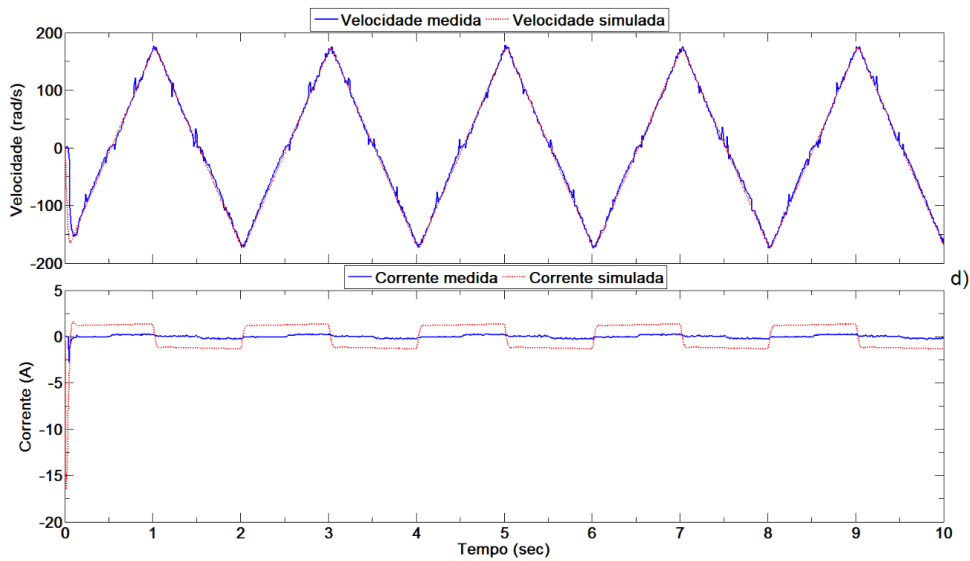


Figura 44 Ruído gaussiano - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.2.3. RUÍDO PSEUDOALEATÓRIO

É aplicado o sinal de ruído pseudoaleatório, apresentado pela Figura 39 c). Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 15. A Tabela 16 representa as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 15 Ruído pseudoaleatório - Resultados da estimação – apenas velocidade

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	0,5	$8,55e^{-8}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	0,1	0	0,5	0,0003618	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0728043	0,07	V.s/rad
La	0,1	$1e^{-9}$	1	0,005456	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	1	0,5	100	0,5027062	2,74	Ohms

Tabela 16 Ruído pseudoaleatório - Opções da estimação – apenas velocidade

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001

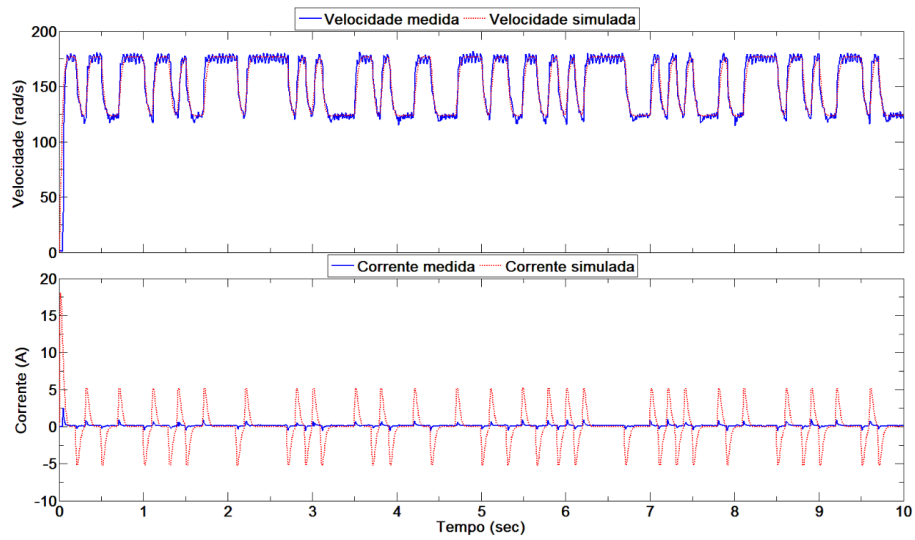
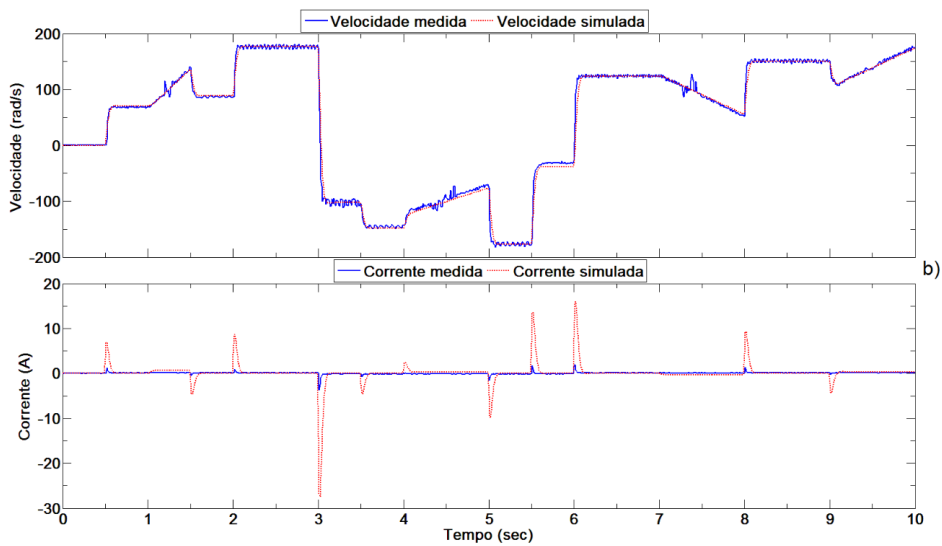
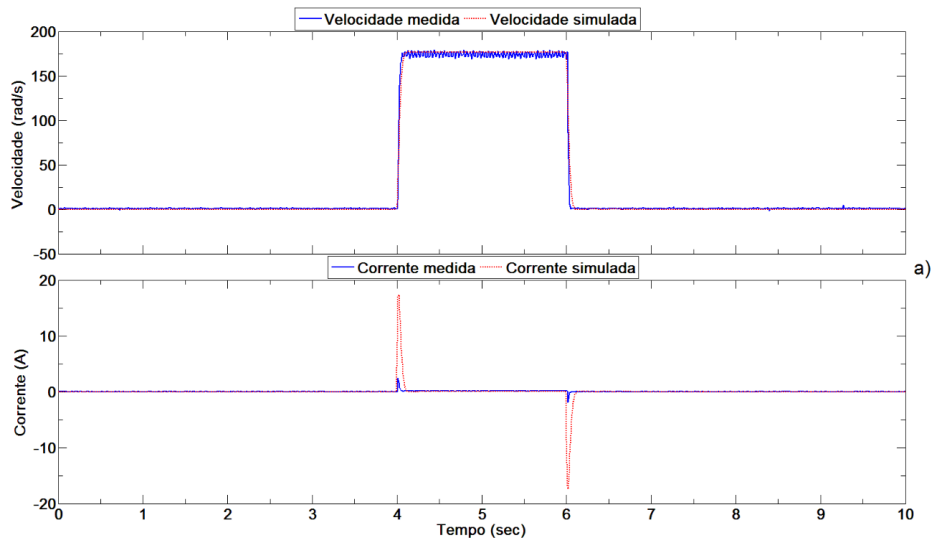


Figura 45 Ruído pseudoaleatório - Resultado da estimação – apenas velocidade



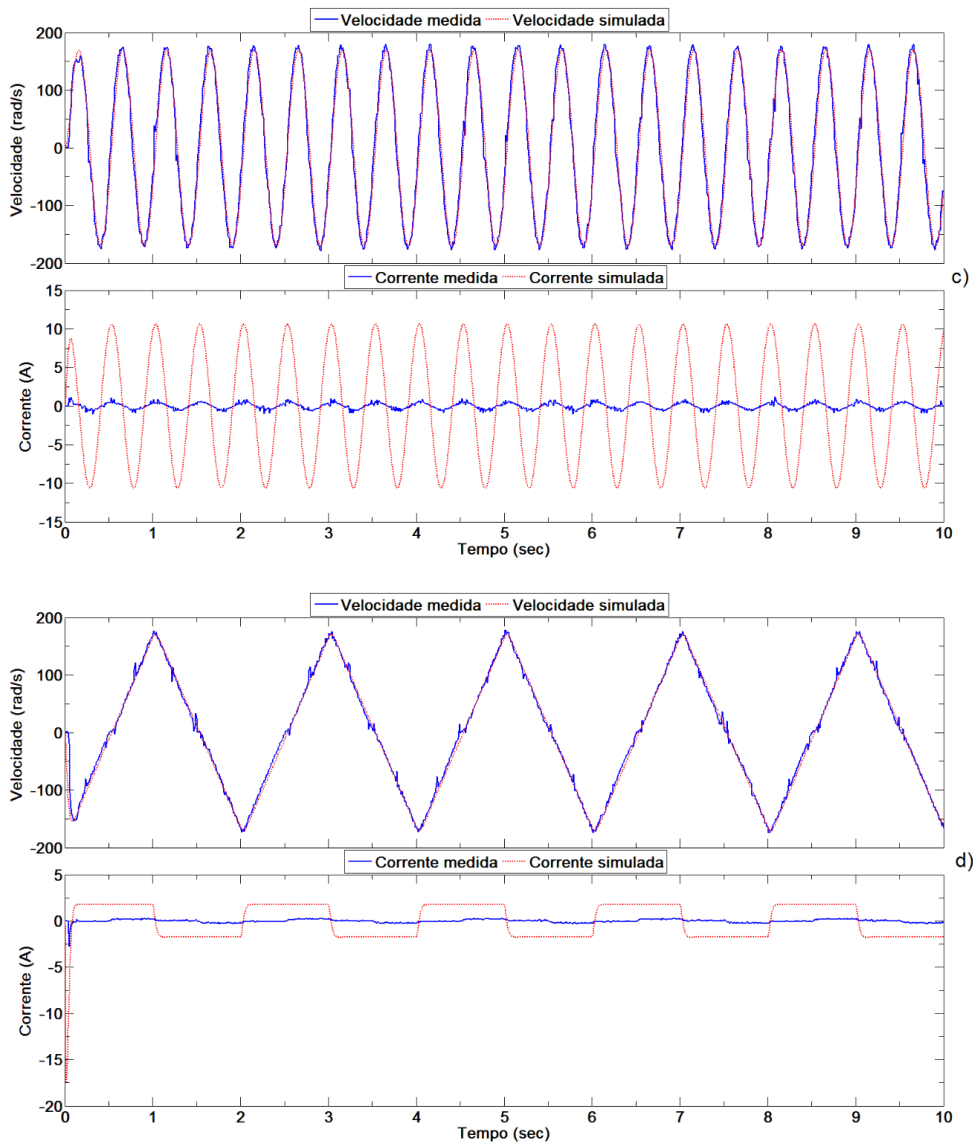


Figura 46 Ruído pseudoaleatório - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.2.4. SINAL COMPOSTO

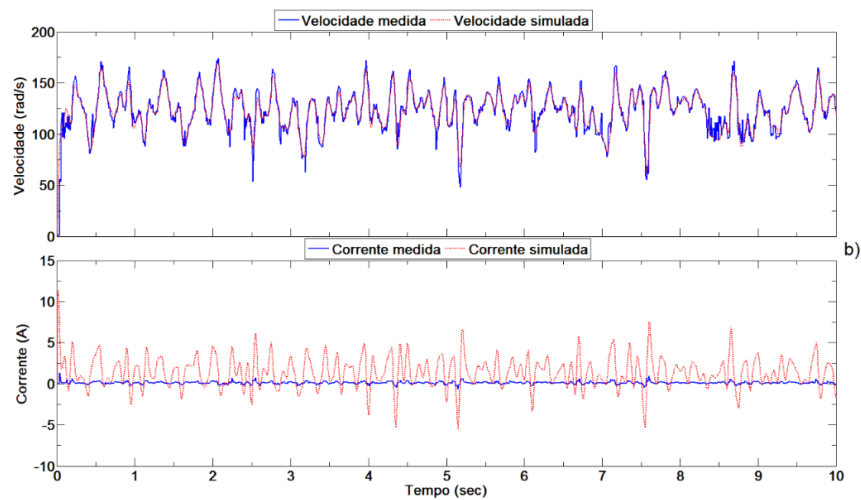
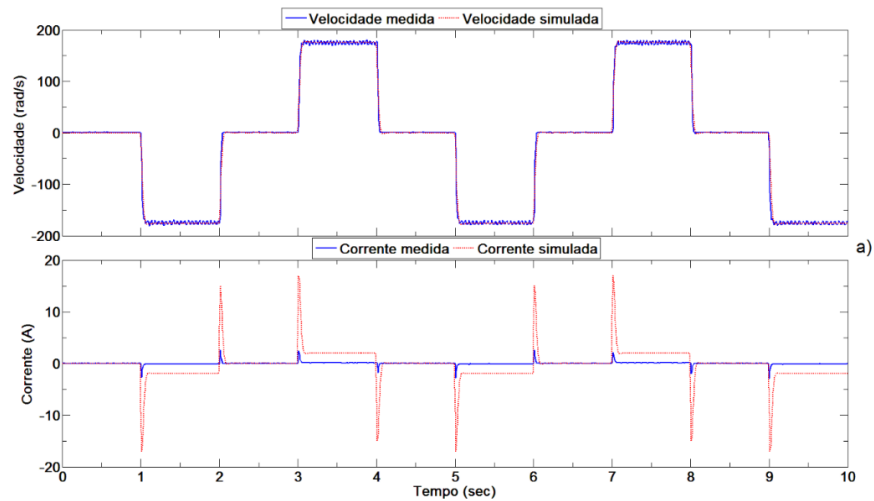
Este sinal usado na estimação é composto pelos três sinais anteriores em conjunto, apresentados pela Figura 39. Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 17. A Tabela 18 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 17 Sinal composto - Resultados da estimação – apenas velocidade

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	0,5	$7,60e^{-4}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	0,1	0	0,5	0,0002413	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0671386	0,07	V.s/rad
La	0,1	$1e^{-9}$	1	0,0048845	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	1	0,5	100	0,5101728	2,74	Ohms

Tabela 18 Sinal composto - Opções da estimação – apenas velocidade

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001



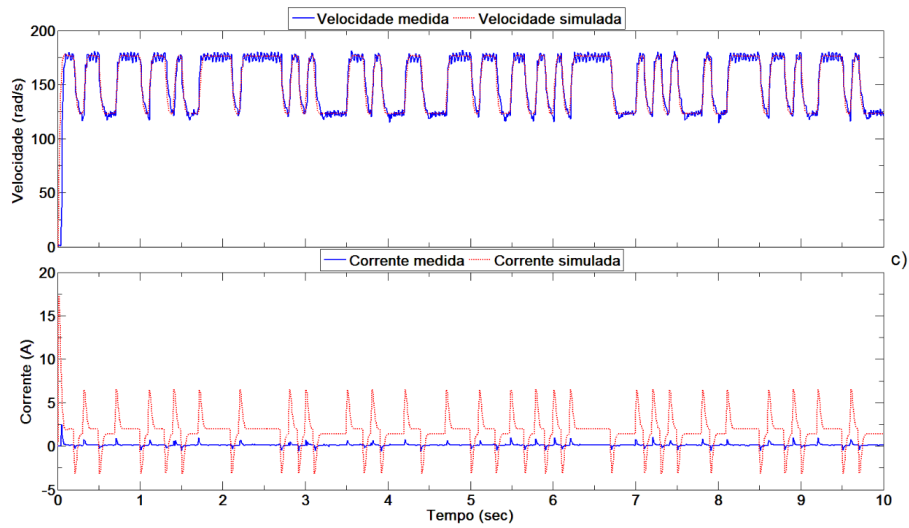
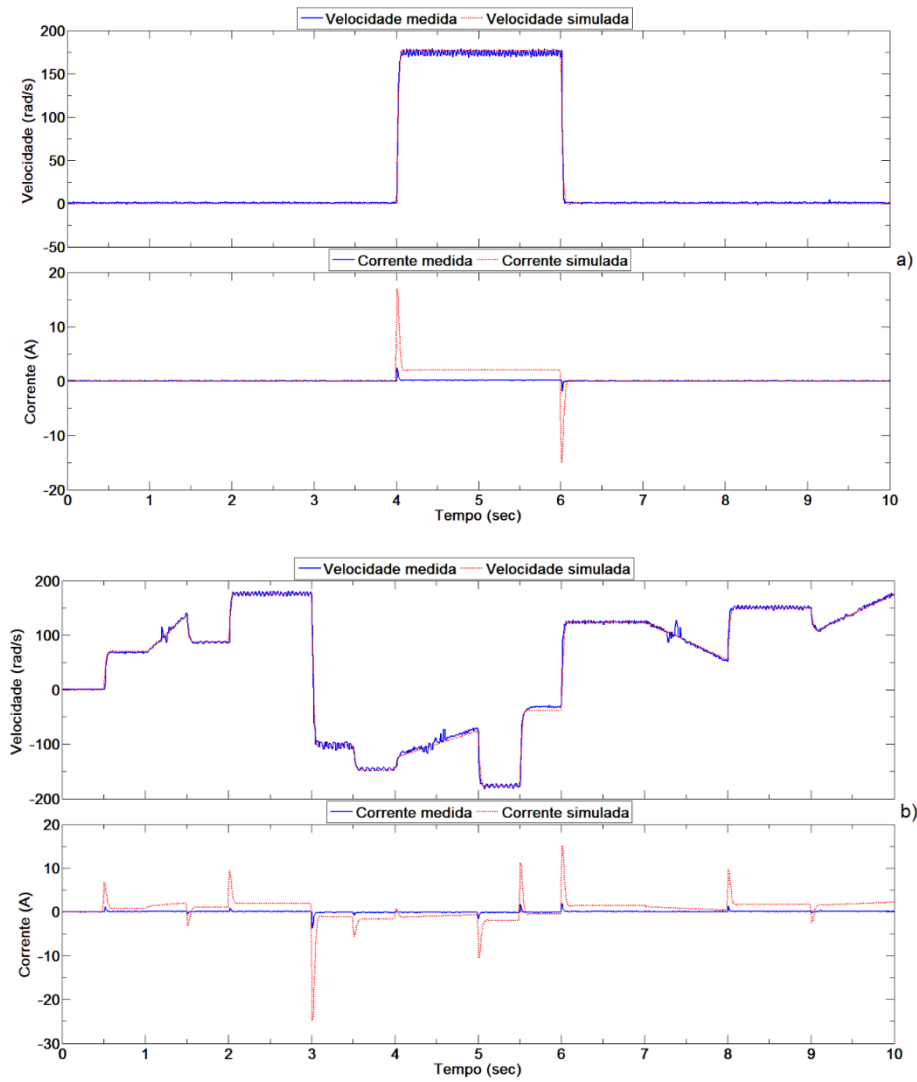


Figura 47 Sinal composto - Resultado da estimação – apenas velocidade: a) onda quadrada, b) ruído gaussiano e c) ruído pseudoaleatório



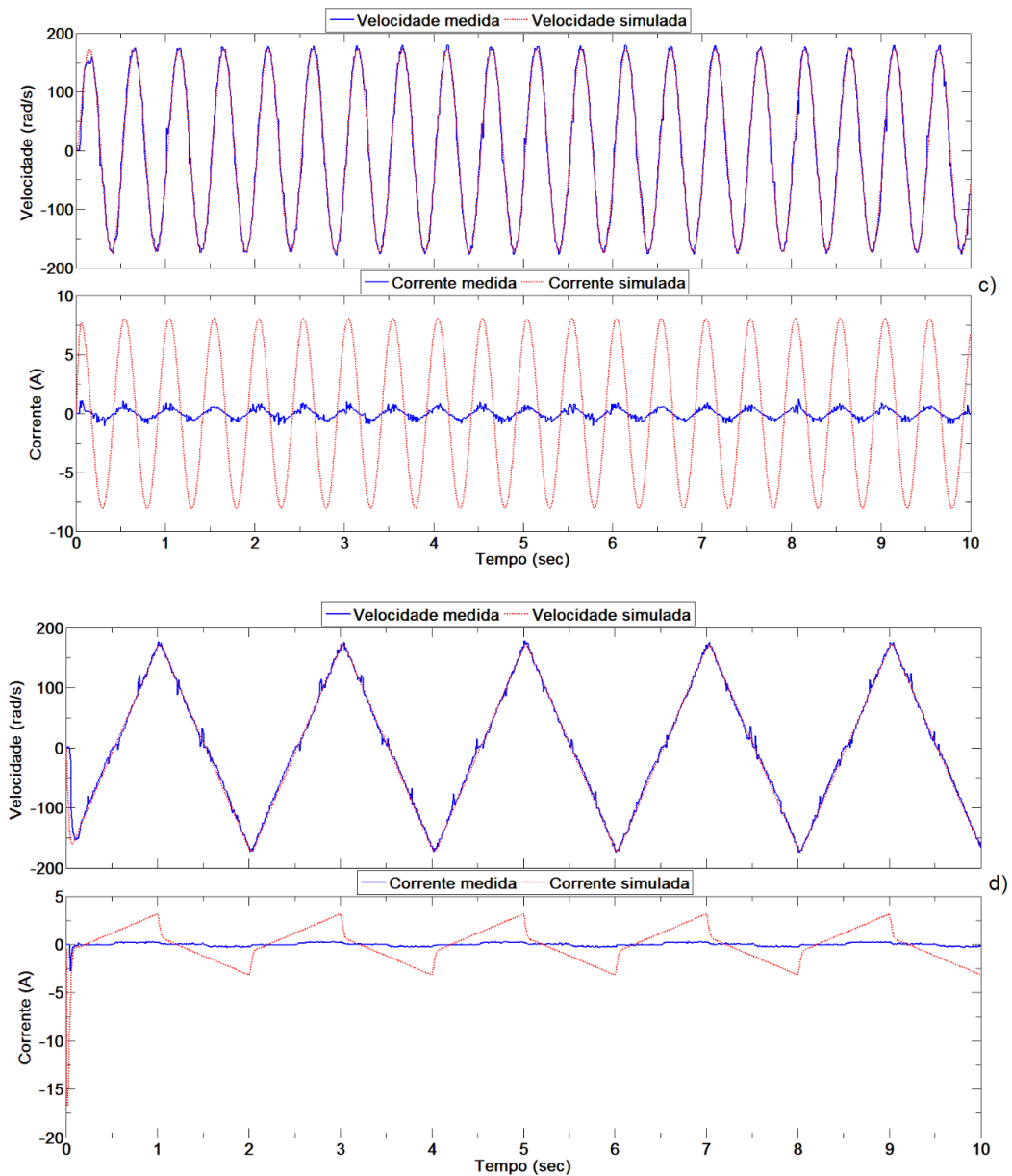


Figura 48 Sinal composto - Validação da estimação – apenas velocidade: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.3. RESULTADOS COM RECURSO ÀS RESPOSTAS EM VELOCIDADE E CORRENTE

Nesta secção efetua-se um conjunto de estimações a partir das respostas em velocidade e corrente do motor. Os parâmetros obtidos são apresentados numa tabela e os sinais usados para estimação e validação são apresentados graficamente como forma de comparação com as respostas obtidas experimentalmente.

A Figura 49, Figura 51, Figura 53 e Figura 55 apresentam as respostas obtidas do sistema real e simulado a partir do sinal de excitação e a Figura 50, Figura 52, Figura 54 e Figura 56 apresentam as respostas obtidas do sistema real e simulado a partir dos sinais de validação. Relativamente aos valores dos parâmetros obtidos, estes encontram-se um pouco afastados dos valores dos parâmetros do fabricante mas, conseqüentemente, resultam numa melhor aproximação. Isto poderá querer dizer que, entretanto, o motor ao longo da sua vida tenha sofrido algumas alterações, como desgaste, envelhecimento e mau uso. Na última estimação como são usados os três sinais combinados para efetuar a estimação, é de esperar que as respostas geradas, a partir destes resultados obtidos, se aproximem melhor, no geral, para uma maior gama de sinais de validação.

5.3.1. ONDA QUADRADA

Nesta experiência é aplicada a onda quadrada, apresentada pela Figura 39 a). Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 19. A Tabela 20 apresenta as opções da estimação usadas que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 19 Onda quadrada - Resultados da estimação – velocidade e corrente

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	+inf	1,39e ⁻⁴	1,14e ⁻⁵	Nm.s/rad
J	0,1	0	+inf	2,34e ⁻⁴	1,62e ⁻⁵	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0724825	0,07	V.s/rad
La	0,1	0	+inf	0,0471354	4,05e ⁻³	Henry
Ra	1	0	+inf	4,74	2,74	Ohms

Tabela 20 Onda quadrada - Opções da estimação – velocidade e corrente

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	1e ⁻¹¹	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001

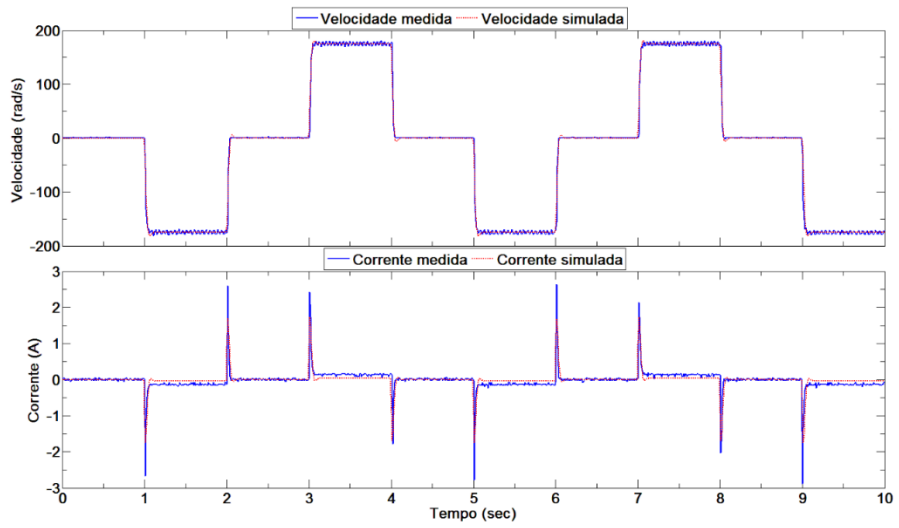
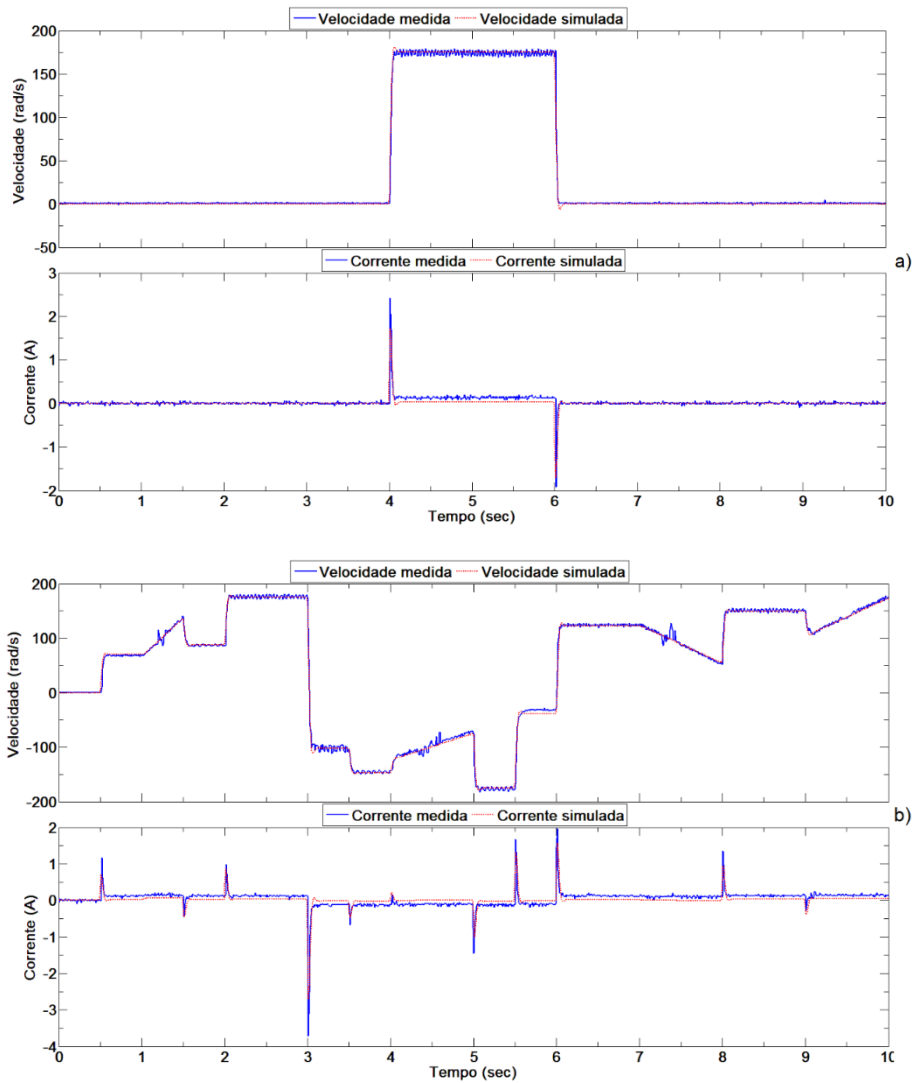


Figura 49 Onda quadrada - Resultados da estimação – velocidade e corrente



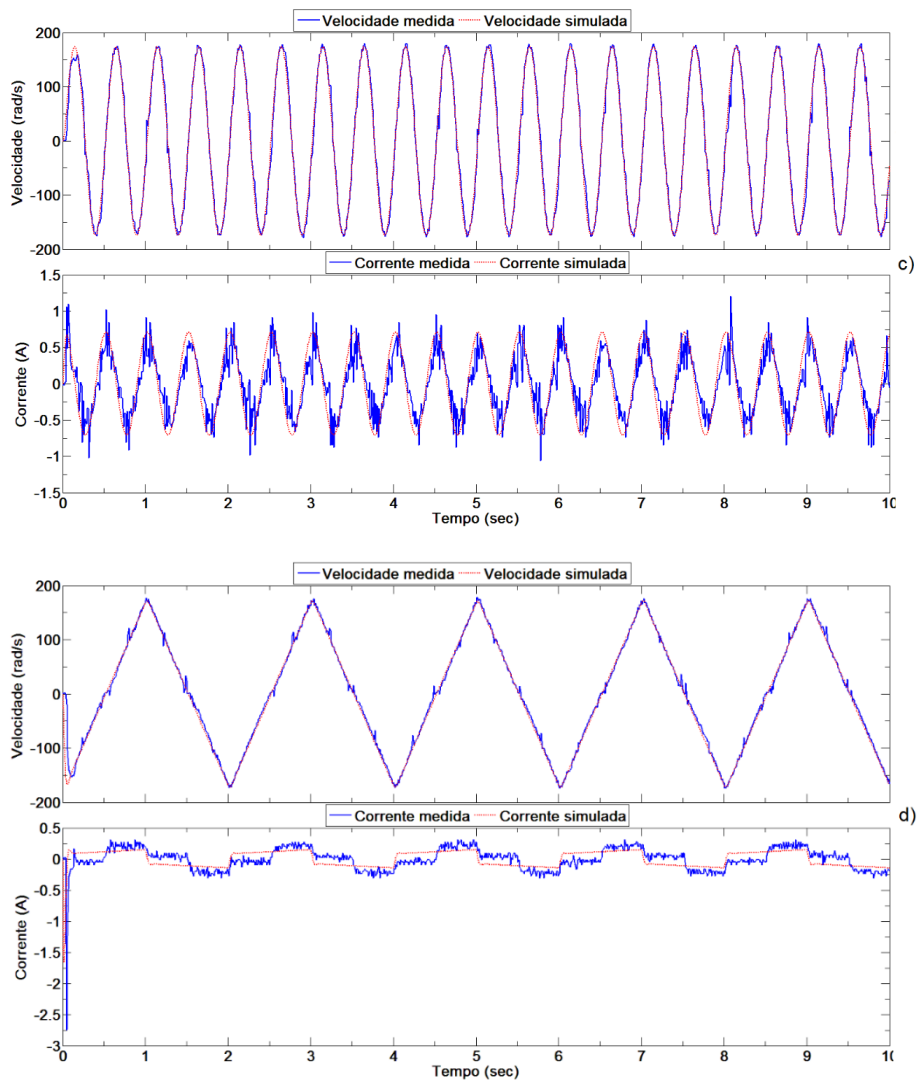


Figura 50 Onda quadrada - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.3.2. RÚIDO GAUSSIANO

É aplicado o sinal de ruído gaussiano, apresentado pela Figura 39 b). Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 21. A Tabela 22 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 21 Ruído gaussiano - Resultados da estimação – velocidade e corrente

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	+inf	$4,93e^{-5}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	0,1	0	+inf	$2,27e^{-5}$	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0688887	0,07	V.s/rad
La	0,1	0	+inf	0,055833	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	1	0	+inf	5,2541826	2,74	Ohms

Tabela 22 Ruído gaussiano - Opções da estimação – velocidade e corrente

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001

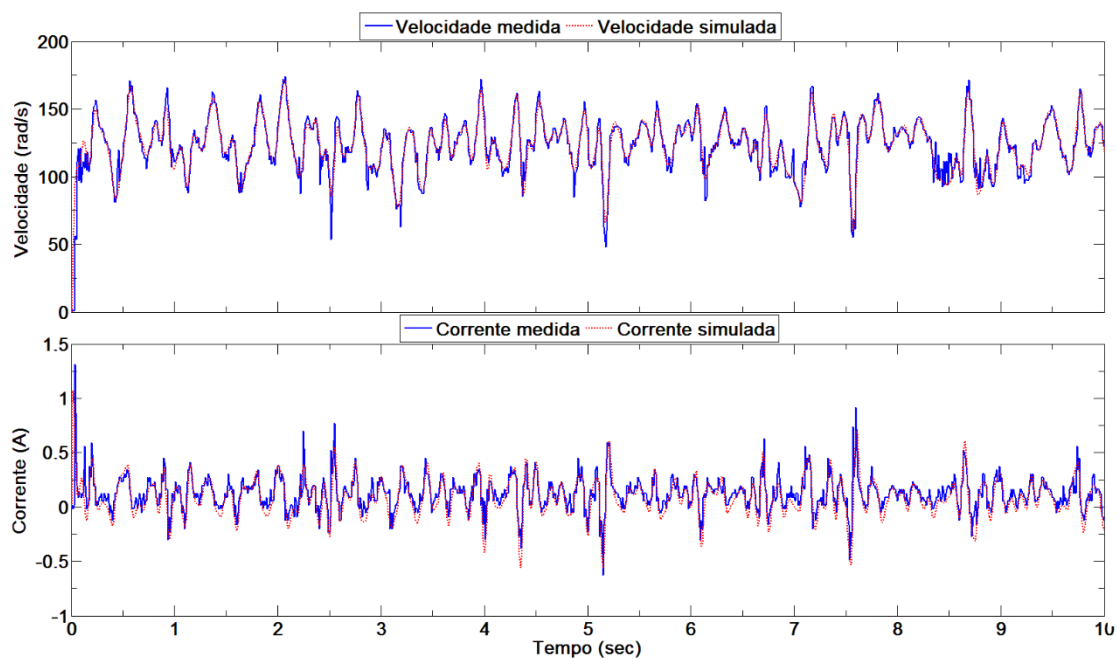
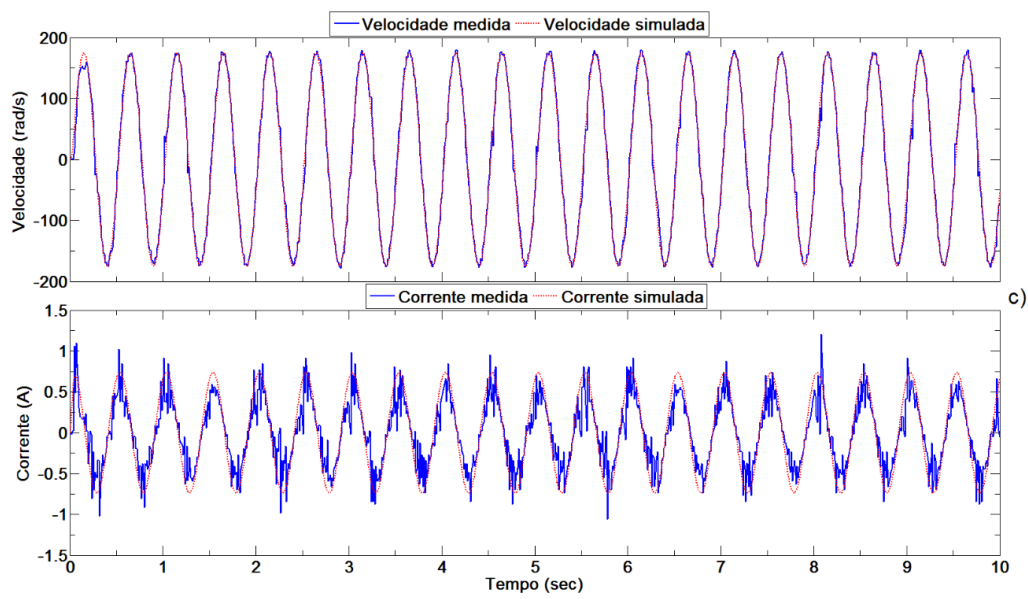
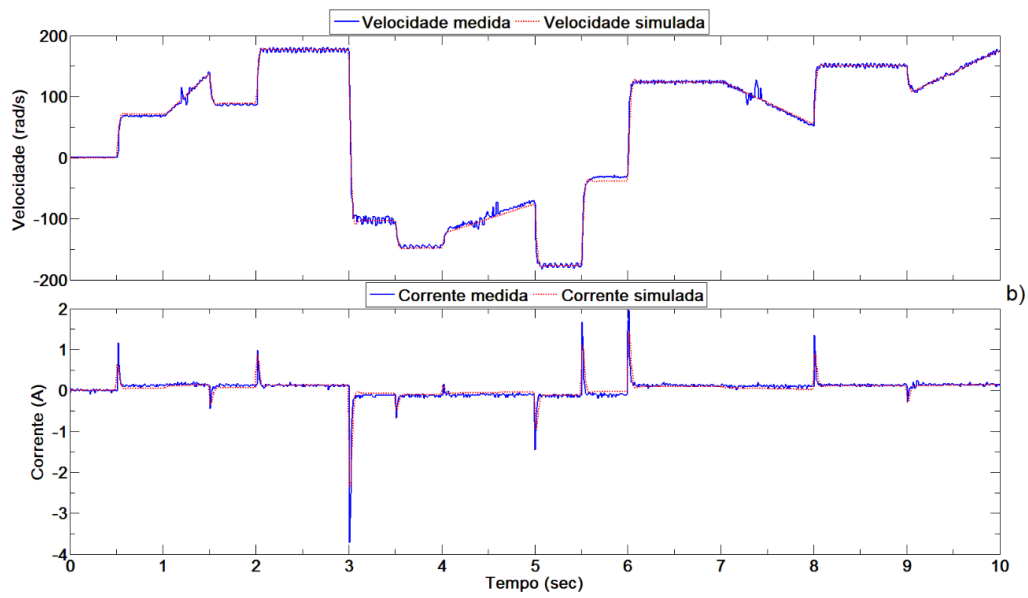
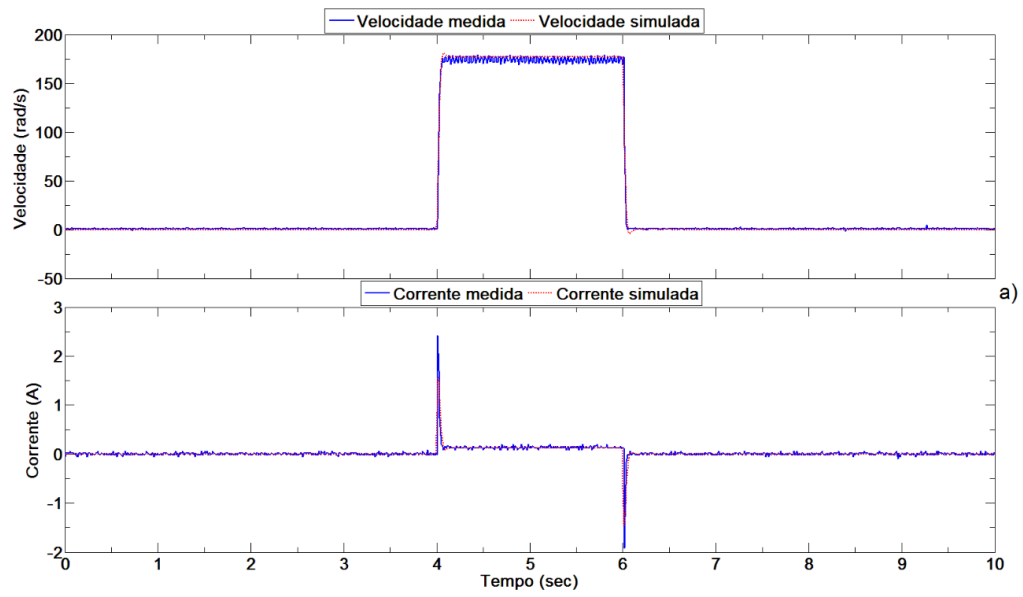


Figura 51 Ruído gaussiano - Resultados da estimação – velocidade e corrente



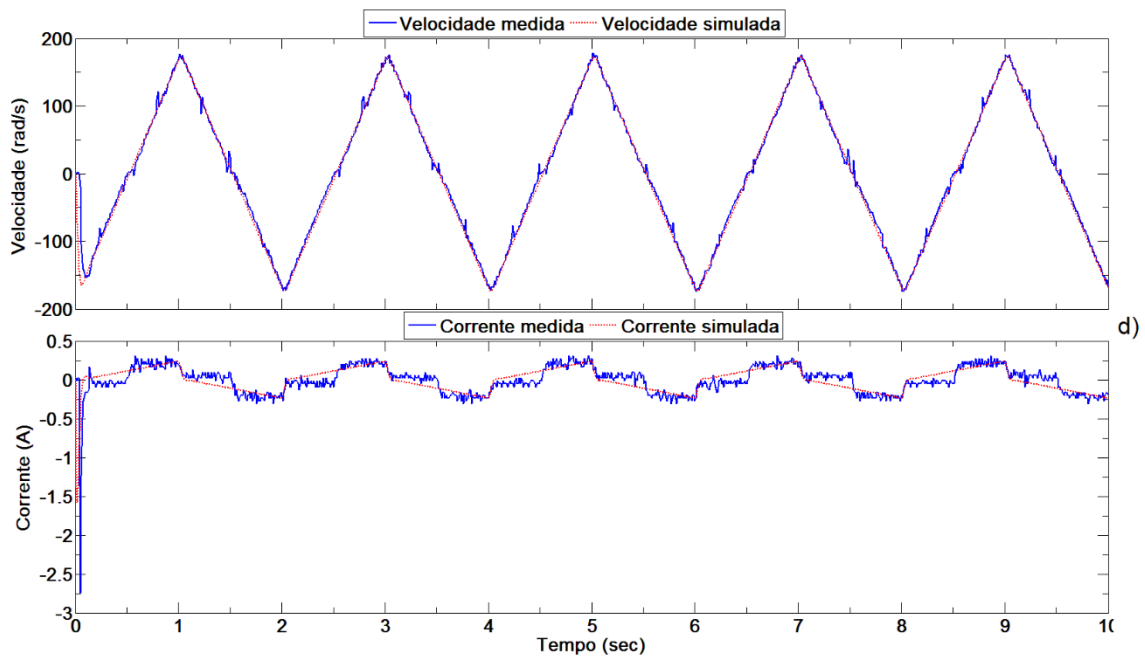


Figura 52 Ruído gaussiano - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.3.3. RUÍDO PSEUDOALEATÓRIO

É aplicado o sinal de ruído pseudoaleatório, apresentado pela Figura 39 c). Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 23. A Tabela 24 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 23 Ruído pseudoaleatório - Resultados da estimação – velocidade e corrente

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	+inf	$5,34e^{-5}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	0,1	0	+inf	$2,71e^{-5}$	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0680022	0,07	V.s/rad
La	0,1	0	+inf	0,0680111	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	1	0	+inf	6,117909	2,74	Ohms

Tabela 24 Ruído pseudoaleatório - Opções da estimação – velocidade e corrente

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001

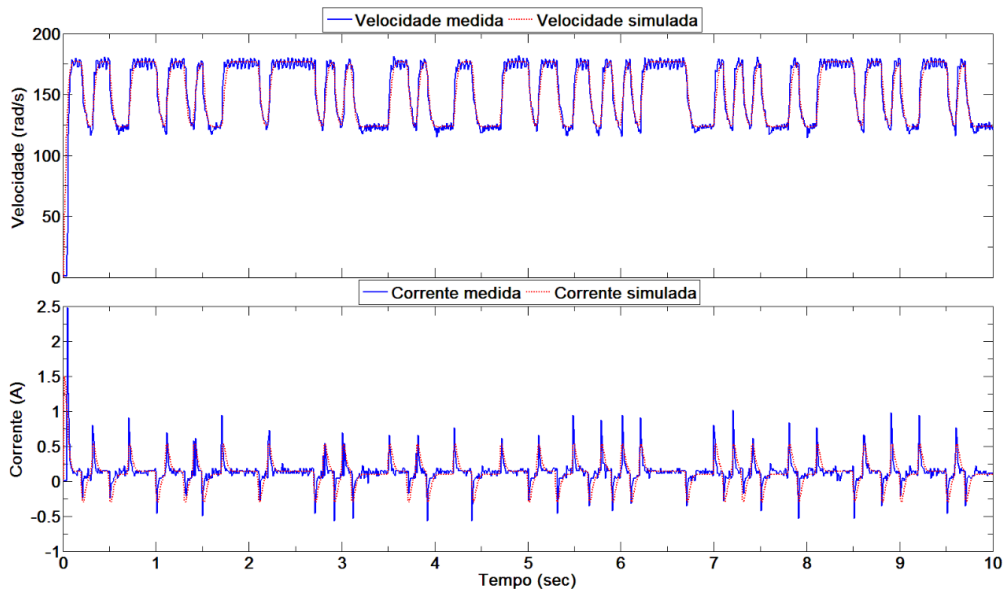
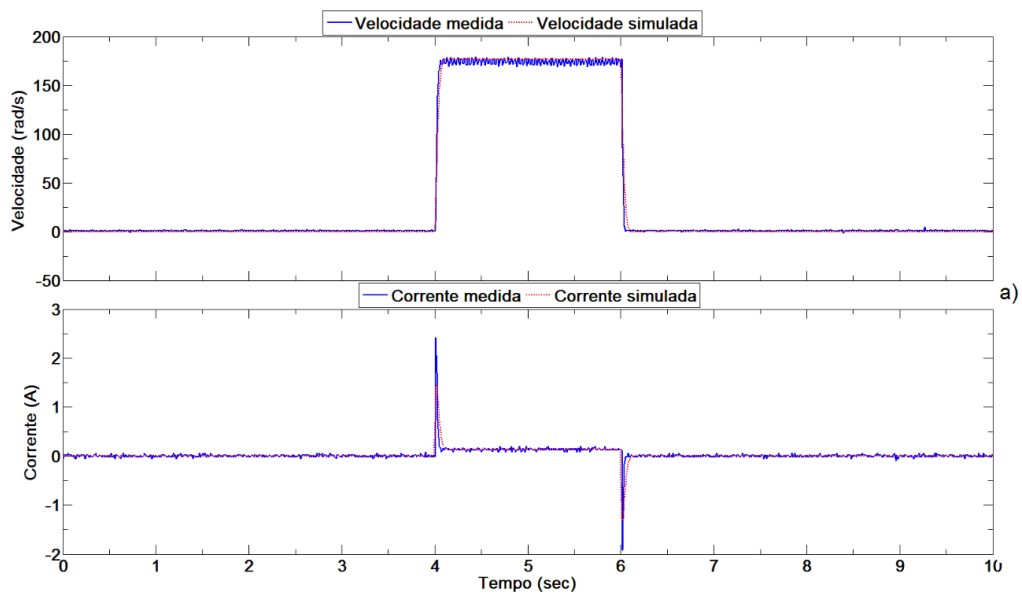


Figura 53 Ruído pseudoaleatório - Resultados da estimação – velocidade e corrente



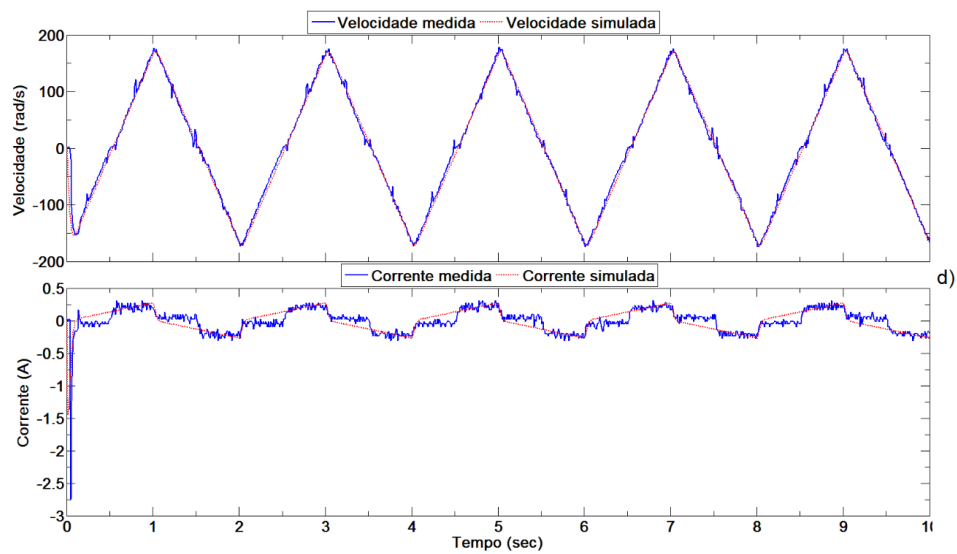
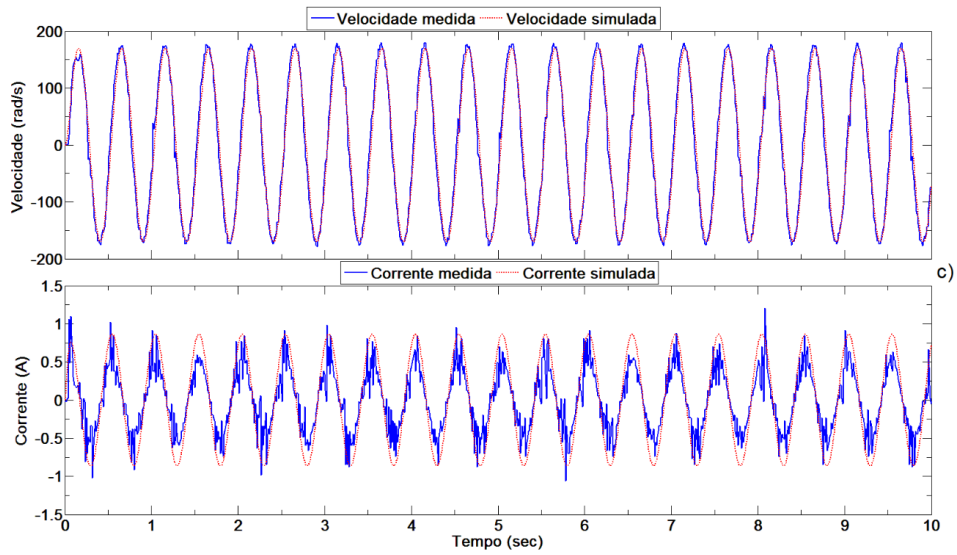
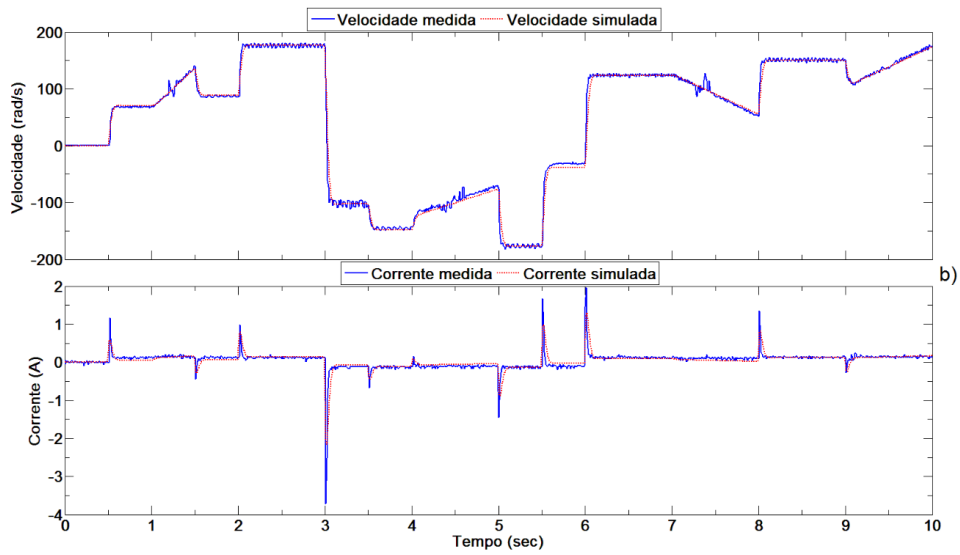


Figura 54 Ruído pseudoaleatório - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.3.4. SINAL COMPOSTO

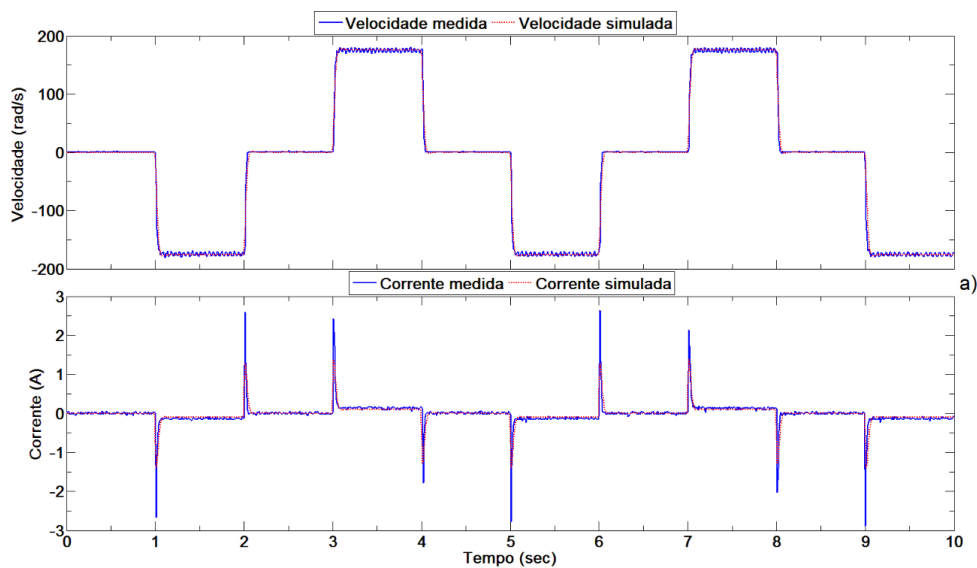
Este sinal usado na estimação é composto pelos três sinais anteriores em conjunto, apresentados pela Figura 39. Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 25. A Tabela 26 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

Tabela 25 Sinal composto - Resultados da estimação – velocidade e corrente

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	+inf	$3,95e^{-5}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	0,1	0	+inf	$2,05e^{-5}$	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,1	0	+inf	0,0693547	0,07	V.s/rad
La	0,1	0	+inf	0,0592094	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	1	0	+inf	6,2612948	2,74	Ohms

Tabela 26 Sinal composto - Opções da estimação – velocidade e corrente

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	$1e^{-11}$	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001



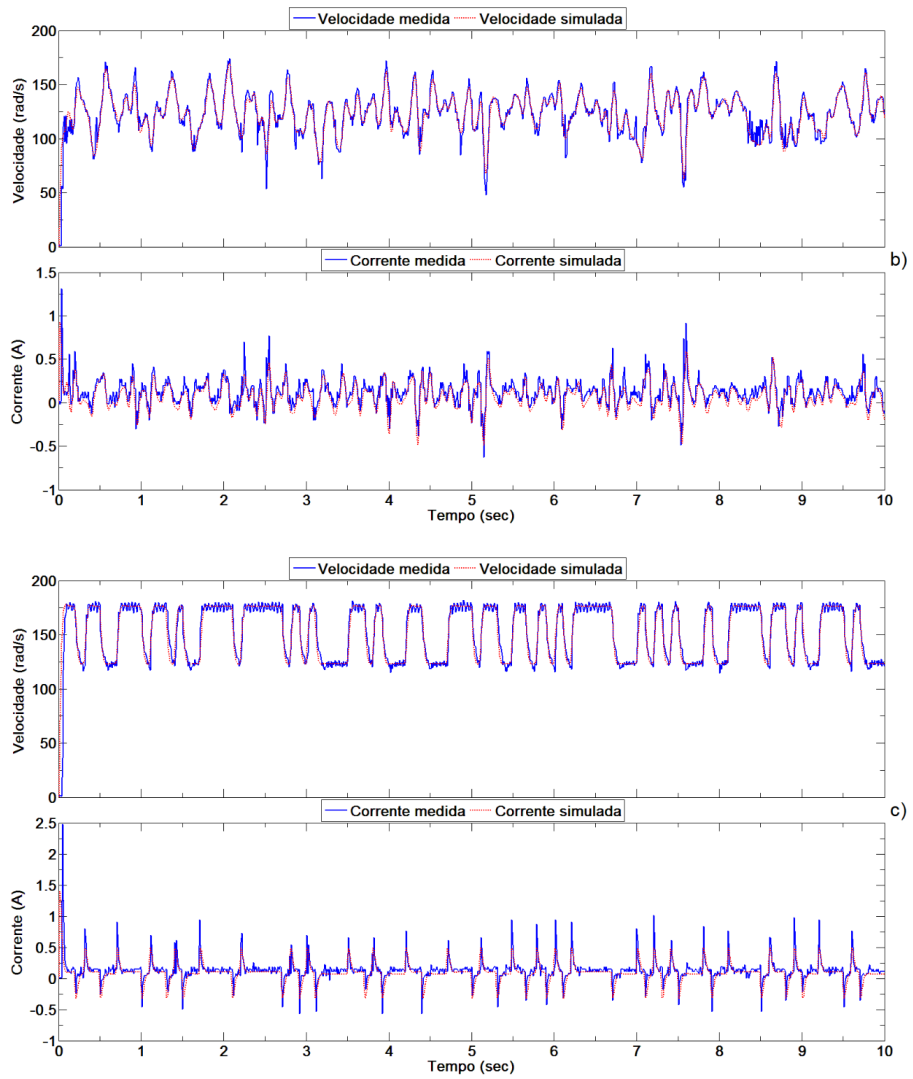
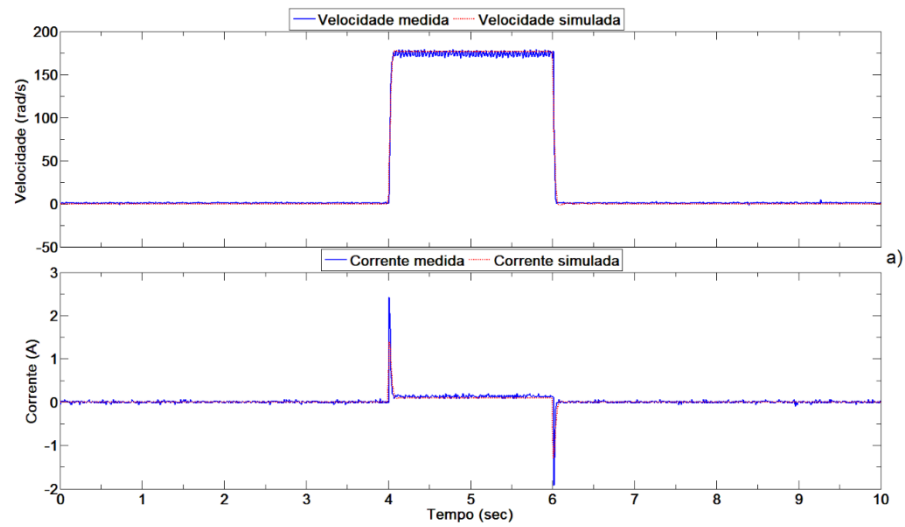


Figura 55 Sinal composto - Resultados da estimação – velocidade e corrente: a) onda quadrada, b) ruído gaussiano e c) ruído pseudoaleatório



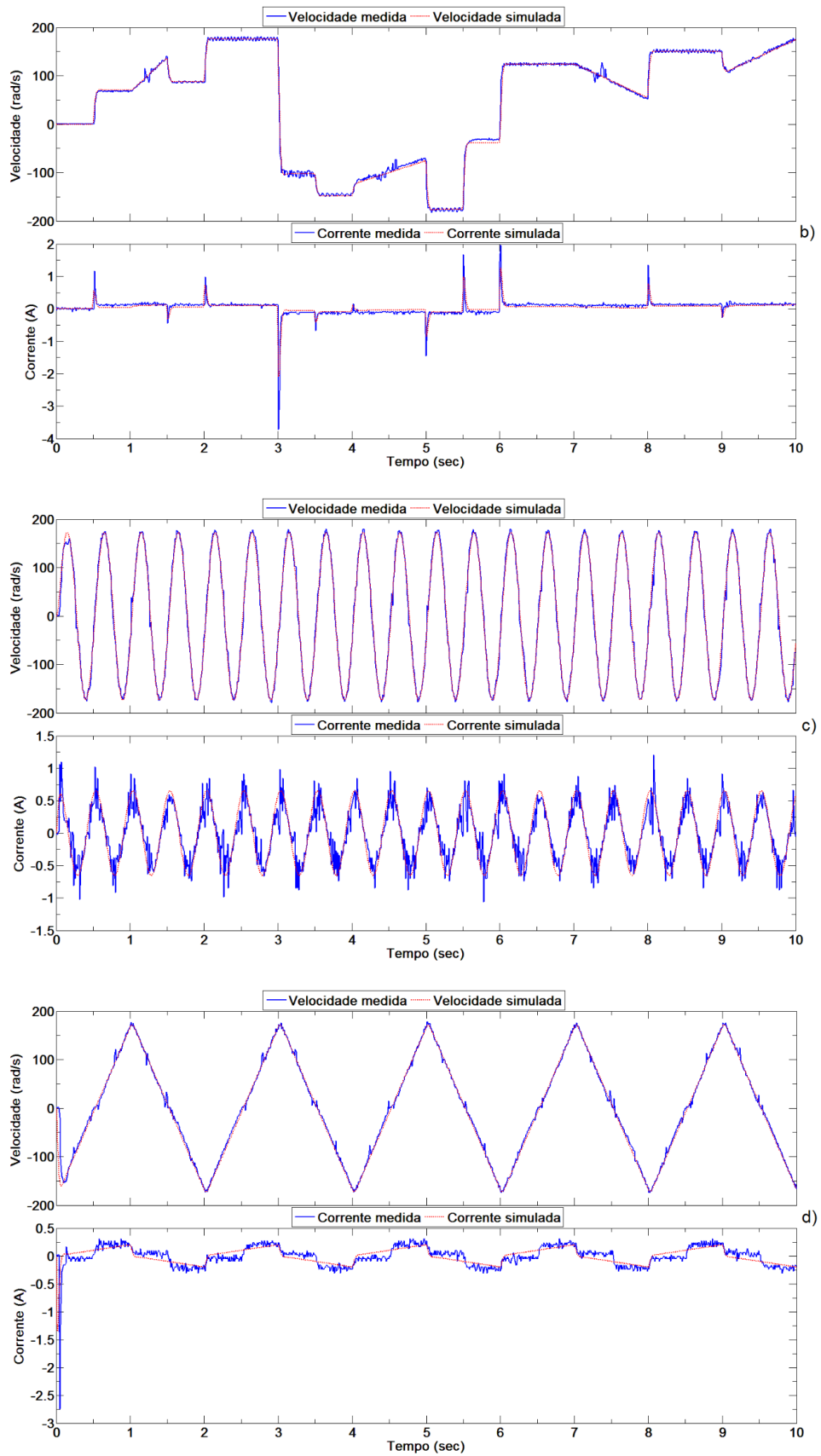


Figura 56 Sinal composto - Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

5.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em suma, relativamente às estimações obtidas, pode-se concluir que a estimação usando apenas as respostas de velocidade não é um método viável pois as respostas em corrente simuladas variam significativamente das respostas de corrente do sistema. Para projetar um sistema de controlo de velocidade em malha fechada, estes resultados são satisfatórios tendo em conta a precisão que os resultados apresentam relativamente às respostas em velocidade.

Relativamente aos valores dos parâmetros, a estimação usando apenas a resposta em velocidade não é viável pois os resultados tendem a variar bastante já que existem várias combinações de valores que atingem o mesmo resultado em termos de resposta em velocidade. Devido a este problema foi necessário impor limites de variação dos parâmetros, mais rígidos, e mesmo assim os parâmetros obtidos não são satisfatórios.

A Tabela 28 e a Figura 57 apresentam os resultados do cálculo da soma dos erros quadráticos normalizados para as estimações efetuadas a partir das respostas de velocidade obtidas para cada sinal de excitação, usando a seguinte expressão:

$$Erro = \sum \left(\frac{Resposta_{medida}(t) - Resposta(t)_{simulada}}{Valor\ máximo\ da\ Resposta_{medida}} \right)^2 \quad (44)$$

Como é possível verificar, existe uma enorme discrepância em termos do erro de corrente sendo que este resultado era esperado e apenas vem confirmar as conclusões obtidas através da observação e análise das respostas. O erro calculado apresenta resultados satisfatórios apenas para as respostas em velocidade isto deve-se ao facto das estimações se basearem apenas nesta resposta.

A Tabela 29 e a Figura 58 apresentam o cálculo da soma dos erros quadráticos normalizados para as estimações efetuadas a partir de ambas as respostas de velocidade e corrente. Como é possível verificar os valores do erro para a corrente são significativamente menores, já os valores do erro para a velocidade mantiveram-se relativamente semelhantes. A partir destes resultados conclui-se que os parâmetros obtidos, através da estimação de ambas as respostas, resultam numa melhor aproximação. É importante notar que neste caso as estimações convergem para aproximadamente os mesmos valores sem ser necessário a imposição de limites mínimos e máximos para quais os valores devem variar, o que não acontece no caso das estimações efetuadas apenas com recurso à resposta em velocidade.

A partir da média dos erros pode-se facilmente efetuar comparações entre os diferentes sinais usados para a estimação e comparar esses resultados com os resultados obtidos através dos valores dos parâmetros fornecidos pelo fabricante. Sendo assim é concluído que todas as estimações efetuadas com recurso a ambas as respostas de velocidade e corrente apresentam uma melhor aproximação relativamente aos dados fornecidos pelo fabricante. Pode-se também concluir que os resultados da estimação para o sinal composto são os mais precisos, no geral, para todos os sinais de validação. Ordenando os sinais de excitação por ordem decrescente de precisão nos resultados obtidos, tem-se, o sinal composto, o ruído gaussiano, a onda quadrada, e por fim o ruído pseudoaleatório.

Como é possível verificar, para o sinal de validação sinusoidal existe uma discrepância significativa no valor do erro calculado para a resposta em corrente. Este facto deve-se a uma variação contínua da amplitude pico-a-pico de tensão aplicada ao motor num menor intervalo de tempo comparativamente aos restantes sinais aplicados. Esta variação origina um aumento significativo nos valores da amplitude da resposta em corrente que em conjunto com o ruído e erro do sensor dão origem a valores significativamente mais elevados para o erro calculado.

Por fim, relativamente aos parâmetros obtidos, foi encontrado um resultado que aparenta ser uma discrepância, este parâmetro é a indutância dos enrolamentos do motor que em todos os casos apresenta um valor de pelo menos 10 vezes maior do que o valor anunciado pelo fabricante. A Tabela 27 apresenta os valores finais dos parâmetros obtidos que resultam na melhor aproximação das respostas simuladas com as respostas do sistema real, que correspondem à estimação com as respostas de velocidade e corrente para o sinal composto.

Tabela 27 Parâmetros obtidos

Parâmetros obtidos		Parâmetros do fabricante	Unidades
B	$3,95e^{-5}$	$1,14e^{-5}$	Nm.s/rad
J	$2,05e^{-5}$	$1,62e^{-5}$	Kg.m ²
Ke	0,0693547	0,07	V.s/rad
La	$5,92094e^{-2}$	$4,05e^{-3}$	Henry
Ra	6,2612948	2,74	Ohms

Tabela 28 Cálculo dos erros quadráticos para estimações apenas a partir de dados de velocidade

Estimação apenas com dados de velocidade					
	Sinal de validação	Erro de velocidade	Erro de corrente	Soma dos erros	Média dos erros
Parâmetros do fabricante	Pulso	2,374774	4,820954	7,20	21,03
	Sinal variável	4,156641	4,478197	8,63	
	Seno	22,105756	35,688697	57,79	
	Sinal triangular	6,834930	3,665731	10,50	
Onda quadrada	Pulso	0,273413	196,701583	196,97	3557
	Sinal variável	0,814402	210,882334	211,70	
	Seno	3,164133	13598,022	13601,19	
	Sinal triangular	3,361750	216,897388	220,26	
Ruído gaussiano	Pulso	0,259500	228,333994	228,59	4729
	Sinal variável	0,887923	246,933449	247,82	
	Seno	2,286685	18164,916199	18167,20	
	Sinal triangular	3,038410	270,669527	273,71	
Ruído pseudoaleatório	Pulso	0,475438	333,687754	334,16	9076
	Sinal variável	1,808876	364,179342	365,99	
	Seno	8,969492	35117,740650	35126,71	
	Sinal triangular	2,482813	477,320636	479,80	
Sinal composto	Pulso	0,254458	337,588260	337,84	5182
	Sinal variável	0,915770	364,567128	365,48	
	Seno	2,408701	19596,002203	19598,41	
	Sinal triangular	2,853817	426,625329	429,48	

Tabela 29 Cálculo dos erros quadráticos para estimações a partir de dados de velocidade e corrente

Estimação com dados de velocidade e corrente					
	Sinal de validação	Erro de velocidade	Erro de corrente	Soma dos erros	Média dos erros
Parâmetros do fabricante	Pulso	2,374774	4,820954	7,20	21,03
	Sinal variável	4,156641	4,478197	8,63	
	Seno	22,105756	35,688697	57,79	
	Sinal triangular	6,834930	3,665731	10,50	
Onda quadrada	Pulso	0,274298	1,557339	1,83	13,85
	Sinal variável	0,814254	1,512538	2,33	
	Seno	3,180738	40,777068	43,96	
	Sinal triangular	3,368636	3,910476	7,28	
Ruído gaussiano	Pulso	0,260698	1,087192	1,35	11,6575
	Sinal variável	0,888877	1,049702	1,94	
	Seno	2,287736	35,313683	37,60	
	Sinal triangular	3,041638	2,695946	5,74	
Ruído pseudoaleatório	Pulso	0,474457	1,251691	1,73	19,08
	Sinal variável	1,807065	1,364897	3,17	
	Seno	8,934856	57,446104	66,38	
	Sinal triangular	2,481325	2,558568	5,04	
Sinal composto	Pulso	0,254199	1,067426	1,32	9,09
	Sinal variável	0,915475	1,118190	2,03	
	Seno	2,408893	25,154726	27,56	
	Sinal triangular	2,853010	2,594957	5,45	

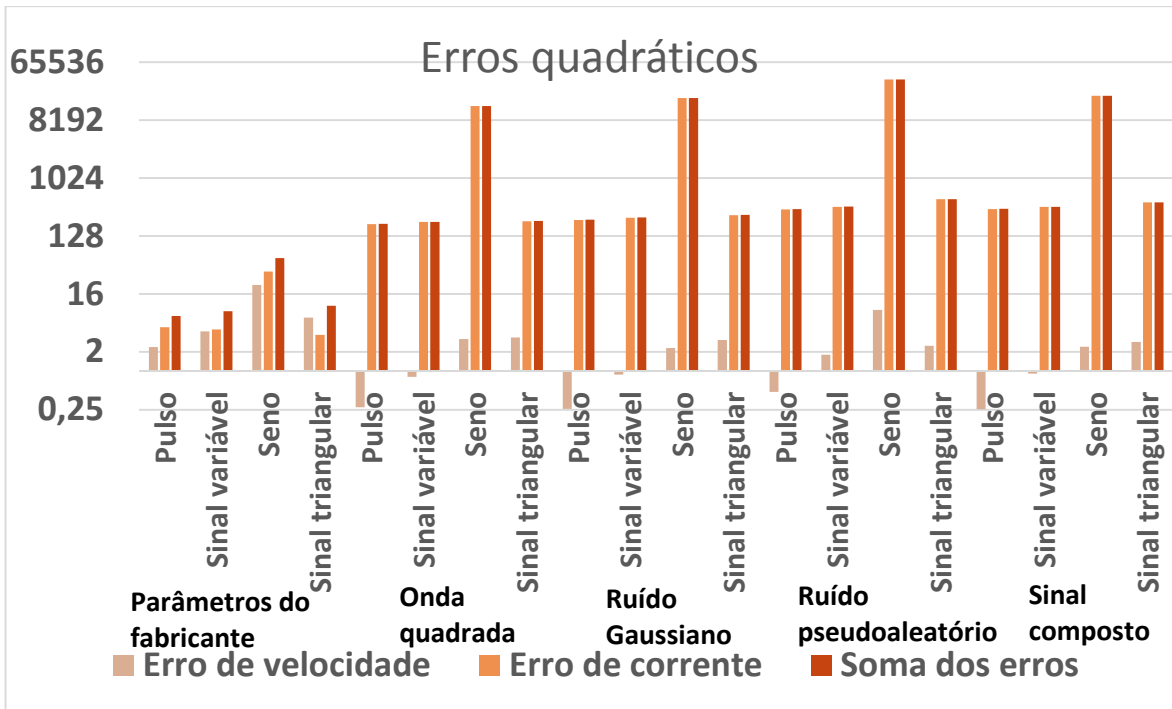


Figura 57 Cálculo dos erros quadráticos (em escala logarítmica de base 2) para estimações apenas a partir de dados de velocidade

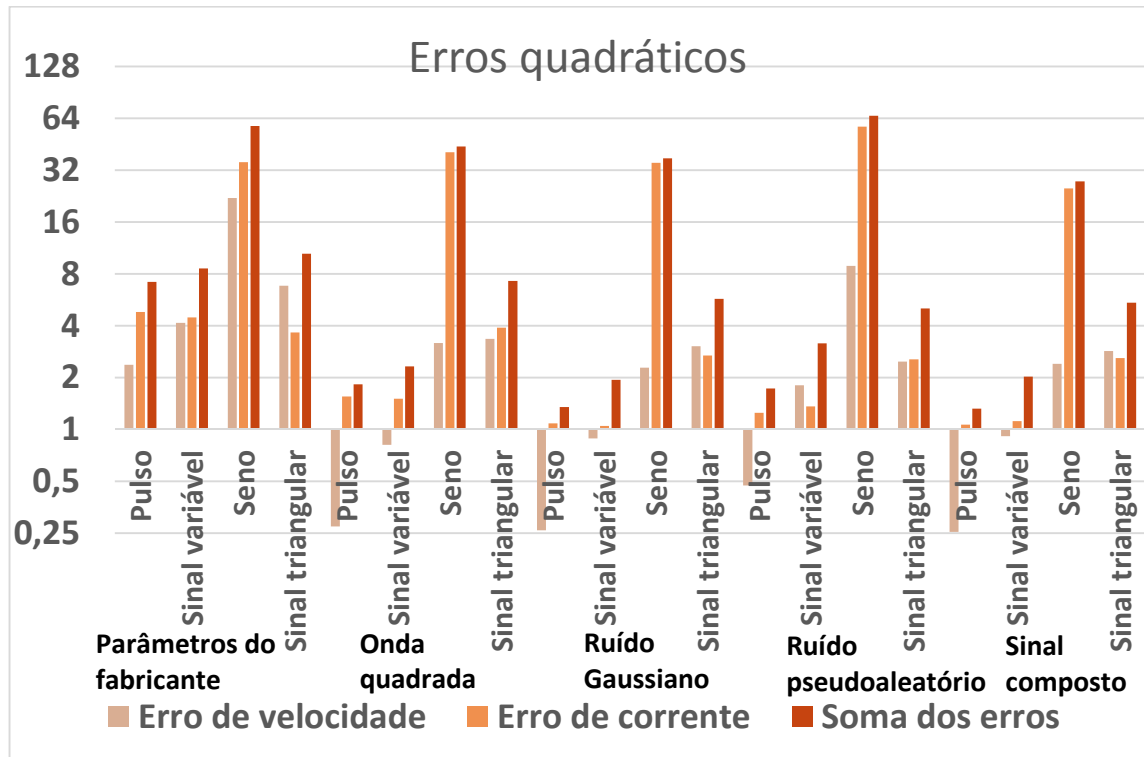


Figura 58 Cálculo dos erros quadráticos (em escala logarítmica de base 2) para estimações a partir de dados de velocidade e corrente

6. MODELO NÃO LINEAR

O modelo linear poderá apresentar uma boa robustez nos casos em que é usada apenas uma direção de rotação. Noutras palavras, desde que o intervalo de velocidades de rotação usado pelo sistema exclua o ponto de velocidade zero, o modelo linear pode ser usado para representar o comportamento do sistema e, a partir deste, identificar e controlar o sistema, neste caso o motor DC. Os principais efeitos não lineares no motor DC são respetivamente, o atrito de Coulomb e a zona morta (para uma gama de tensões aplicadas o motor não roda), estes podem ser aproximados através de modelos lineares no caso em que o motor rode apenas numa única direção e a sua velocidade seja suficientemente elevada para que não sofra os efeitos das não linearidades. No entanto, se o sistema rodar nos dois sentidos, e passar pelo ponto de velocidade zero, as não linearidades terão um efeito significativo na resposta do sistema e não poderão ser expressas através de modelos lineares [14] [15]. Uma consequência deste problema é a falta de precisão e fiabilidade nas respostas obtidas. A utilização de um modelo não linear do motor DC permite a simulação deste para qualquer velocidade e ao mesmo tempo não comprometendo a fiabilidade dos resultados obtidos. Sendo assim, é de esperar que os valores dos parâmetros obtidos através da estimação sejam mais precisos e as respostas simuladas ainda mais próximas das respostas reais do sistema.

Neste capítulo é estudado e aplicado um modelo não linear do motor DC. Este modelo irá incluir o atrito de Coulomb no processo de estimação.

6.1. ATRITO DE COULOMB

O modelo do atrito de Coulomb (ver Figura 59) considera que a força de atrito se opõe ao sinal da velocidade do rotor. A magnitude do atrito de Coulomb é independente de fatores como velocidade e superfície de contato. Considerando F_c como sendo o coeficiente de atrito de Coulomb e T_f o torque gerado pela força de atrito de Coulomb e ω a velocidade do rotor do motor, o atrito de Coulomb pode ser expresso através de uma função sinal que depende da velocidade do motor, da seguinte forma [16]:

$$T_f(\omega) = F_c * \text{sgn}(\omega) \quad (45)$$

A função sinal, $\text{sgn}(\omega)$, é definida como [17]:

$$\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega > 0 \\ 0 & \omega = 0 \\ -1 & \omega < 0 \end{cases} \quad (46)$$

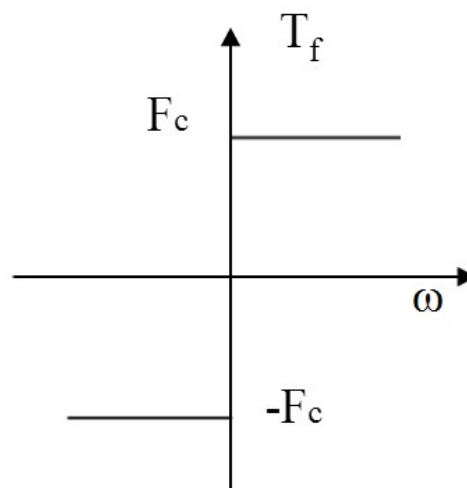


Figura 59 Modelo não linear do atrito de Coulomb

Este tipo de não linearidade tem maior influência para baixas velocidades de rotação do rotor do motor. Incluir este fenômeno no modelo do motor DC é uma forma de estimar os parâmetros do motor com maior precisão e ao mesmo tempo obter um modelo com uma maior aproximação ao sistema real. A Figura 60 apresenta a não linearidade medida do sistema. Neste caso a não linearidade ocorre entre os -1,2 V e 1,3 V da tensão aplicada.

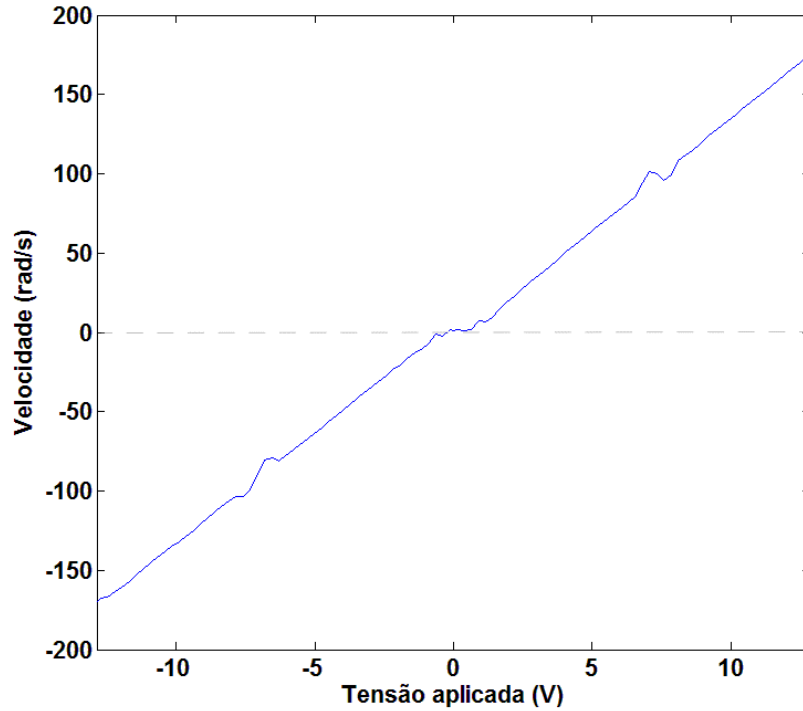


Figura 60 Zona não linear do motor DC

6.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

As equações mecânicas diferem das equações calculadas no capítulo 2 através da adição do efeito de Coulomb. Analisando o sistema, pode-se concluir que a soma dos torques do motor deve ser nula, assim:

$$T_e - T_{\omega'} - T_{\omega} - T_c - T_f = 0 \quad (47)$$

Substituindo as equações (7), (8), (9) e (45) na equação (47), obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$K_t I_a - J \frac{d}{dt} \omega - B\omega - T_c - F_c * \text{sgn}(\omega) = 0 \quad (48)$$

Sendo que, T_f representa o torque de atrito de Coulomb e F_c o coeficiente de atrito de Coulomb. Os restantes símbolos utilizados nas equações dinâmicas do motor encontram-se descritos na Tabela 2.

6.3. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO NÃO LINEAR

O diagrama de blocos para este sistema pode ser obtido através de equações diferenciais, que são representadas pelas expressões (49) e (50).

$$\frac{d}{dt} I_a = -\frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_e}{L_a} \omega + \frac{V_a}{L_a} \quad (49)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{K_t}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_c}{J} - \frac{F_c * \text{sgn}(\omega)}{J} \quad (50)$$

O diagrama de blocos do motor DC é apresentado na Figura 61. Este diagrama é implementado no Simulink e usado na estimação dos parâmetros. Como é possível concluir, o modelo não linear é semelhante ao modelo linear, sendo as suas únicas diferenças a adição do fenómeno do atrito de Coulomb e um bloco de zona morta que permite uma melhor detecção do ponto zero de velocidade requerido pelo bloco ‘Sign’ que representa a função sinal descrita na equação (46).

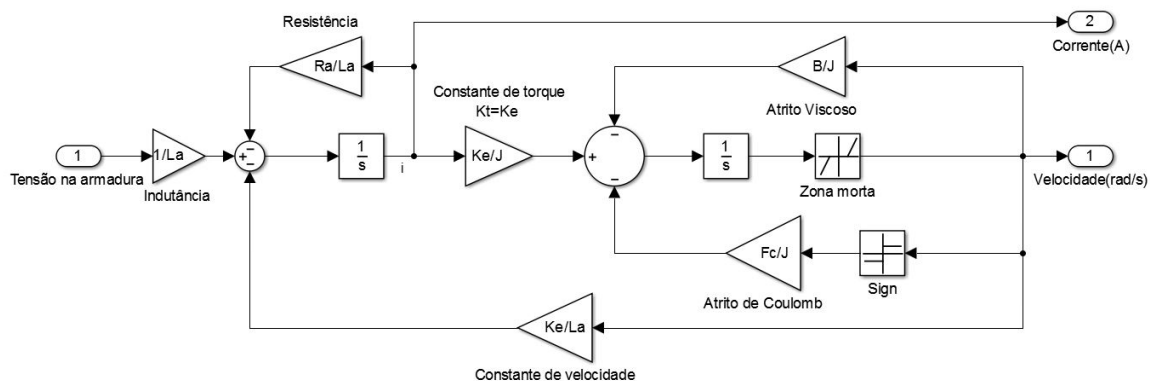
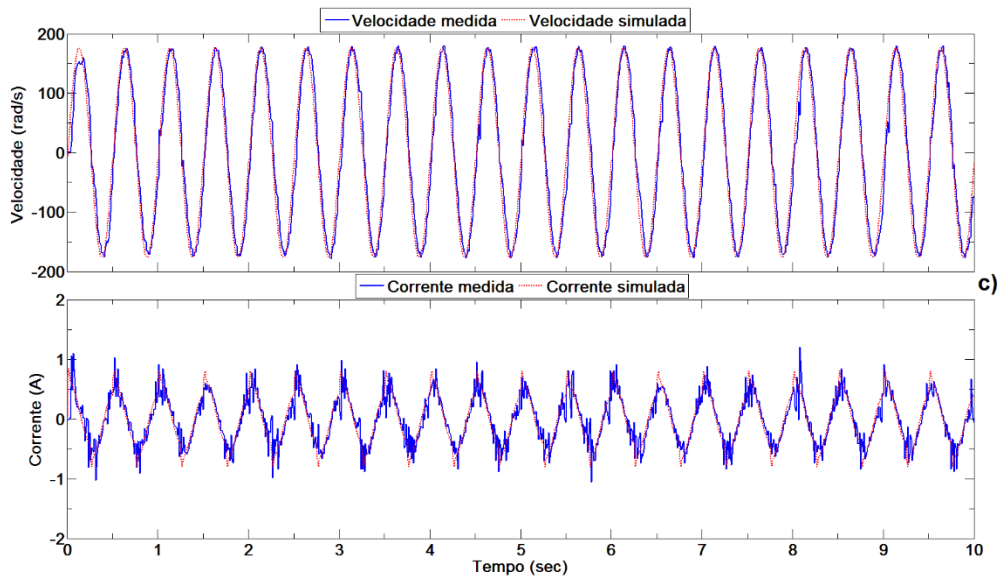
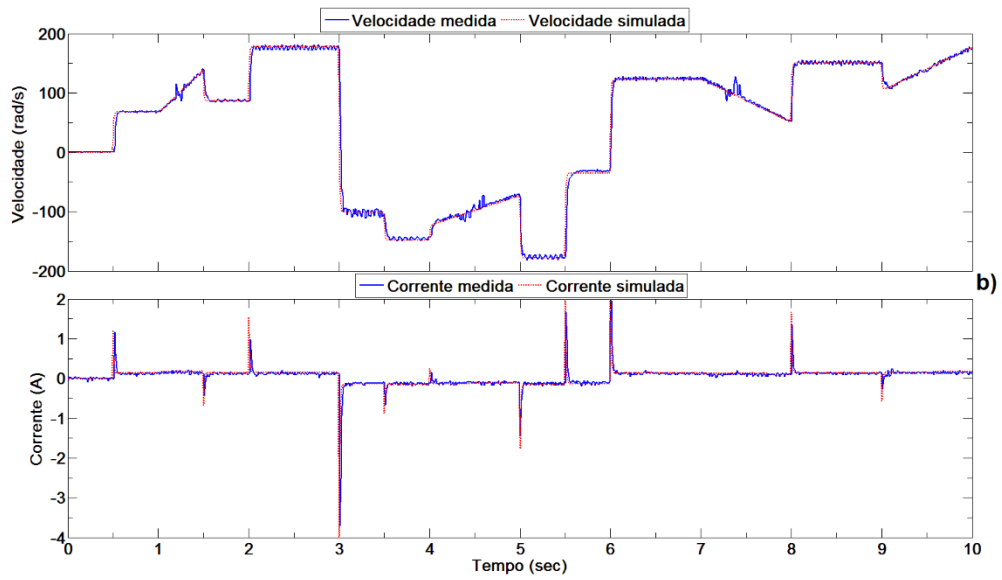
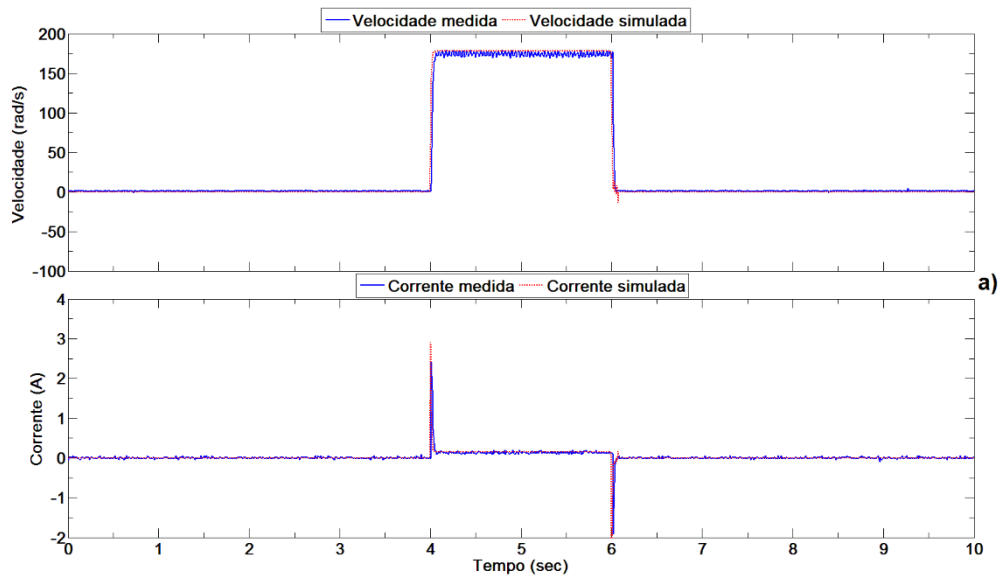


Figura 61 Diagrama de blocos do modelo não linear do motor DC

6.4. RESULTADOS PARA OS DADOS DO FABRICANTE

Os parâmetros disponibilizados pelo fabricante (ver Tabela 4) são aplicados ao modelo do sistema no Simulink (ver Figura 61), e os resultados comparados aos dados obtidos do sistema real. A Figura 62 apresenta as respostas obtidas usando os parâmetros do fabricante para diferentes sinais de validação. A resposta em corrente para os valores fornecidos pelo fabricante melhoraram para o modelo não linear. Relativamente à resposta em velocidade a melhoria não é tão significativa.



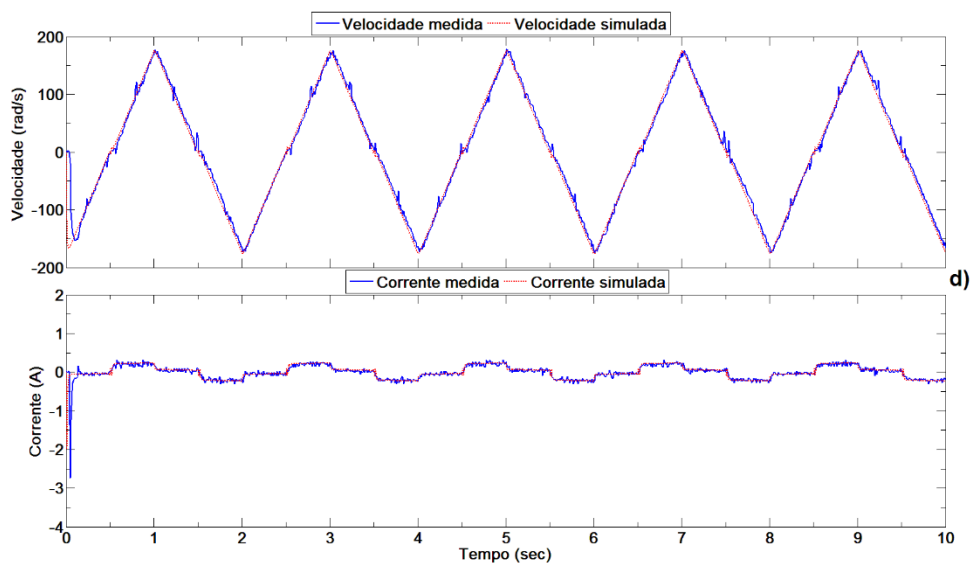


Figura 62 Resultados do modelo para os parâmetros do fabricante para os diferentes tipos de excitação: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

6.5. ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

Nesta secção é efetuada a estimação dos parâmetros para o modelo não linear, resultando na obtenção de novos valores de parâmetros que serão usados para gerar respostas simuladas do sistema real. Estas respostas são comparadas com as respostas obtidas através do modelo linear para os valores estimados e são também comparadas com as respostas simuladas através do modelo linear para os parâmetros fornecidos pelo fabricante. Por fim é determinado se o modelo não linear é mais preciso que o linear. Em teoria, para sinais que impliquem baixas velocidades de rotação, este modelo não linear deverá maximizar a precisão dos resultados obtidos em comparação ao modelo linear, sendo que quanto maior for o coeficiente de atrito de Coulomb, ou quanto menor for a velocidade de rotação mais facilmente se deverá observar este fenómeno nas respostas de velocidade e de corrente. No diagrama de blocos (ver Figura 61) foi adicionada uma zona morta com um intervalo mínimo, de -0.01 a 0.01, com a finalidade de permitir ao bloco Sign uma melhor deteção do ponto de zero velocidade que resulta numa melhor aproximação. Este valor escolhido não afeta a resposta em velocidade pois a velocidade mínima do motor não atinge valores inferiores a 1 rad/s.

Nesta secção a ferramenta de estimação de parâmetros não é usada pois não permite a flexibilidade necessária, resultando em valores de parâmetros não satisfatórios. Sendo assim é usado o interface gráfico desenvolvido pois torna o processo de estimação uma tarefa mais simples e automatizada e ao mesmo tempo permite uma maior customização das opções de estimação. O motivo que levou ao uso da interface desenvolvida foi o facto da função custo usada pela ferramenta de estimação de parâmetros para calcular o erro entre as respostas não normalizar o erro calculado. Sendo assim é usada uma função custo que normaliza os erros obtidos e desta forma o erro é calculado como uma percentagem do valor máximo do sinal. Na ferramenta de estimação de parâmetros do Simulink a função custo não é customizável e a normalização não é usada.

Este facto veio explicar o porquê da ferramenta primeiro efetuar uma aproximação aos valores da resposta em velocidade e apenas numa segunda estimação aproximar os valores de corrente. Um erro equivalente a 1% do valor de velocidade poderá atingir um valor absoluto de 1,75, enquanto um erro equivalente a 1% do valor da resposta em corrente poderá atingir um valor absoluto de 0,03. Tendo em conta que o algoritmo tenta reduzir este erro, os valores dos parâmetros escolhidos são os que, primeiramente, aproximam a resposta em velocidade, visto que inicialmente esta resulta em valores de erro mais elevados. Apenas numa segunda estimação, a partir dos valores obtidos, a resposta em corrente é aproximada, pois a resposta em velocidade já se encontra próxima da resposta em velocidade do sistema real. A normalização de ambos os erros vem igualar este valor de erro, sendo que 1% de erro na resposta em velocidade é agora equivalente a 1% de erro na resposta em corrente.

Após esta conclusão e mudança de função custo, ambas as respostas são obtidas na primeira estimação com resultados satisfatórios. A normalização dos erros no processo de estimação não vem afetar os resultados com o modelo linear pois este converge, em geral, depois de duas estimações utilizando a ferramenta de estimação de parâmetros do Simulink. Este facto é evidente na estimação usando o modelo não linear já que este permite uma maior definição na resposta em corrente, o que não acontece com o modelo linear. O interface gráfico desenvolvido encontra-se no Anexo D.

O sinal de excitação usado para estimação com o modelo não linear do motor DC é composto pela combinação dos sinais apresentados na Figura 63 resultando num sinal com uma duração de 20 segundos.

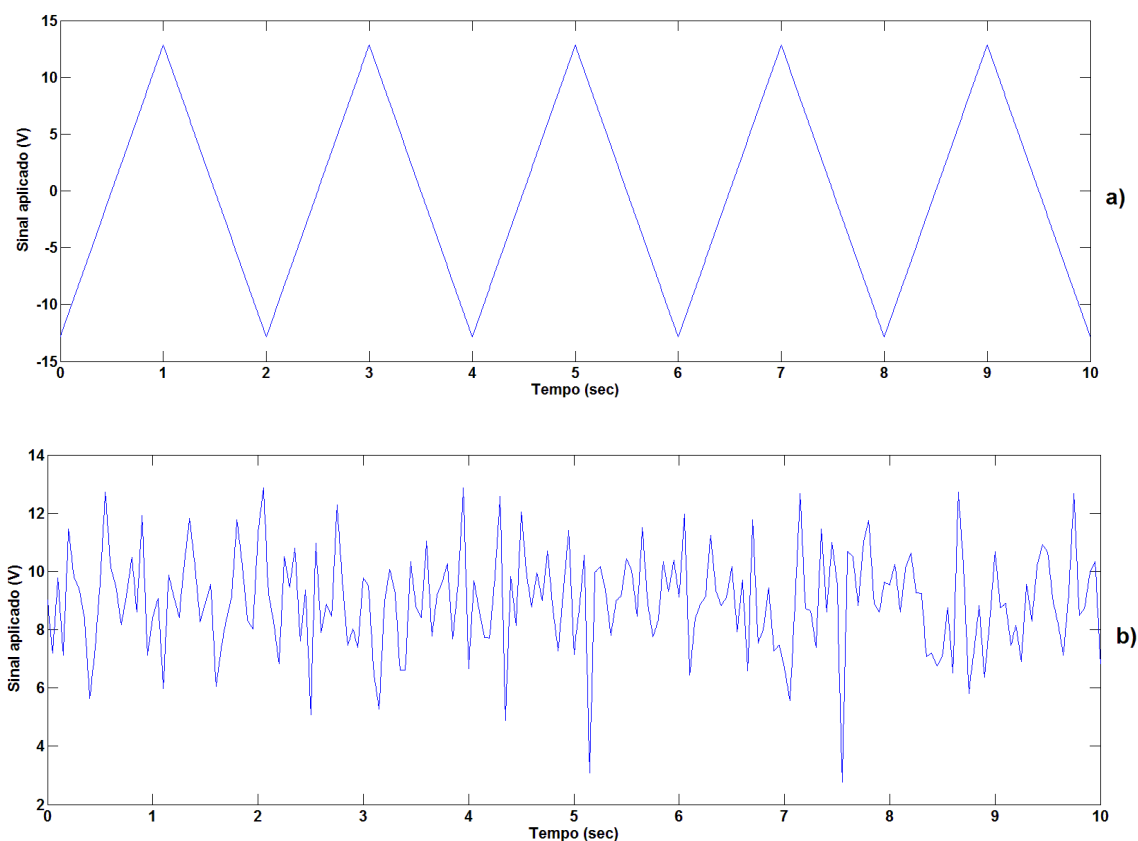


Figura 63 Sinais usados na estimação para o modelo não linear do motor

6.5.1. RESULTADOS OBTIDOS

As seguintes experiências são realizadas com recurso a um sinal de excitação que é composto por dois sinais diferentes. Cada um destes sinais é responsável por excitar o motor de uma certa forma. O primeiro sinal, uma onda triangular, cuja resposta em velocidade passa pela zona não linear do motor devido ao atrito de Coulomb. A segunda onda é responsável por gerar mudanças rápidas de velocidade e picos de corrente no motor. Os valores e intervalos usados nas opções dos parâmetros, bem como os valores dos parâmetros obtidos encontram-se representados na Tabela 30. A Tabela 31 apresenta as opções da estimação usadas, que resultaram nos parâmetros obtidos.

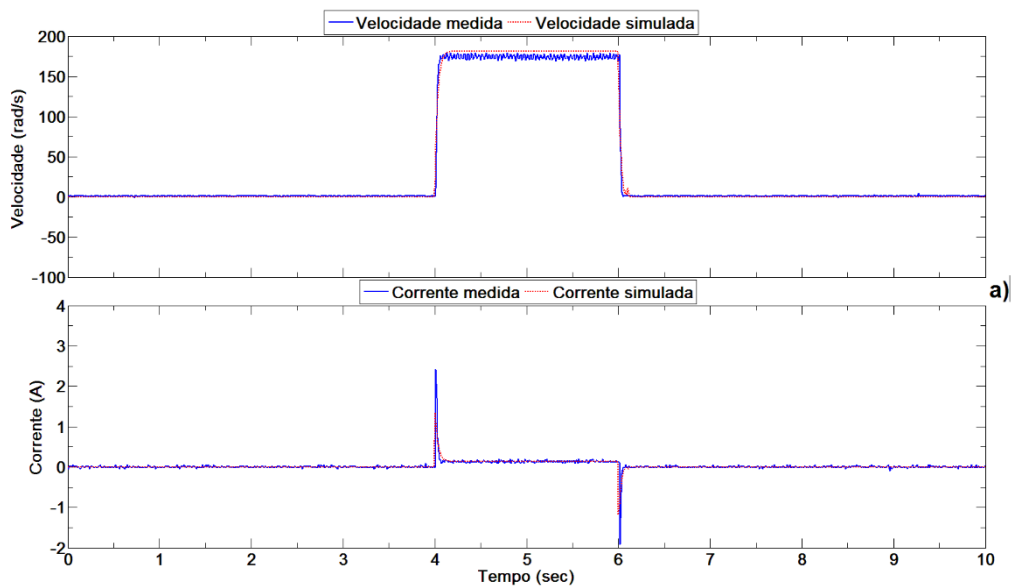
A Figura 64 apresenta as respostas obtidas do sistema real e simulado a partir dos sinais de validação. Como é possível reparar, a resposta em velocidade apresenta um resultado bastante satisfatório para todos os sinais de validação, semelhante aos resultados obtidos para o modelo linear. Relativamente à resposta em corrente esta apresenta uma melhoria notável relativamente às respostas de corrente obtidas através do modelo linear.

Tabela 30 Resultados da estimação – velocidade e corrente

Parâmetros Iniciais		Valor Min	Valor Max	Parâmetros obtidos	Parâmetros do fabricante	Unidades
B	0,1	0	+inf	8,678959e ⁻⁶	1,14e ⁻⁵	Nm.s/rad
J	0,1	0	+inf	1,70468534e ⁻⁵	1,62e ⁻⁵	Kg.m ²
Fc	0.1	0	+inf	0,007160512	0.0085	Nm
Ke	0,1	0	+inf	0,065083616	0,07	V.s/rad
La	0,1	0	+inf	0,007497736	4,05e ⁻³	Henry
Ra	1	0	+inf	7,8202030	2,74	Ohms

Tabela 31 Opções da estimação – velocidade e corrente

Opções da estimação			
<i>Diff max change</i>	0,1	<i>Max fun evals</i>	400
<i>Diff min change</i>	1e ⁻¹¹	<i>Max iterations</i>	100
<i>Parameter tol</i>	0,00001	<i>Function Tol</i>	0,00001



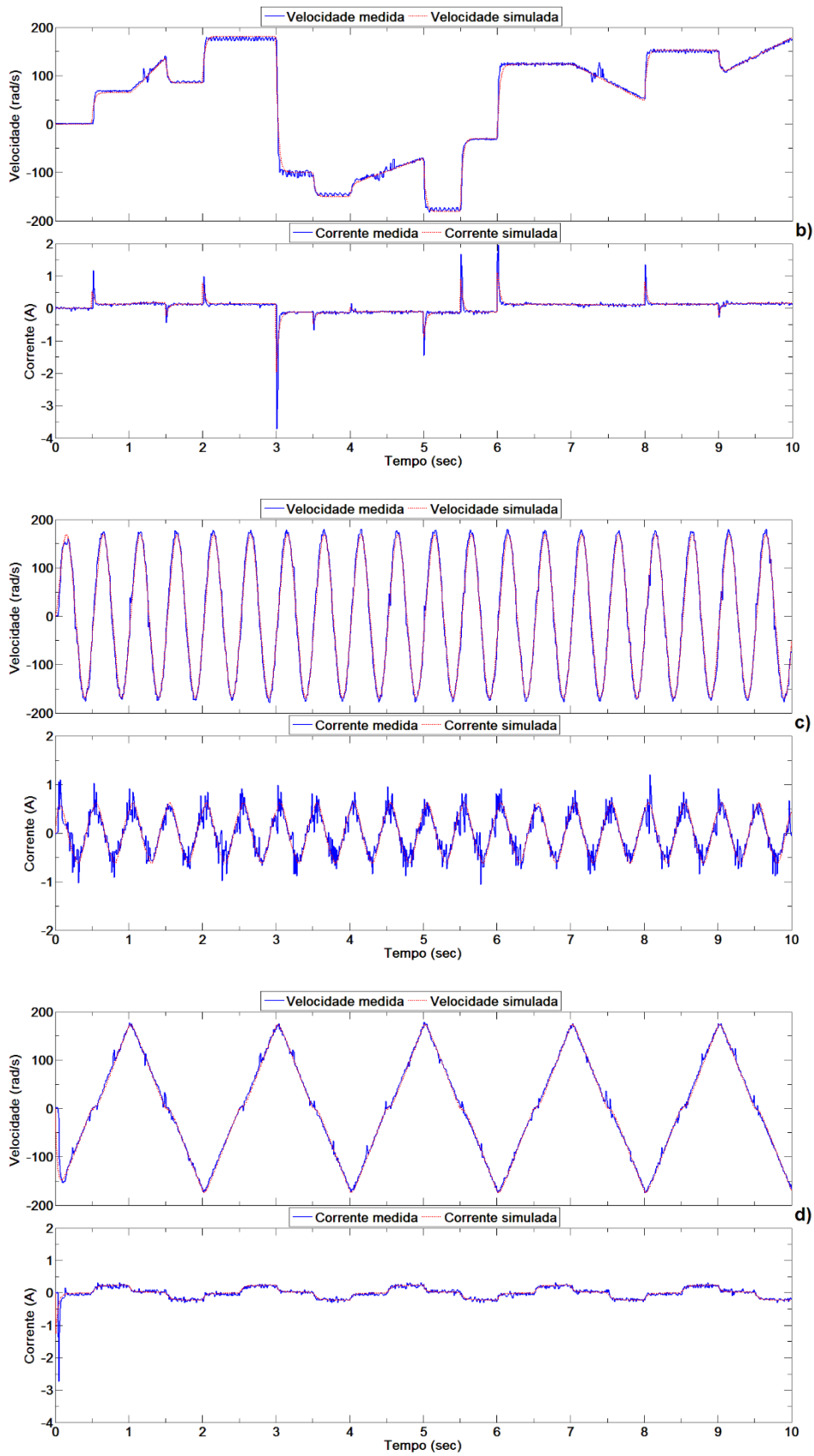


Figura 64 Validação da estimação – velocidade e corrente: a) Pulso, b) Sinal variado, c) Onda sinusoidal e d) Onda triangular

6.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os parâmetros estimados apresentam bons resultados como é possível verificar através da Tabela 30. O atrito viscoso e a resistência dos enrolamentos do motor apresentam valores mais distantes dos valores fornecidos pelo fabricante relativamente aos valores dos restantes parâmetros estimados. Observando os sinais de validação para ambos os parâmetros do fabricante e parâmetros estimados (Figura 62 e Figura 64) é possível observar que os parâmetros estimados resultam num tempo de resposta do sistema ligeiramente superior, resultando assim em valores de parâmetros diferentes. É de notar que os valores dos parâmetros fornecidos pelo fabricante não resultam na melhor aproximação e assim os valores dos parâmetros estimados não têm necessariamente que ser os mesmos.

A Tabela 32 e a Figura 65 apresentam o cálculo da soma dos erros quadráticos normalizados para as estimações efetuadas para o modelo não linear e a partir de ambas as respostas de velocidade e corrente. Em ambas as simulações com os valores do fabricante e valores estimados, pode-se concluir que no geral para os sinais de validação a precisão aumentou devido à média dos erros ser mais baixa. No entanto para certos sinais de validação este erro foi maior mas em comparação ao modelo linear as respostas em corrente aproximam-se melhor à dinâmica do sistema real, como se pode verificar através da Figura 67, cujas respostas são obtidas através da simulação para o sinal de excitação apresentado pela Figura 66 e para os mesmos valores que são fornecidos pelo fabricante, deixando assim evidente as diferenças entre o modelo linear e não linear em termos de resposta em corrente. Relativamente à resposta em velocidade pode-se afirmar que são bastante semelhantes ao modelo linear apesar de um pequeno aumento do erro para alguns dos sinais de validação.

Tabela 32 Cálculo dos erros quadráticos para estimações a partir de dados de velocidade e corrente

Estimação com dados de velocidade e corrente					
	Sinal de validação	Erro de velocidade	Erro de corrente	Soma dos erros	Média dos erros
Parâmetros do fabricante	Pulso	2,021051	4,280691	6,301742	16,650688
	Sinal variável	3,410863	3,598791	7,009654	
	Seno	20,066275	25,572126	45,638401	
	Sinal triangular	5,642186	2,010769	7,652955	
Onda triangular e ruído gaussiano	Pulso	1,616660	2,028391	3,645051	8,3800165
	Sinal variável	1,393263	1,442075	2,835338	
	Seno	4,056458	18,743453	22,799911	
	Sinal triangular	2,673216	1,566550	4,239766	

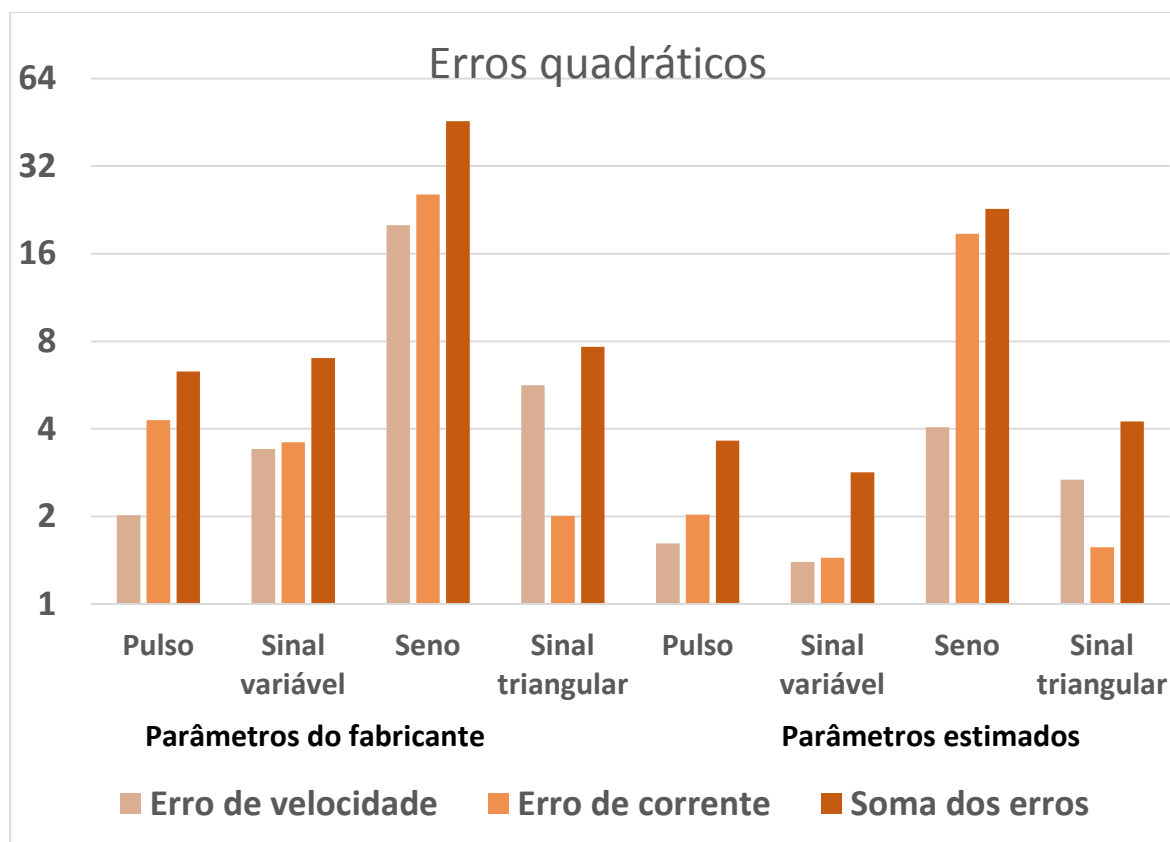


Figura 65 Cálculo dos erros quadráticos (em escala logarítmica de base 2) para estimações a partir de dados de velocidade e corrente

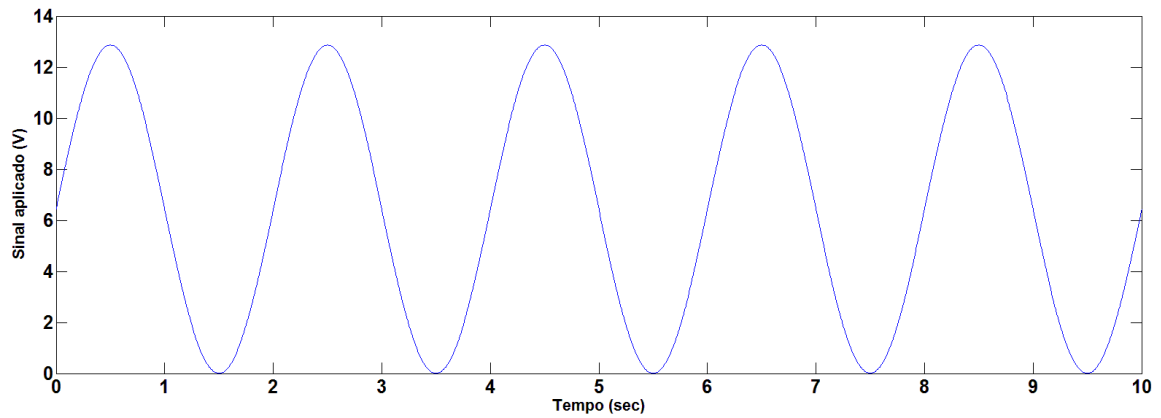


Figura 66 Sinal de excitação sinusoidal

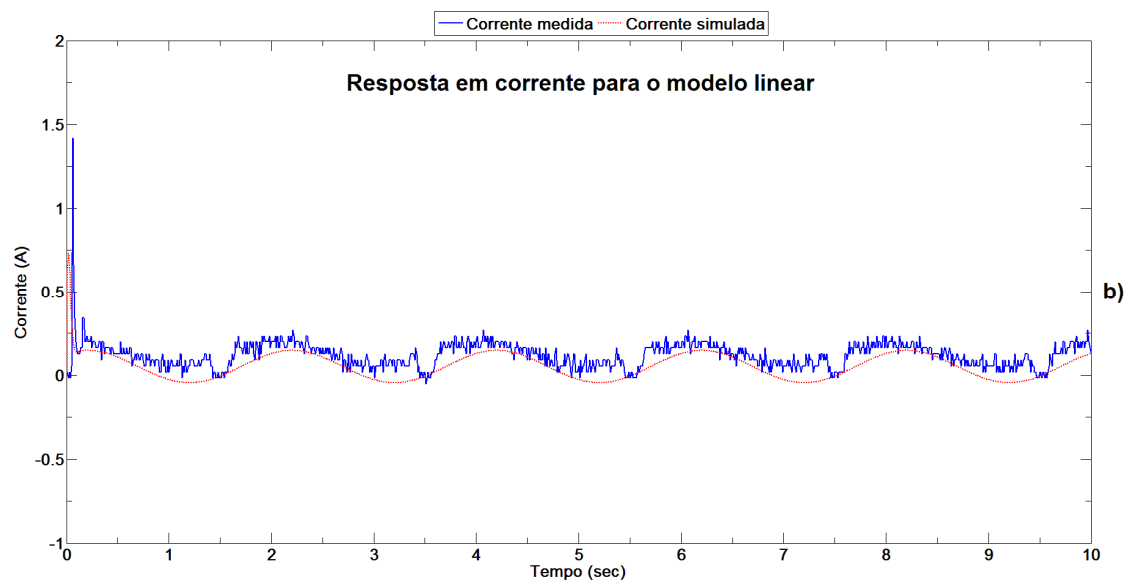
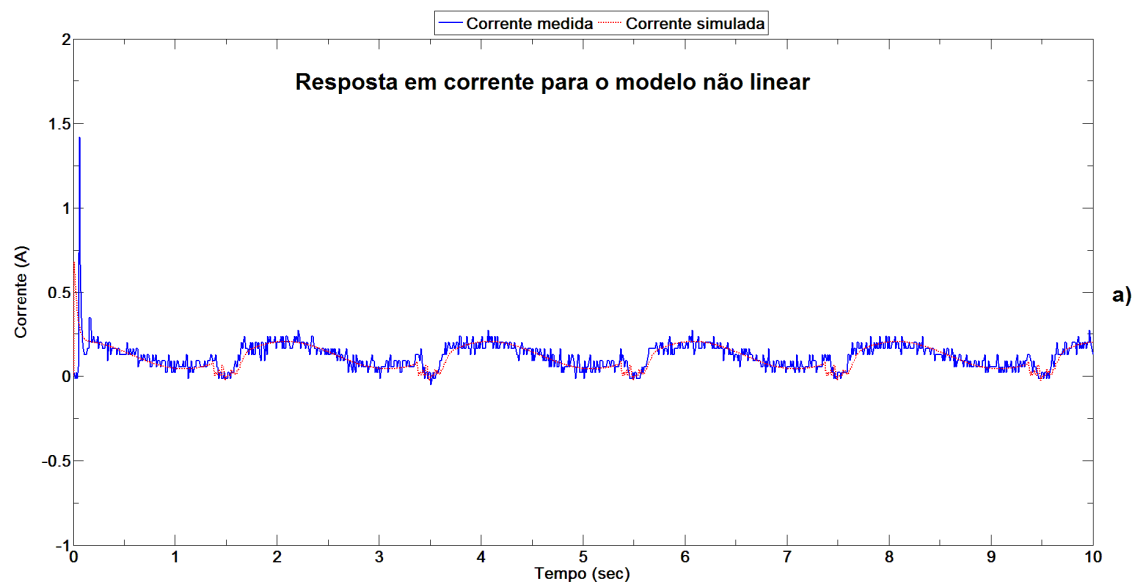


Figura 67 Respostas em corrente: a) Modelo não linear e b) Modelo linear

7. CONCLUSÕES

Ao longo deste texto foram sendo apresentadas conclusões que permitiram sustentar as opções de desenvolvimento efetuadas ao longo do projeto. Assim, neste último capítulo é realizada uma síntese das principais conclusões, consequências e relevância do trabalho realizado e perspectivas futuros desenvolvimentos.

Como foi possível concluir ao longo deste trabalho, os resultados obtidos apresentam uma boa precisão em relação aos dados reais obtidos do motor DC. As respostas simuladas a partir dos valores dos parâmetros estimados revelaram uma maior precisão relativamente às respostas simuladas através dos valores dos parâmetros fornecidos pelo fabricante para o modelo linear. Para o modelo não linear as respostas apresentam uma maior precisão relativamente ao modelo linear. Esta afirmação facilmente se comprova analisando as respostas em corrente de ambos os modelos, pois a diferença é evidente.

O sistema desenvolvido é capaz de recolher dados do sistema real e efetuar estimações com uma boa precisão tornando a aquisição dos modelos do motor um processo rápido e eficaz. É de notar que o sistema desenvolvido é de baixo custo e tem a vantagem de efetuar a identificação e modelação dos parâmetros apenas com o motor a funcionar em vazio, tornando assim a recolha dos dados necessários um processo rápido sem necessidade de manuseamento do motor.

O modelo não linear revelou ser de grande precisão, não escondendo o facto de que o modelo linear, apesar da resposta em corrente apresentar certas divergências, apresenta também resultados satisfatórios para ambas as respostas. A grande diferença entre os dois será na precisão dos valores dos parâmetros obtidos, pois para o modelo não linear as respostas em corrente aproximam-se com mais exatidão às dinâmicas do sistema real e em consequência resultando em valores mais precisos dos parâmetros do motor DC.

Para o modelo linear a diferença do valor da indutância obtido implica um ajuste de parte da estimação para os outros parâmetros de forma a obter os mesmos resultados no processo de aproximação de ambas as respostas, obtidas e simuladas. O modelo não linear veio resolver este problema, resultando assim num valor aceitável para a indutância do motor DC.

É concluído que o modelo não-linear apresenta uma melhoria significativa nos resultados obtidos das estimações, sendo assim o modelo ideal quando o objetivo é a obtenção dos valores dos parâmetros do motor. Contudo, o modelo linear aparenta ser suficiente para a análise da resposta em velocidade do motor DC. Já no caso da resposta em corrente, dependendo da precisão requerida, o modelo linear poderá ser implementado, caso contrário o modelo não linear apresenta os melhores resultados.

Futuros desenvolvimentos incluem o aumento da gama de tensão que o sistema permite atualmente. Além da gama de tensões, poderemos também aumentar a gama de correntes utilizando para isso uma versão do sensor de corrente capaz de ler correntes mais elevadas. Outro desenvolvimento de grande importância é a implementação de um sensor capaz de medir a tensão aplicada diretamente ao motor. Este sensor, capaz de medir as elevadas variações de tensão aplicadas ao motor, iria maximizar a precisão dos dados obtidos que de momento são estimados através dos sinais de excitação, ideais, provenientes do Simulink. Neste estudo o modelo não linear incluiu o atrito de Coulomb como uma não linearidade do sistema, sendo que um futuro desenvolvimento será a implementação das restantes não linearidades.

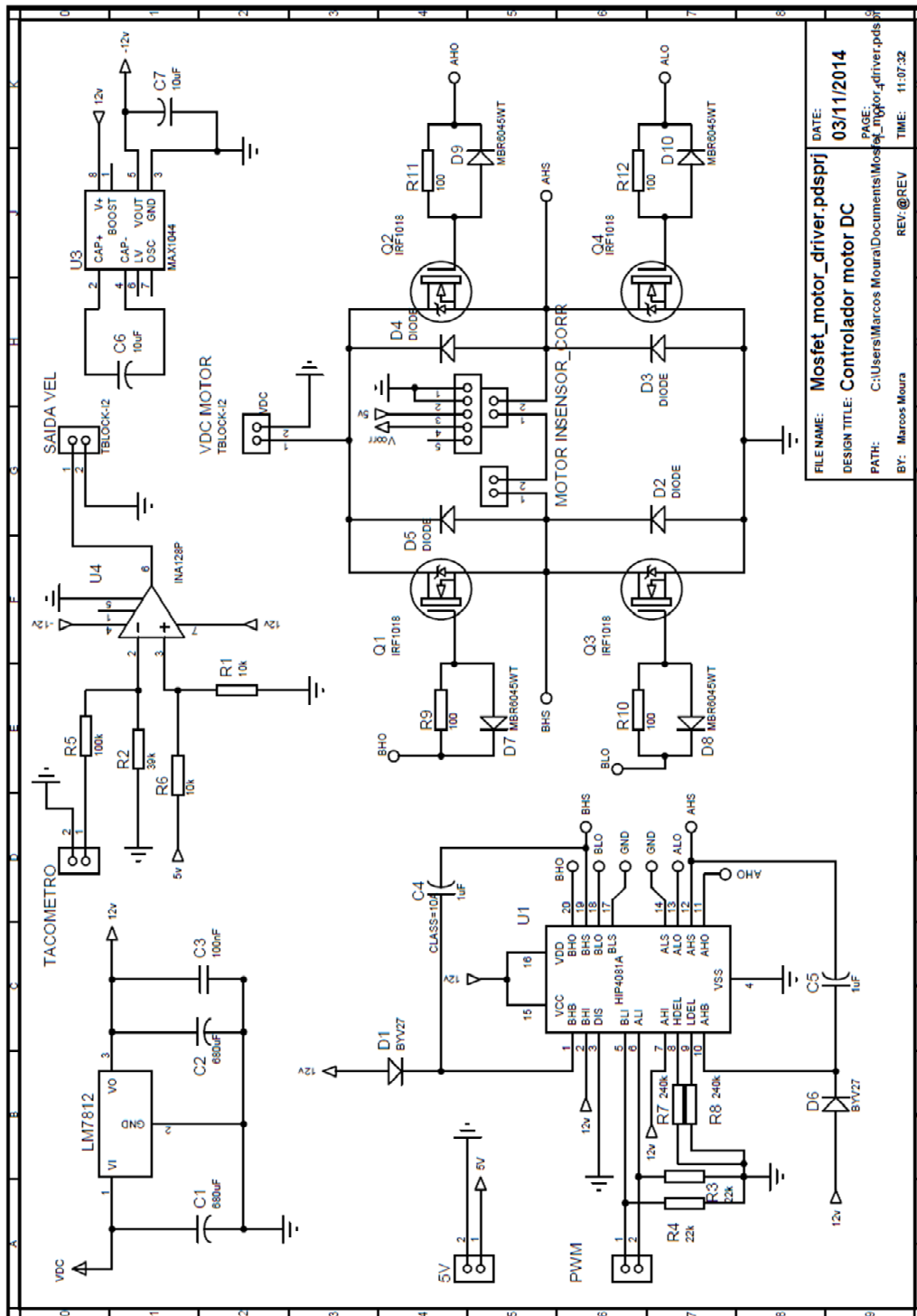
Relativamente à interface gráfica, um dos futuros desenvolvimentos é a obtenção automática das respostas do motor que são utilizadas para a estimação dos novos parâmetros bem como para a sua validação. Pretende-se também automatizar todo este processo até à obtenção dos parâmetros estimados e melhorar o aspeto da interface gráfica.

Referências Documentais

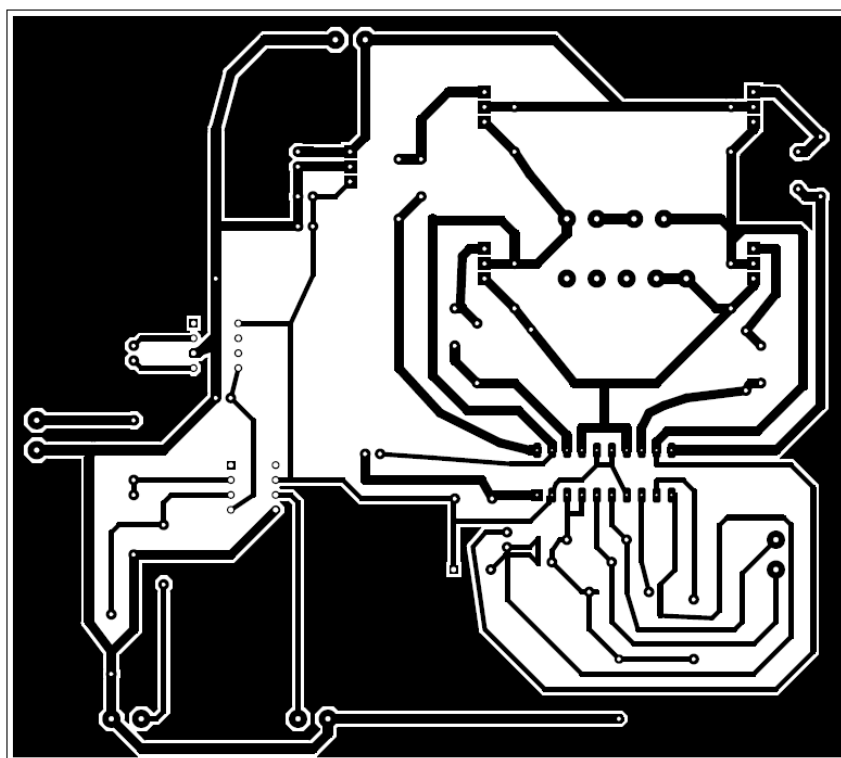
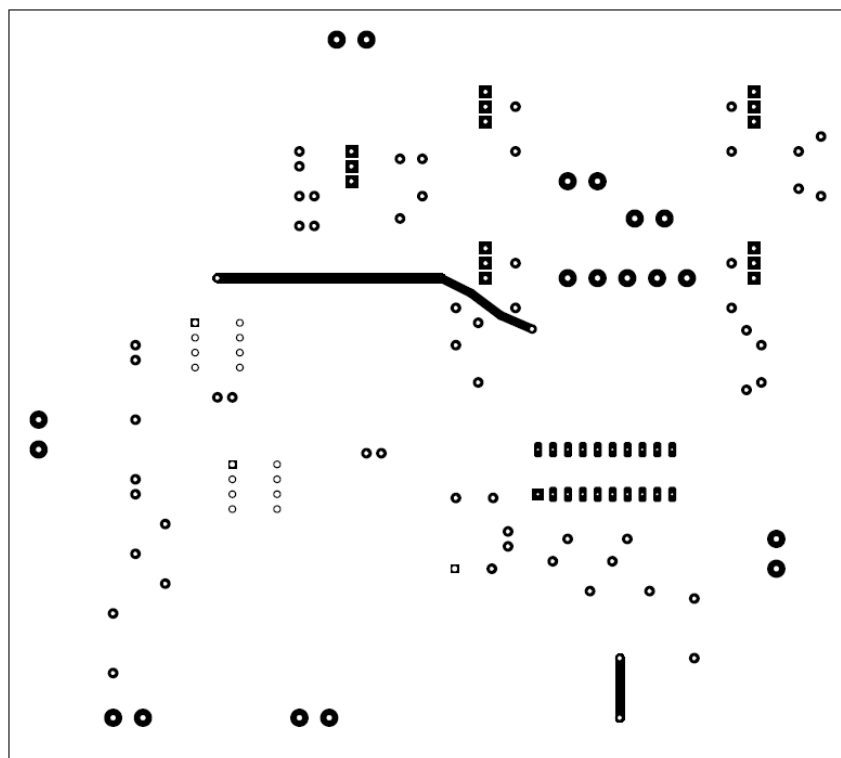
- [1] J. H. Polidori, “MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA, Guia rápido para uma especificação precisa,” 2009.
- [2] UNEP, *Energy Efficiency Guide for Industry in Asia*. 2006.
- [3] R. Condit, “Brushed DC Motor Fundamentals,” *Microchip Technol. Inc Httpww1 Microchip ComdownloadsAppNotes00905a Pdf*, 2004.
- [4] R. F. Harrington, *Introduction to Electromagnetic Engineering*. Courier Dover Publications, 2003.
- [5] “AN APPLICATION: A DC DRIVE.” Available: http://www.et-inf.fho-enden.de/~elmalab/projekte/ws9899/pe_html/ch04s6/ch04s6p1.htm.
- [6] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*. New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [7] R. H. Engelmann and W. H. Middendorf, *Handbook of electric motors*, vol. 92. Marcel Dekker, 1995.
- [8] Jim Lepkowski and Microchip Technology Inc., “Motor Control Sensor Feedback Circuit,” 2003.
- [9] “Medições com encoders de quadratura: Guia prático - National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7109/pt/>.
- [10] G. Massobrio, M. Grattarola, and Grattanola, *Bioelectronics Handbook: MOSFETs, Biosensors, and Neurons*. New York: McGraw-Hill Companies, 1998.
- [11] “The interface between silicon and a high-k oxide.” Available: http://info.tuwien.ac.at/theochem/si-srtio3_interface/si-srtio3.html.

- [12] “Selecting the right MOSFET driver - Electronic Products.” Available: http://www.electronicproducts.com/Analog_Mixed_Signal_ICs/Selecting_the_right_MOS_FET_driver.aspx.
- [13] C. T. Kelley, *Iterative methods for optimization*, vol. 18. Siam, 1999.
- [14] S. E. Lyshevski, “Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors,” *Mechatronics*, vol. 9, no. 5, pp. 539–552, Aug. 1999.
- [15] J. O. Jang and G. J. Jeon, “A parallel neuro-controller for DC motors containing nonlinear friction,” *Neurocomputing*, vol. 30, no. 1–4, pp. 233–248, Jan. 2000.
- [16] J.-J. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1991.
- [17] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.

Anexo A. Esquemático do sistema de controlo e aquisição de dados



Anexo B. Circuito impresso e visualização 3D



Anexo C. Pacote de suporte para *hardware*

Primeiramente, na barra de ferramentas deve clicar em *Add-Ons* e no menu *drop-down* que se segue, clicar em *Get Hardware Support Package*, como demonstra a Figura 68.

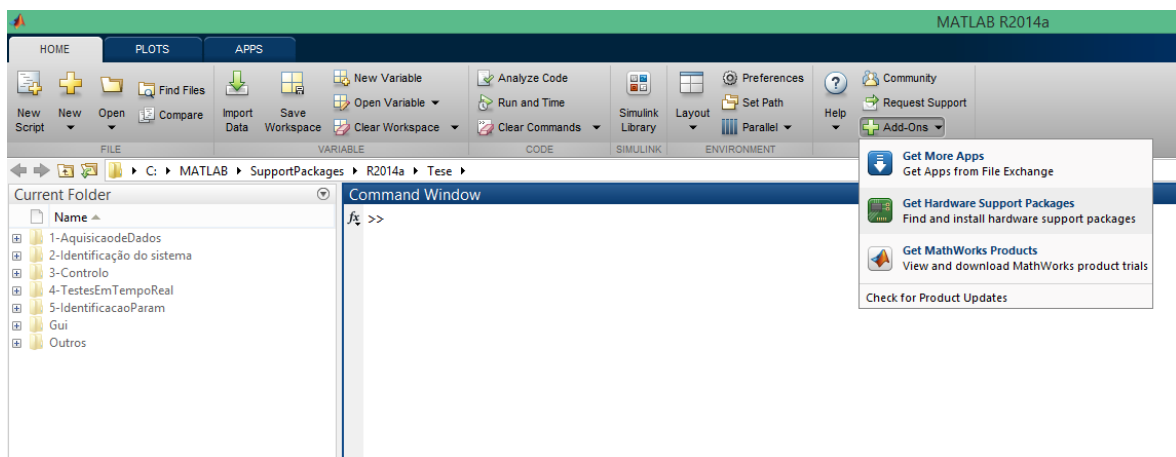


Figura 68 Ambiente de trabalho MATLAB

De seguida deve escolher a opção *Install from Internet* e clicar em *Next >* como demonstra a Figura 69.

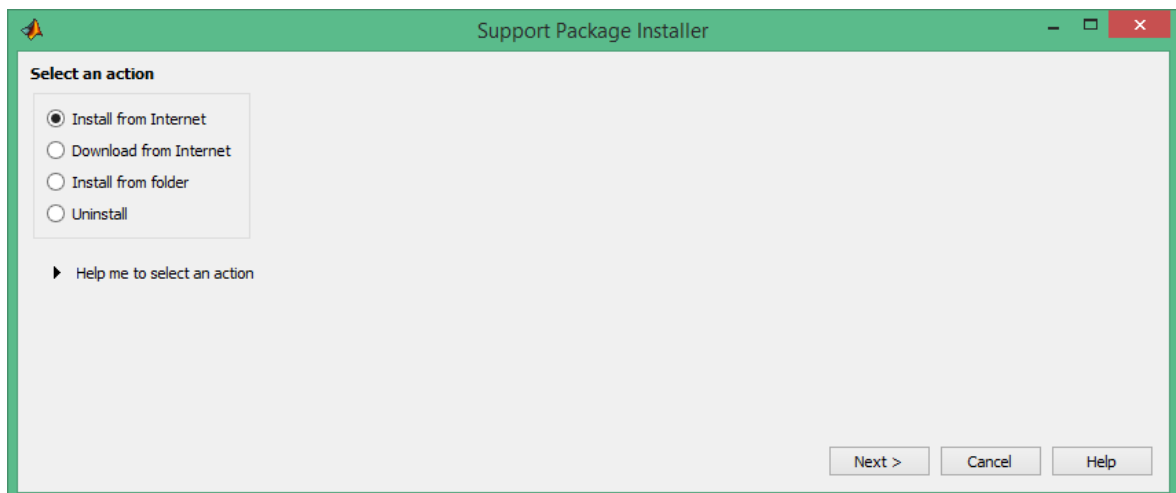


Figura 69 Janela de escolha do método de instalação ou desinstalação

De seguida é necessário escolher o suporte para o *hardware* pretendido, no caso em estudo é usado do pacote de suporte para a plataforma Arduino, sendo assim deve escolher, na lista apresentada pela Figura 70, a opção Arduino.

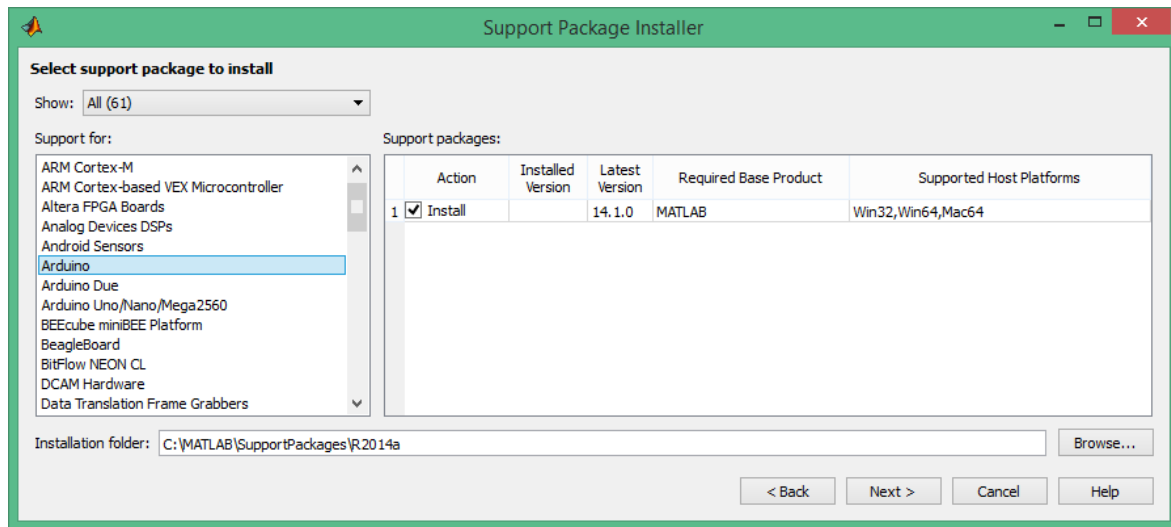


Figura 70 Pacotes de suporte disponíveis

De seguida é necessário efetuar o *log in* com uma conta da MathWorks. Este passo requer uma conta válida para continuar com a instalação, caso contrário é necessário a criação de uma nova conta. A Figura 71 ilustra este passo.

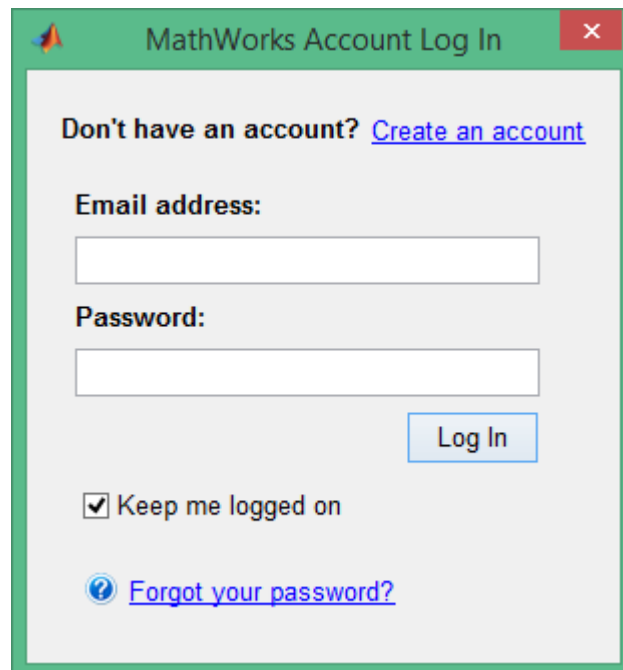


Figura 71 Janela de *log in*

De seguida é necessário verificar e aceitar as condições das licenças de ambos, *software* e *hardware* para avançar no processo de instalação, como apresenta a Figura 72.

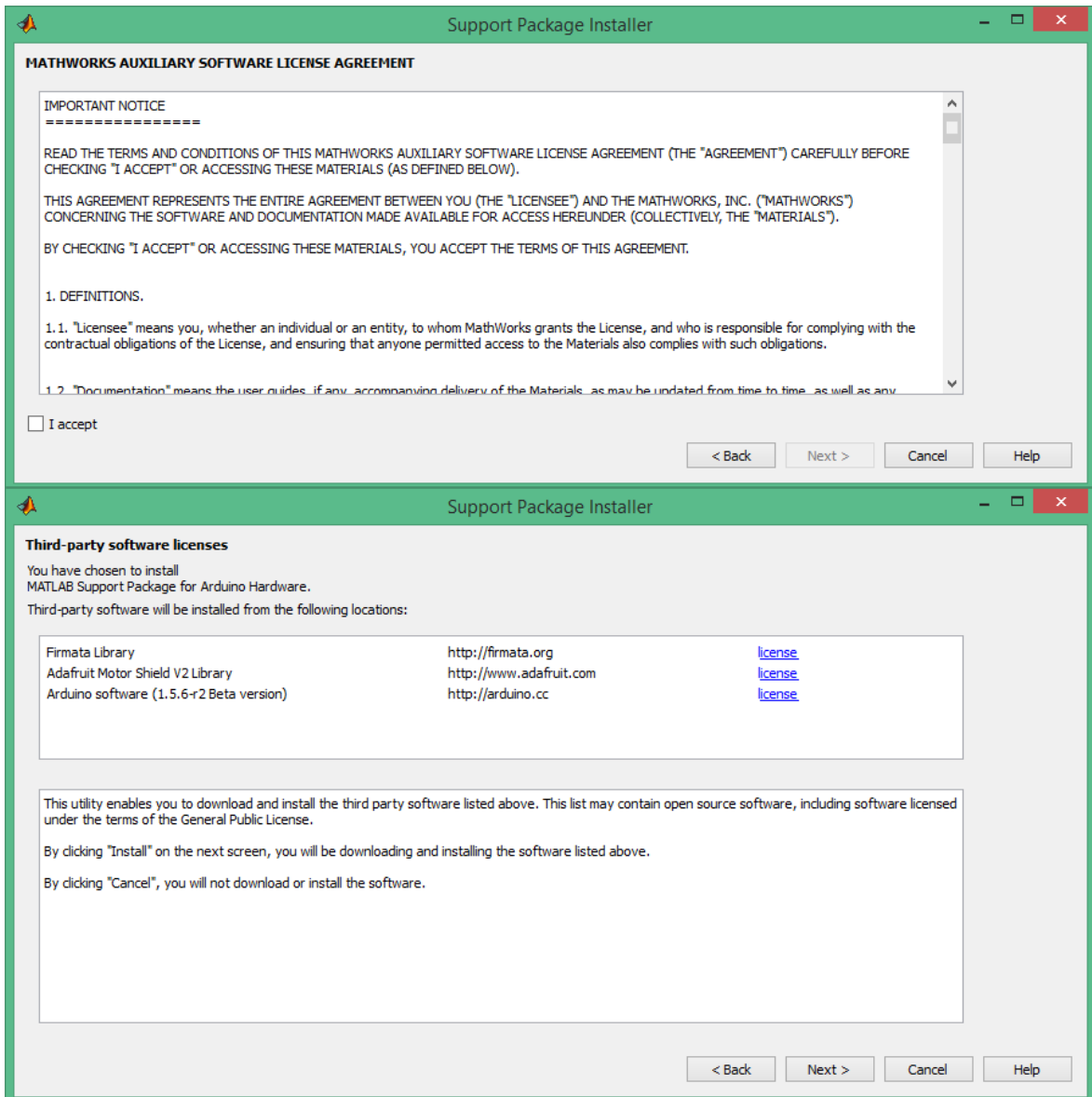


Figura 72 Licenças e condições de uso do *software* a ser instalado

De seguida dá-se início à instalação de todo o *software* necessário. É importante notar que todo este processo é automático, sendo que todas as configurações que visam o funcionamento do *software* são definidas automaticamente e o *software* pronto a usar. A Figura 73 ilustra o processo de instalação.

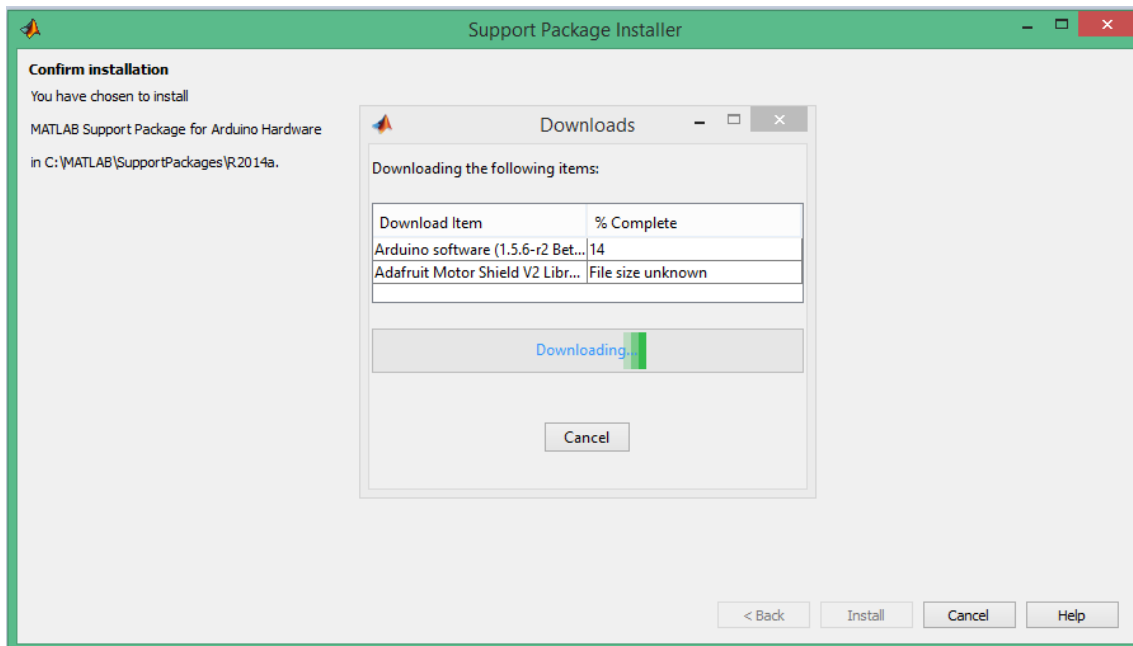


Figura 73 Processo de instalação

Por fim, o *hardware* Arduíno requer a instalação de *drivers* para tornar possível a comunicação entre o *software* e *hardware*. Este passo não é obrigatório caso estes *drivers* já se encontrem instalados. A Figura 74 ilustra este passo.

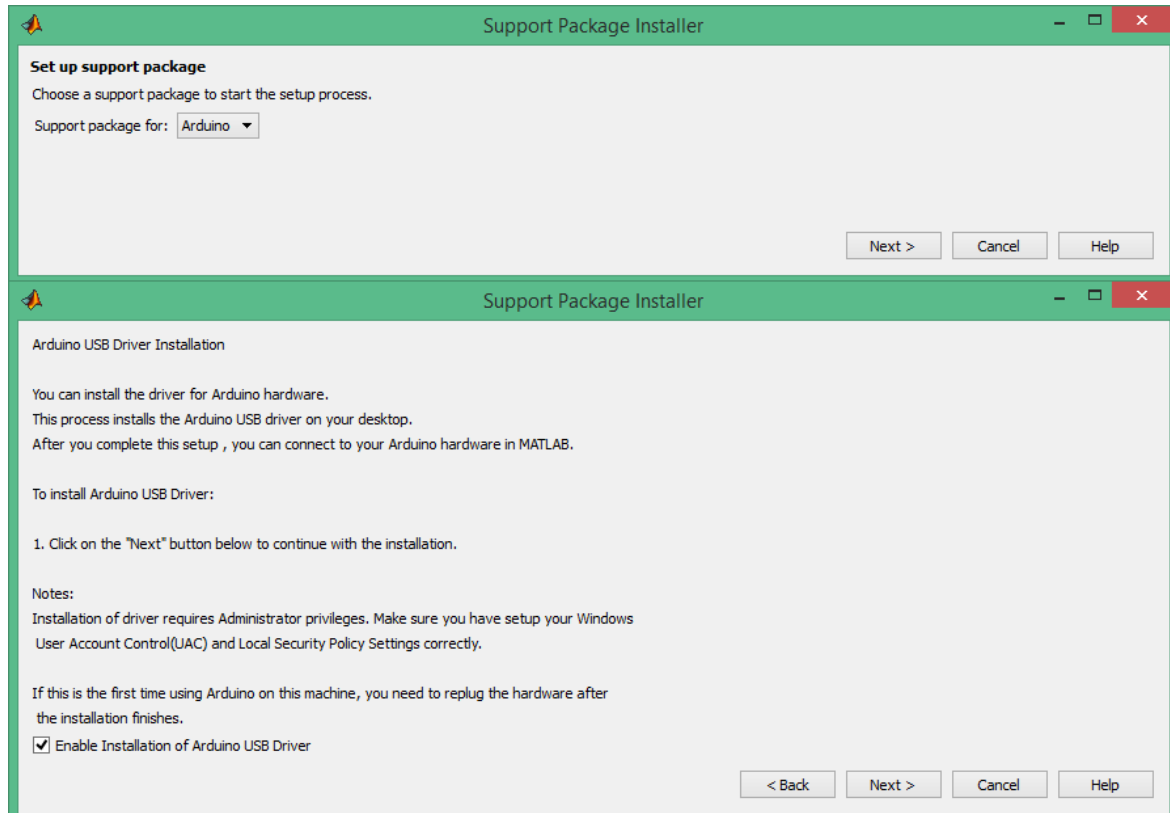


Figura 74 Instalação dos *drivers* necessários

Depois de concluir todos estes passos, a instalação encontra-se concluída e o *software* pronto a usar. Uma nova documentação foi também adicionada ao MATLAB contendo exemplos da utilização do pacote de suporte. A Figura 75 demonstra essa documentação.

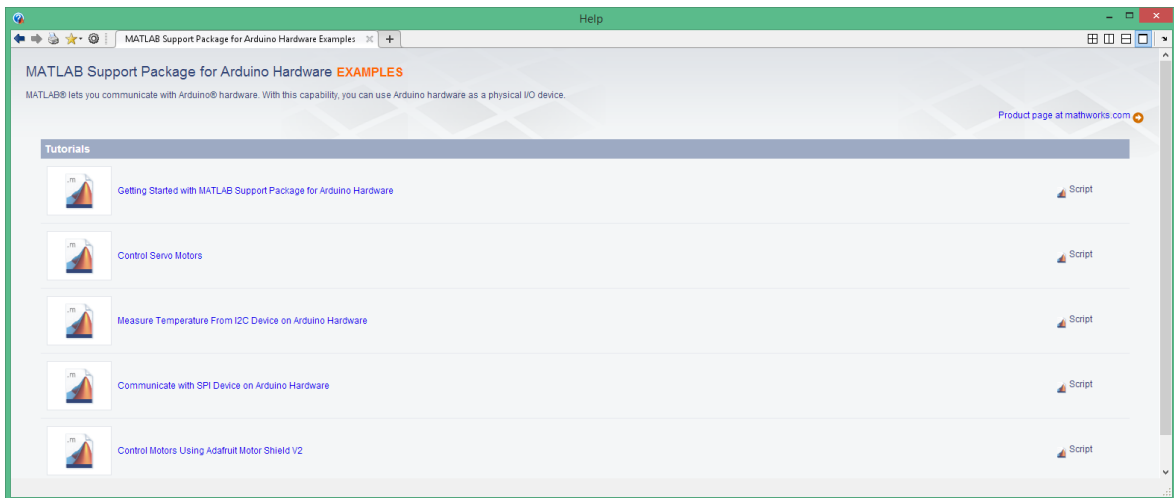


Figura 75 Documentação e exemplos relativos ao pacote de suporte

Por fim, a Figura 76 apresenta alguns dos blocos fornecidos pelo pacote de suporte que podem ser usados no Simulink.

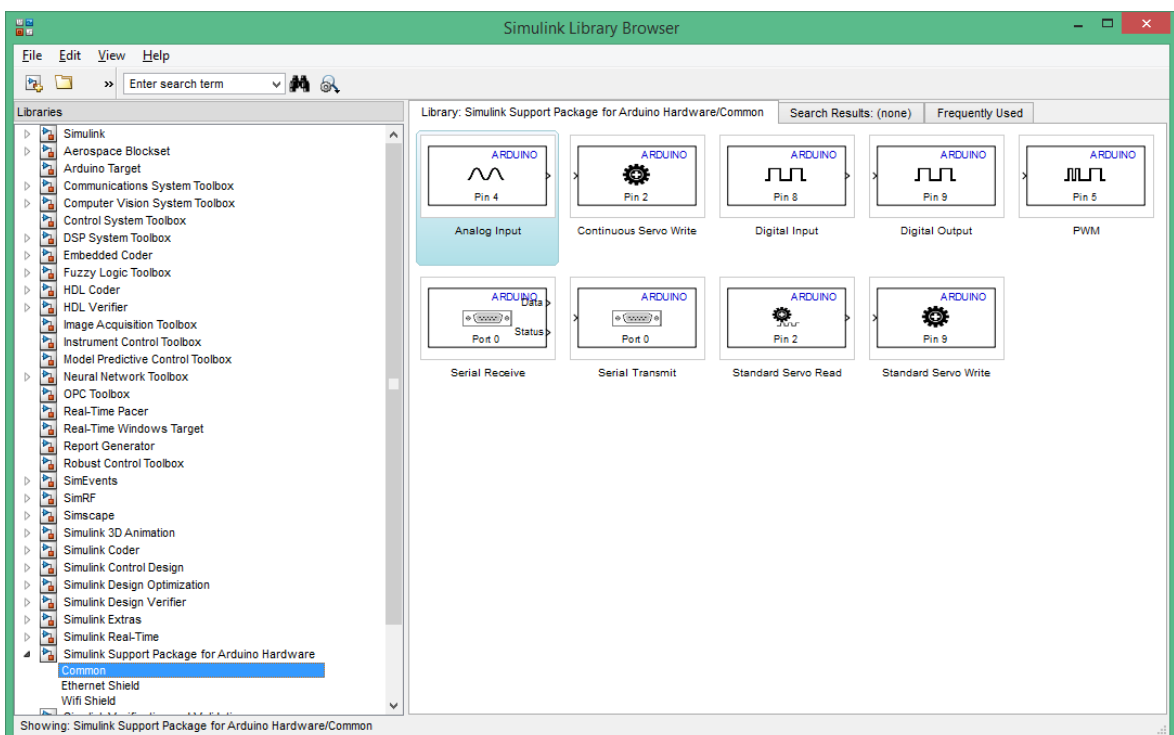


Figura 76 Exemplo dos blocos fornecidos pelo pacote de suporte

Este processo de instalação é válido para as placas de desenvolvimento, Arduino Uno, Arduino Mega2560 e Arduino Nano. Neste projeto iremos utilizar o Arduino Mega1280.

O Arduíno Mega2560 é um *upgrade* ao Mega1280 e como tal foi verificado que o segundo não é compatível com o *software* mais recente. Desta forma instalou-se manualmente uma versão anterior do *software*, compatível com o Arduíno Mega1280. Este *software* é denominado por ‘Embedded Coder Target for Arduino’. A sua instalação é exemplificada a seguir passo a passo de uma forma bastante resumida.

- Instalar o *software* Arduíno IDE, disponível na página oficial do produto. O caminho para o diretório da instalação não poderá ter espaços pois não funciona com o MATLAB.
- Obter o ‘Embedded Coder Target for Arduino’ versão 2.0 de Março de 2014 através do *file Exchange* do MATLAB (*website*) e extrair para um diretório cujo caminho não contenha espaços.
- Editar o ficheiro ‘setup_customtarget_arduino.m’
- Substituir na linha onde é definido o caminho do diretório de instalação do *software* Arduíno (exemplo:arduino_ec.Prefs.setArduinoPath('c:\MATLAB\arduino-1.0.5')).
- Alterar o modelo em ‘arduino_ec.Prefs.setBoard('mega');’ para o modelo a usar. Neste projeto é o ‘mega’.
- Efetuar a ligação por USB entre a placa de desenvolvimento do Arduíno e o computador (Poderá ser necessária a instalação de *drivers*).
- Correr no MATLAB ‘setup_customtarget_arduino.m’ – Isto efetua todas as configurações necessárias ao funcionamento do *hardware* com o MATLAB (se alterar a placa de desenvolvimento é necessário editar este ficheiro novamente com as opções adequadas).
- Abrir o *Library Browser* do Simulink e atualizar a árvore de modelos através do botão F5 ou através do menu “View -> Refresh Tree View”.
- Por fim é possível verificar o seu funcionamento, executando um dos *demos* que vem com o ficheiro obtido no segundo ponto. Na pasta *demos*:
 - Simular o modelo *demo* escolhido.
 - Clicar no botão *build model* e esperar a sua finalização.
 - Clicar no botão “Flash Arduino” no modelo Simulink e de seguida em “OK”.

Desta forma conclui-se o processo de instalação do pacote de suporte para a placa de desenvolvimento Arduíno.

Anexo D. Interface gráfica desenvolvida

A interface gráfica desenvolvida permite uma rápida estimação dos parâmetros do motor. Para usar esta ferramenta é necessário primeiramente efetuar a obtenção das respostas de velocidade e corrente do motor em estudo. A Figura 77 apresenta a janela principal da ferramenta. Primeiramente é necessário abrir o modelo que vai ser usado na estimação. A opção Ficheiro → Abrir modelo... deverá ser usada para escolher o modelo a usar.

O próximo passo é escolher o sinal a partir do qual se vão efetuar as estimações, para isso é necessário ter o sinal carregado no *workspace* do MATLAB e depois inserir o nome do sinal na caixa de texto 'Nome do sinal no Workspace'. De seguida, clicar no botão 'Listar variáveis'. Este botão tem a finalidade de listar as variáveis que existem no modelo e permite posteriormente a escolha de quais se quer estimar. De seguida clicando no botão 'Estimar' dá-se início à estimação. Uma vez completa, é exibido um gráfico entre as respostas simuladas e obtidas para que o utilizador tenha a oportunidade de analisar os resultados obtidos.

Através da secção denominada por 'Validação' é possível escolher qualquer sinal e exibir graficamente as suas respostas simuladas e medidas para meios de comparação e desta forma validar os resultados obtidos. A Figura 78 apresenta o resultado desta funcionalidade para um dos sinais de validação, o sinal variado.

Na secção 'Valores dos parâmetros' é possível visualizar os parâmetros obtidos que automaticamente são aplicados ao modelo do motor. Carregar no botão 'Atualizar' antes da estimação irá apresentar os valores atuais dos parâmetros aplicados ao modelo do motor.

Para maior flexibilidade foi adicionada a opção de alterar as opções de estimação e desta forma o utilizador poderá alterar os valores das opções da estimação conforme for necessário. Esta opção é facultativa sendo que os valores padrão deverão ser usados em caso de desconhecimento das suas funções.

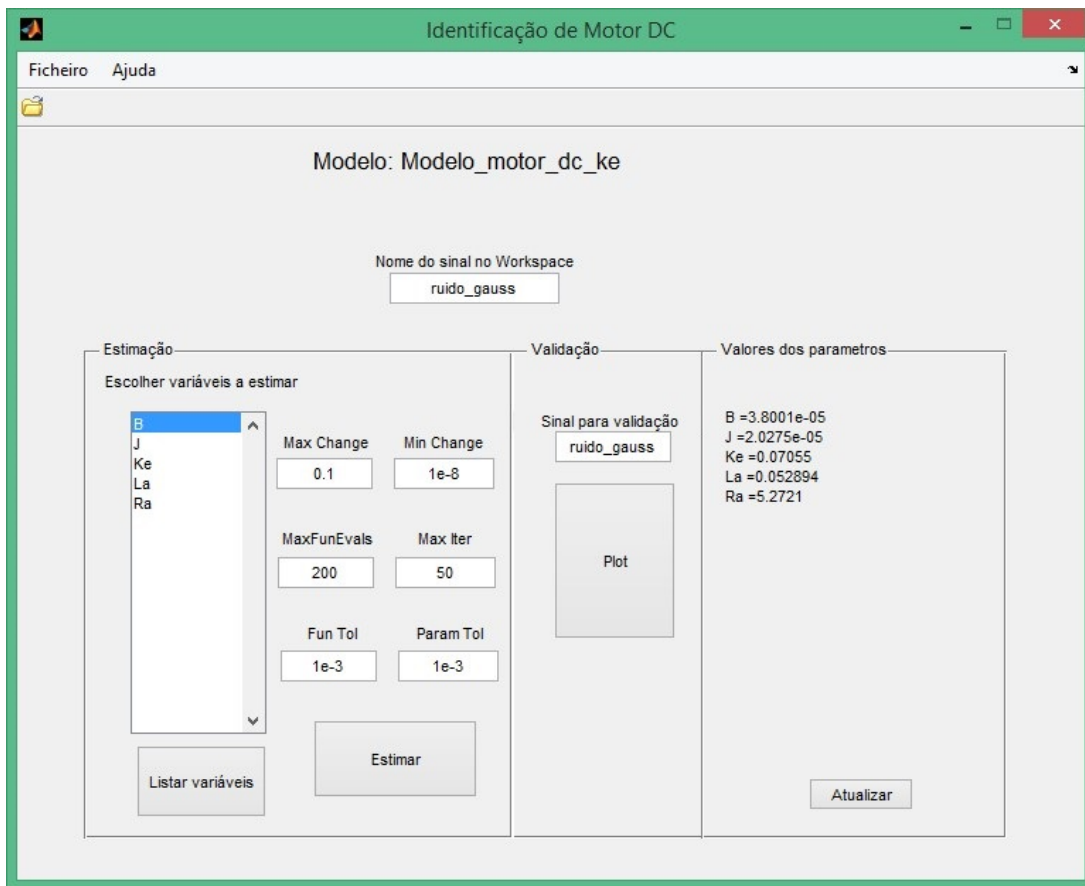


Figura 77 Interface gráfica desenvolvida

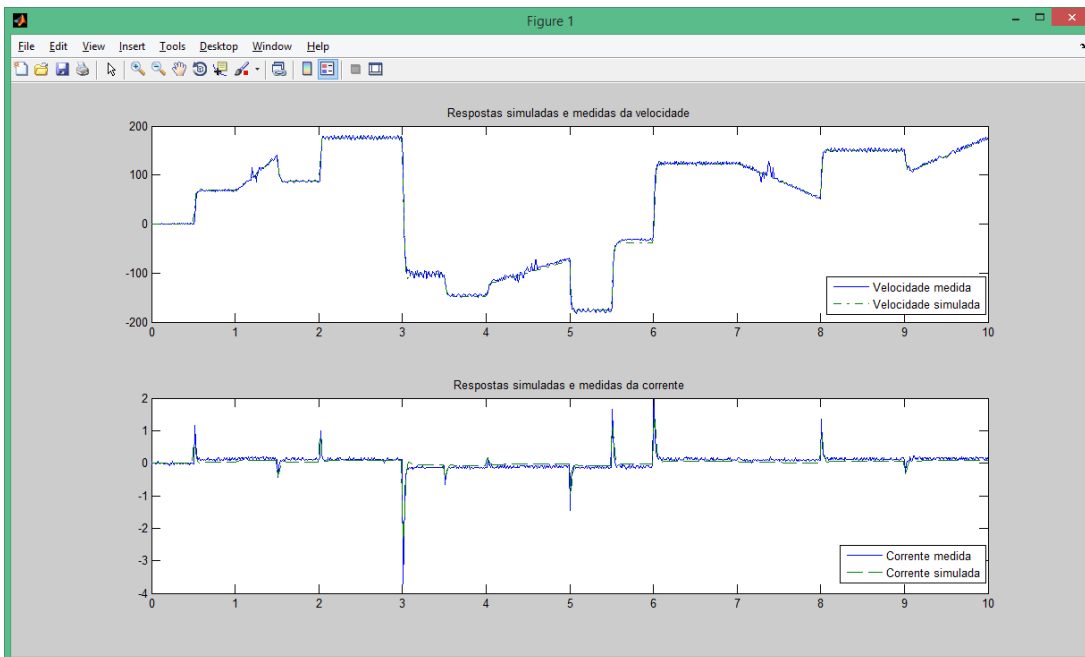


Figura 78 Resultado da funcionalidade de validação

