



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO

# **Desenvolvimento de um Sistema de Carga Mecânica Programável para Aplicação em uma Plataforma de Testes de Máquina de Indução**

*Autor: Henrique de Carvalho Mengatto*

*Orientador: Luis Fernando Alves Pereira*

Porto Alegre, 12 de dezembro de 2014

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, minha família, que sempre me apoiou, me proporcionando tudo o que eu precisei para chegar aqui hoje.

A todos os professores pela dedicação e paciência em ensinar. Presto minha gratidão em especial ao meu professor orientador Luis Fernando Alves Pereira que me guiou nessa etapa final dessa jornada.

Ao pessoal do laboratório (LASCAR), principalmente Renê Augusto Benvenuti, pela paciência e disposição para me ajudar sempre que precisei.

Aos meus amigos, que me apoiaram sempre, em momentos de trabalho e de descontração.

## Sumário

Agradecimentos	ii
Sumário	iii
Resumo	iv
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos do presente trabalho	1
1.2 Estrutura do Trabalho	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Máquina CC: Princípio de funcionamento	3
2.2 Plataforma	5
3 Desenvolvimento	8
3.1 Modelagem do sistema - PSim	8
3.2 MatLab	9
3.3 Experimento Prático	10
3.4 Identificação	14
3.5 Controle Proposto	17
4 Resultados Experimentais	19
4.1 Simulação	19
4.2 Ensaio usando um degrau como sinal de referência	20
4.3 Controle com ruído na medição do torque	21
4.4 Controlador PI	22
4.5 Controlador proposto	24
4.6 Seguimento de outras referências	26
5 Conclusões	30
6 Referências	31

## **Resumo**

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema composto por uma máquina de corrente contínua acoplada a uma máquina de indução. A máquina de indução opera como motor, enquanto a máquina CC é utilizada como carga mecânica, que é dinamicamente imposta no eixo. Um sistema de controle de corrente foi desenvolvido para que a curva de torque aplicado ao eixo siga uma curva de referência. Com isso foi possível simular diferentes regimes de funcionamento utilizando o software Matlab. Uma plataforma real foi montada para que o controle possa ser testado na prática. Para concluir, testes foram feitos, controlando com sucesso a carga aplicada ao eixo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carga Dinâmica Programável, Máquina de Corrente Contínua, Controle

## **Abstract**

In this present work, a system composed by a DC machine coupled to an induction machine was developed. The induction machine operates as a motor, while the DC machine is used as a mechanical load, which is imposed on the axis dynamically. A current control system is designed so that the torque curve applied to the axis follows a reference curve. It was then possible to simulate different regimes of operation using the Matlab software. An actual platform is mounted so that the control can be tested. To complete the present work, tests were executed, successfully controlling the load applied to the axis.

**KEYWORDS:** Programmable Dynamic Load, DC machine, Control

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Frenagem reostática com resistência fixa.....	3
<b>Figura 2:</b> Frenagem reostática com módulo de chaveamento .....	3
<b>Figura 3:</b> Modelo da Máquina CC.....	4
<b>Figura 4:</b> Plataforma desenvolvida no LASCARFonte: Benvenuti (2014) .....	5
<b>Figura 5:</b> Ambiente demonstrando uso das bibliotecas Fonte: Benvenuti (2014) .....	6
<b>Figura 6:</b> dSPACE® .....	7
<b>Figura 7:</b> Conversor pentafásico.....	7
<b>Figura 8:</b> Inversor pentafásico – diagrama PSim® .....	7
<b>Figura 9:</b> Modelo do acionamento da máquina de indução .....	8
<b>Figura 10:</b> Modelo do sistema – PSim® .....	9
<b>Figura 11:</b> Diagrama esquemático do acionamento carga programável – PSim® .....	9
<b>Figura 12:</b> Diagrama de blocos do controle (simulink) .....	10
<b>Figura 13:</b> Sistema simplificado.....	10
<b>Figura 14:</b> Acoplamento .....	11
<b>Figura 15:</b> Banco de resistores .....	11
<b>Figura 16:</b> Código Arduino.....	12
<b>Figura 17:</b> Diagrama de blocos para acionamento da plataforma.....	13
<b>Figura 18:</b> Diagrama de blocos do controlador.....	14
<b>Figura 19:</b> Ambiente ControlDesk® .....	14
<b>Figura 20:</b> Interpolação (Torque x Corrente de armadura).....	16
<b>Figura 21:</b> Interpolação (Tensão x Velocidade).....	16
<b>Figura 22:</b> Controle em malha aberta - diagrama de blocos.....	17
<b>Figura 23:</b> Controle com ação integral .....	18
<b>Figura 24:</b> Razão cíclica do sinal de PWM aplicado no sistema. ....	19
<b>Figura 25:</b> Torque no eixo do motor de indução.....	19
<b>Figura 26:</b> Torque no eixo do motor de indução (zoom). ....	20
<b>Figura 27:</b> Resposta do sistema a um degrau de entrada.....	21

<b>Figura 28:</b> Controle com ruído .....	21
<b>Figura 29:</b> Esforço de controle do controle com ruído .....	22
<b>Figura 30:</b> Comparação do controlador 1 com o 2 .....	23
<b>Figura 31:</b> Seguimento de referência com PI .....	23
<b>Figura 32:</b> Seguimento de referência com PI (zoom).....	24
<b>Figura 33:</b> Erro - PI .....	24
<b>Figura 34:</b> Seguimento de referência – Controlador projetado.....	25
<b>Figura 35:</b> Seguimento de referência – Controlador projetado (zoom) .....	25
<b>Figura 36:</b> Erro – controlador projetado .....	26
<b>Figura 37:</b> Seguimento de onda triangular - PI .....	26
<b>Figura 38:</b> Erro de seguimento de onda triangular - PI .....	27
<b>Figura 39:</b> Seguimento de onda senoidal - PI.....	27
<b>Figura 40:</b> Seguimento de onda triangular – Controlador projetado .....	28
<b>Figura 41:</b> Erro de seguimento de onda triangular – Controlador projetado.....	28
<b>Figura 42:</b> Seguimento de onda senoidal – Controlador projetado .....	29

---

**Lista de Tabelas**

<b>Tabela 1:</b> Identificação do parâmetro $K_a$ .....	12
<b>Tabela 2:</b> Identificação do parâmetro $K_e$ .....	13

### **Lista de Símbolos**

$E_a$	tensão de armadura [V]
$I_a$	corrente de armadura [A]
$T_e$	torque eletromagnético [N.m]
$T_m$	torque mecânico [N.m]
$R$	resistência de armadura [ $\Omega$ ]
$B$	coeficiente de atrito [N.m/RPM]
$k_a$	constante de torque [N.m/A]
$k_e$	constante de campo [V/RPM]
$\omega$	velocidade angular [RPM]
$d$	Duty cycle



---

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*

LASCAR – Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica

MCC – Máquina de Corrente Contínua

MI – Máquina de Indução

MIP – Máquina de Indução Pentafásica

PI – Proporcional Integral

PWM – Pulse Width Modulation

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul



## 1 Introdução

Máquinas elétricas são amplamente utilizadas em diversas aplicações industriais. Por um tempo, as máquinas de corrente contínua (MCC) predominavam nas indústrias, principalmente nos acionamentos onde se precisava de um controle de velocidade. Com o avanço da tecnologia de acionamento de máquinas de indução (MI), os motores assíncronos passaram a substituir as MCC em diversas aplicações. Atualmente, máquinas de indução representam grande parte da energia consumida em países com elevado grau de industrialização (Borba M. et al., 2006).

Processos industriais costumam ter demandas que exigem uma operação com o mínimo possível de paradas dos sistemas para que a empresa não tenha prejuízo. Por isso, a execução de testes aplicados no sistema real não é viável. Outro método deve então ser utilizado. Uma plataforma didática, que simule as diversas condições de operação de uma MI, seria muito útil no aprendizado de aplicação desta tecnologia.

Uma plataforma de testes foi proposta em Borba M. et al., onde uma máquina de indução é acoplada ao eixo de uma máquina de corrente contínua (MCC). A máquina CC é responsável por aplicar a carga dinâmica com as mesmas características da carga medida no processo real. Para a obtenção da carga dinâmica, uma carga resistiva é inserida e retirada, alternadamente, da malha de armadura, utilizando uma chave eletrônica. A frequência com que a chave fecha e abre é controlada medindo o torque no eixo, e atuando com um PWM (*Pulse Width Modulation*) na chave.

Esse trabalho busca replicar o experimento de Borba M. et al. para diversos tipos de curvas de carga, entre eles o comportamento degrau, linear e senoidal. Antes de implementar no sistema real, o experimento foi modelado e simulado no computador. Para a parte elétrica foi utilizado o software *PSIM*<sup>®</sup>, onde foram modelados todos componentes elétricos, incluindo as duas máquinas e as chaves IGBT's. O controle foi implementado na ferramenta *simulink* do software *MatLab*<sup>®</sup>. Os dois programas possuem uma funcionalidade de acoplamento, que permite que ambos se comuniquem e funcionem em conjunto.

### 1.1 Objetivos do presente trabalho

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de aplicar uma carga no eixo do motor assíncrono.

Depois de validado o método de aplicação de carga, um controle do torque deve ser desenvolvido. Este controlador deve ser capaz de fazer com que o torque siga uma referência constante, com erro nulo em regime permanente.

Este controle deve ser primeiramente simulado no computador, e em seguida testado em um sistema real. Os resultados práticos devem ser comparados com os simulados, para que o sistema real valide o simulado.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre máquinas de corrente contínua e seu princípio de funcionamento. Também é apresentado o laboratório onde foi realizado o trabalho.

No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do modelo e do controle, implementados e simulados em software.

No Capítulo 4, são analisados os resultados da simulação e dos ensaios experimentais.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e perspectivas futuras.

## 2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma breve revisão da literatura sobre máquinas de corrente contínua e seu princípio de funcionamento.

### 2.1 Máquina CC: Princípio de funcionamento

Segundo Nascimento (2011), o motor de corrente contínua é composto por três componentes básicos: armadura, estator e comutador. A armadura é a parte móvel girante do motor, designada também como rotor, composta de enrolamentos de fio condutor. Estator é a parte fixa da máquina que envolve o rotor. Este componente também possui enrolamentos, as quais estabelecem um campo magnético fixo. O comutador é responsável por conectar devidamente os terminais das bobinas da armadura, para que estas gerem um campo magnético perpendicular ao campo do estator. Ele é composto por escovas de carbono, que através de molas são pressionadas contra os contatos no rotor, fechando o circuito, e permitindo o acesso aos mesmos terminais fora da máquina.

Para um campo fixo, os campos perpendiculares geram um torque no eixo do motor proporcional à corrente de armadura. No caso de uma máquina CC operando como gerador, manipulando-se a corrente, controla-se a carga de saída que será aplicada no sistema responsável pela movimentação do eixo, no caso deste trabalho, o motor assíncrono. A Figura 1 ilustra o sistema com dissipação de energia em uma resistência fixa.

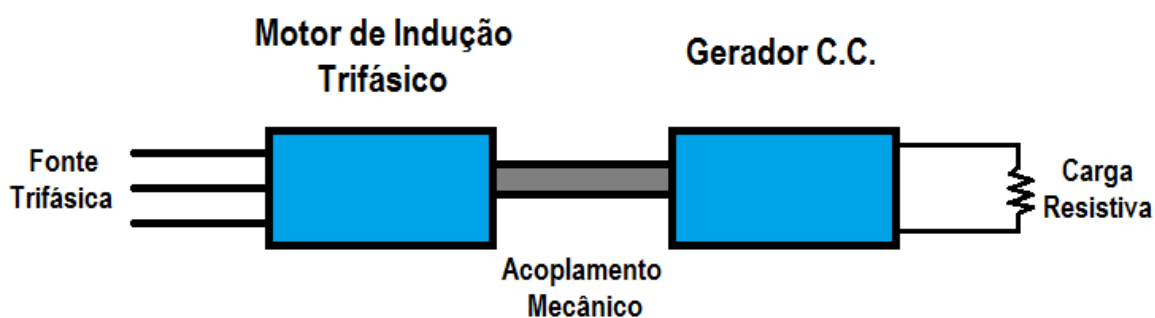


Figura 1: Frenagem reostática com resistência fixa

Apesar de aplicar uma carga, este sistema não possibilita o controle sobre a mesma. Adicionando um módulo de chaveamento, faz-se possível variar a corrente entre os extremos com e sem carga, permitindo o controle do torque. Este sistema está representado na Figura 2.

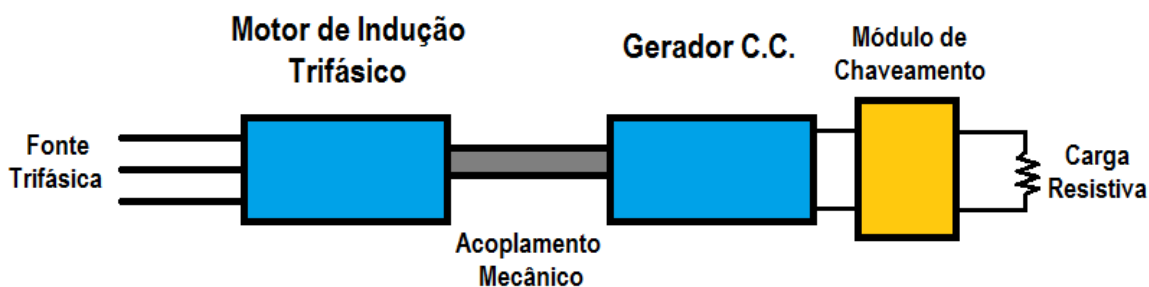
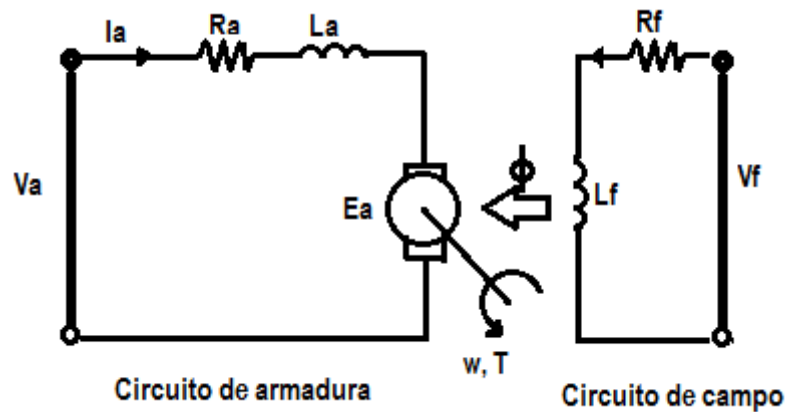


Figura 2: Frenagem reostática com módulo de chaveamento

A Figura 3 ilustra o modelo da máquina de corrente contínua.



**Figura 3:** Modelo da Máquina CC

Segundo Nascimento (2011), as equações que representam esse sistema em estado estacionário são:

$$E_a = R \cdot I_a \quad (1)$$

$$T_m = B \cdot \omega + T_e \quad (2)$$

$$T_e = k_a I_a \quad (3)$$

$$E_a = k_e \omega \quad (4)$$

Onde:

$E_a$  é a tensão de armadura [V]

$I_a$  é a corrente de armadura [A]

$T_e$  é o torque eletromagnético [N.m]

$T_m$  é o torque mecânico [N.m]

$R$  é a resistência de armadura [ $\Omega$ ]

$B$  é o coeficiente de atrito [N.m/rpm]

$k_a$  é constante de torque [N.m/A]

$k_e$  é constante de campo [V/rpm]

$\omega$  é a velocidade angular [rpm]

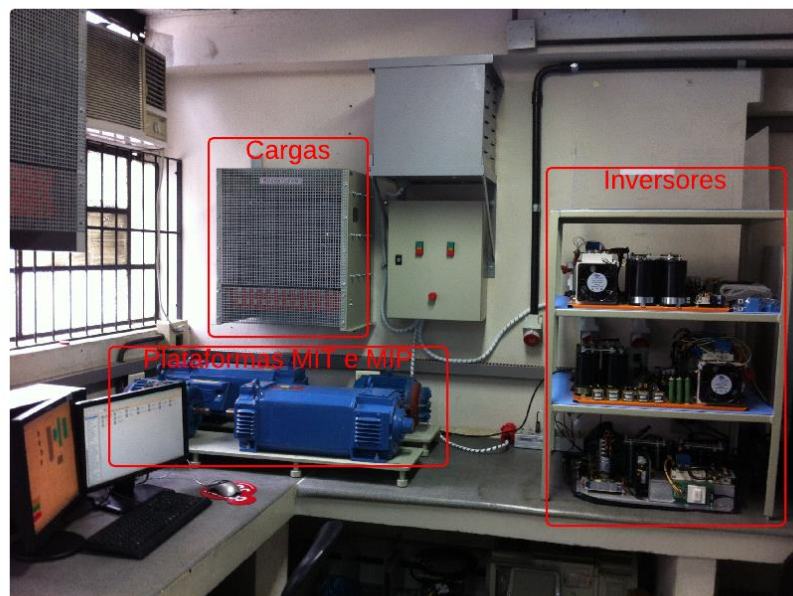
Para a aplicação com o módulo de chaveamento, temos que a corrente é proporcional à razão cíclica  $d$  (*duty cycle*), resultando na seguinte relação para a corrente:

$$I_a = \frac{E_a \cdot d}{R} \quad (5)$$

## 2.2 Plataforma

A plataforma onde a carga programável será implementada, foi desenvolvida por Benvenuti (2014), e implementada no LASCAR (Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica), na UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). No Ambiente Matlab/Simulink®, é gerado o executável que é gravado na placa dSPACE® - DS1104. Esta placa envia os sinais de controle para placas condicionadoras onde passam por um adequamento dos níveis de tensão para acionar os *drivers* do inversor de frequência.

Na Figura 4 podemos ver a plataforma localizada no LASCAR.



**Figura 4:** Plataforma desenvolvida no LASCAR  
Fonte: Benvenuti (2014)

No trabalho de Benvenuti (2014), foram desenvolvidas bibliotecas para facilitar o uso da plataforma. Foram desenvolvidos blocos de interface com a dSPACE®, e também módulos prontos de controle para as máquinas de indução. A Figura 5 ilustra o exemplo utilizado em Benvenuti (2014) para acionar uma máquina de indução trifásica.

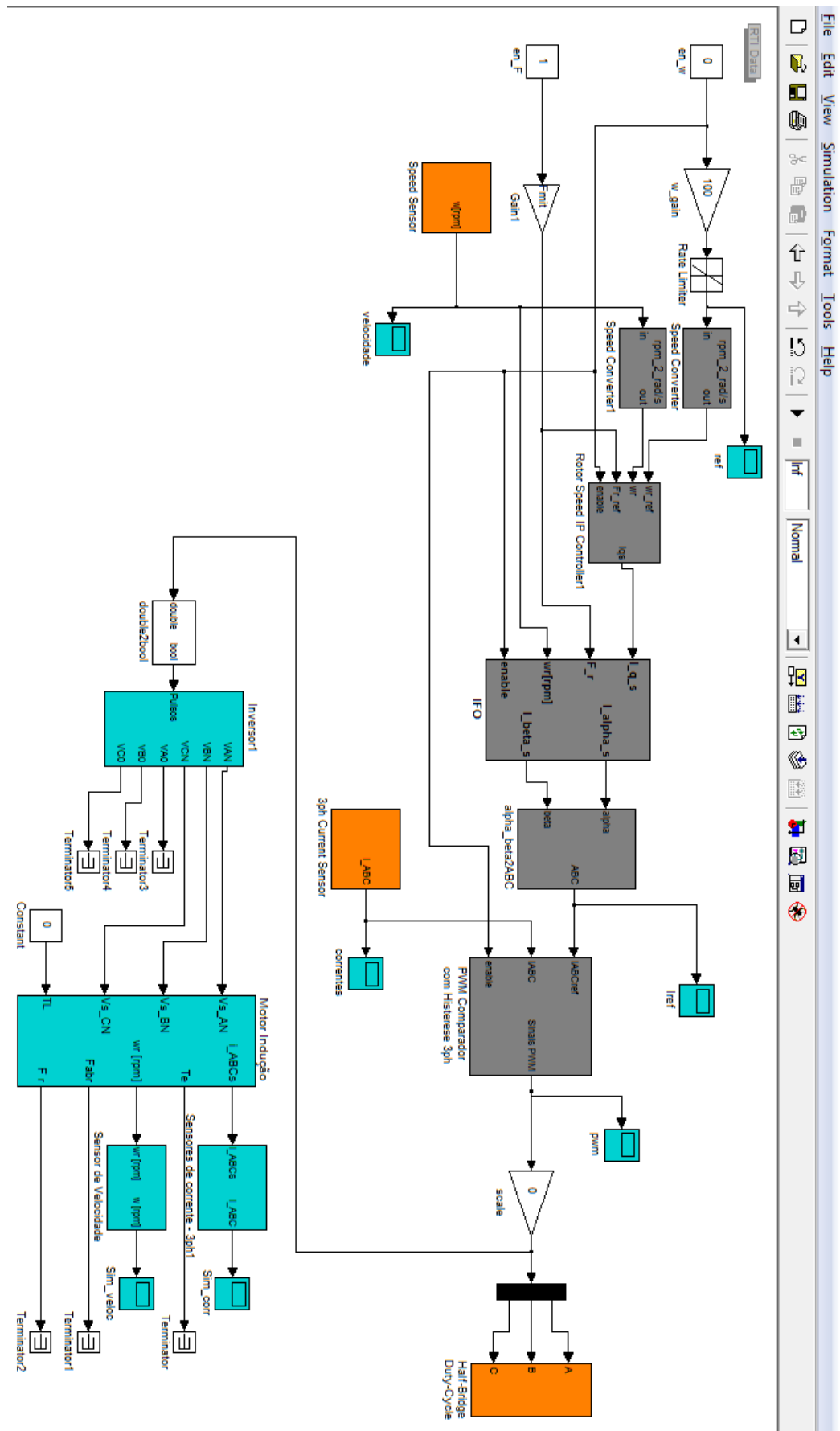


Figura 5: Ambiente demonstrando uso das bibliotecas  
Fonte: Benvenuti (2014)



O programa é compilado e então carregado para a dSPACE – DS1104 (Figura 6). Segundo Benvenuti (2014), esta dispõe de um processador MPC8240 que trabalha conjuntamente com um DSP. Possui também diversas entradas e saídas, como oito conversores Analógico/Digital, oito conversores Digital/Analógico de 16 bits e dez saídas PWM (dSPACE, 2014).

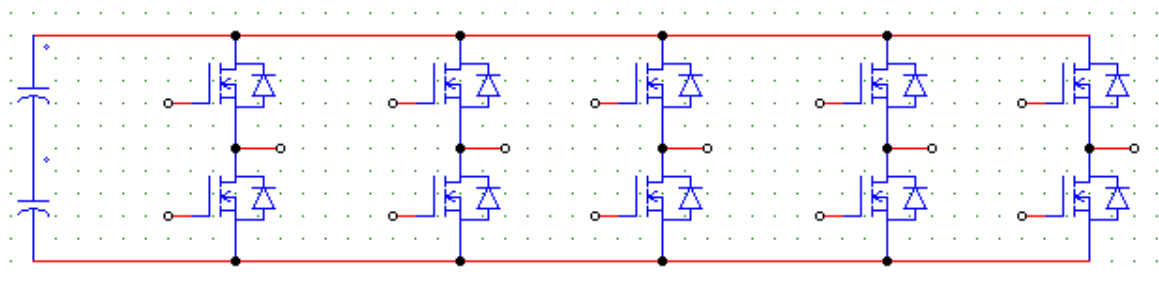


**Figura 6:** dSPACE – DS1104

O conversor pentafásico (Figura 7) consiste em um inversor de frequência com 5 ramos, composto por módulos IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). O diagrama esquemático esta representado na Figura 8.



**Figura 7:** Conversor pentafásico



**Figura 8:** Inversor pentafásico – diagrama PSim®

### 3 Desenvolvimento

Primeiramente, o sistema a ser implementado é modelado em *software*, de forma a permitir que simulações sejam feitas. Após realizadas as simulações, monta-se uma plataforma com dois motores, CA e CC, com ambos eixos acoplados, acionados por uma eletrônica de potência. Com esse sistema, pode-se realizar os testes práticos, e os resultados podem ser comparados com aqueles obtidos pelo ambiente simulado.

#### 3.1 Modelagem do sistema - PSim

Neste trabalho, o *software* utilizado para a modelagem do sistema real é o PSim. Esta ferramenta é muito utilizada para a simulação de circuitos, principalmente os que envolvem eletrônica de potência. Nesse trabalho, toda a simulação da parte elétrica e mecânica do sistema é simulada nele.

A construção do diagrama começou pela parte motor do sistema. O *software* já conta com um componente que representa a máquina de indução. Para o acionamento da máquina assíncrona, foram adicionadas três fontes de tensão senoidal, defasadas em 120 graus, como mostra a Figura 9. A frequência foi fixada em 60Hz, de modo a gerar uma velocidade nominal de 1800 rpm no eixo do motor.

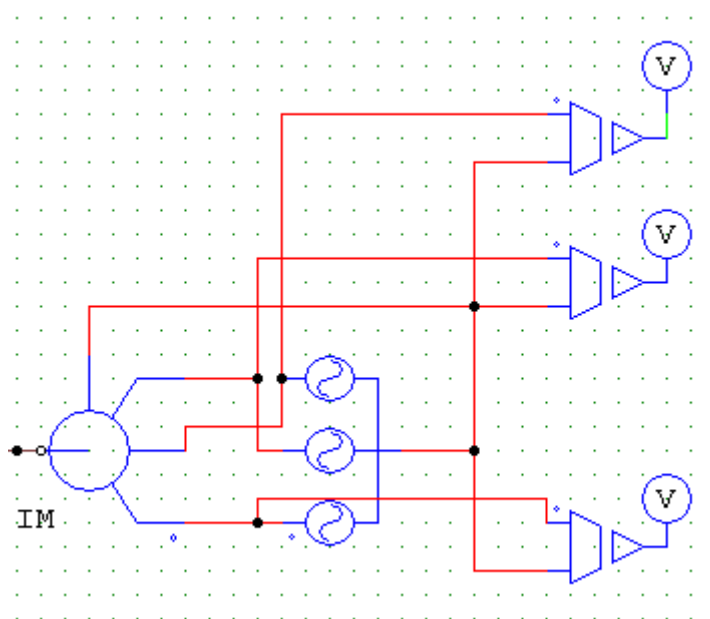


Figura 9: Modelo do acionamento da máquina de indução

Para a simulação foi utilizado a máquina trifásica, por simplicidade, e por não ser o objeto de interesse nessa simulação. Esta desempenha somente a função de motor.

Em seguida, o componente da máquina de corrente contínua foi adicionado. No diagrama, os eixos foram interligados utilizando um acoplamento. Também foram inseridos um torquímetro, para medição do torque, e um encoder, para medição da velocidade angular do eixo.

O inversor trifásico foi modelado de acordo com o circuito já mencionado. Cada terminal da armadura da MCC foi conectado em um ramo, e a carga resistiva foi adicionada ao terceiro ramo.

O acionamento da carga é feito através de um PWM, portanto este também foi modelado e ligado ao acionamento do IGBT. O diagrama resultante pode ser visto na Figura 10. O diagrama detalhado da ligação do inversor trifásico pode ser visto na Figura 11.

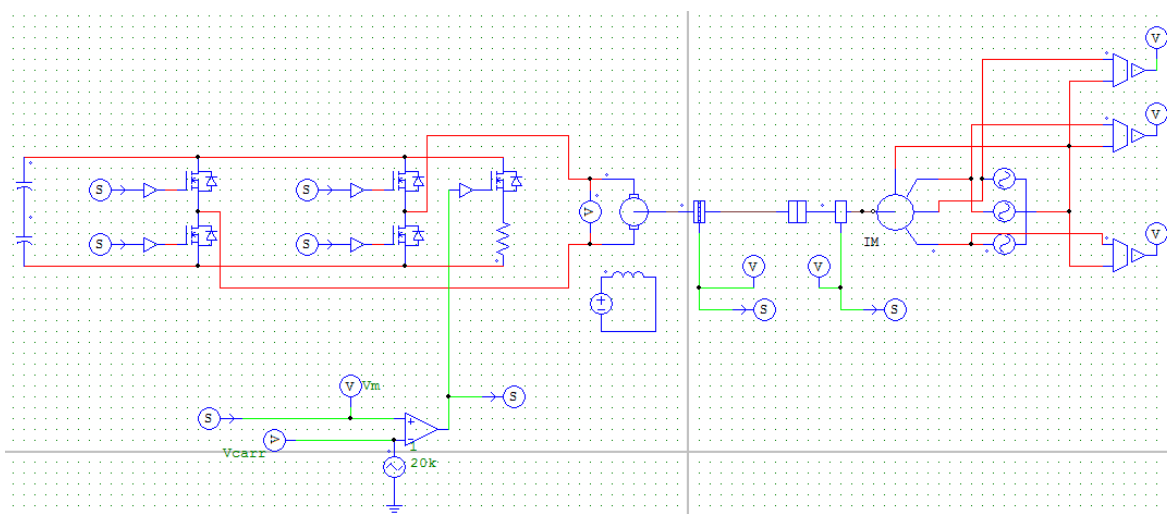


Figura 10: Modelo do sistema – PSim®

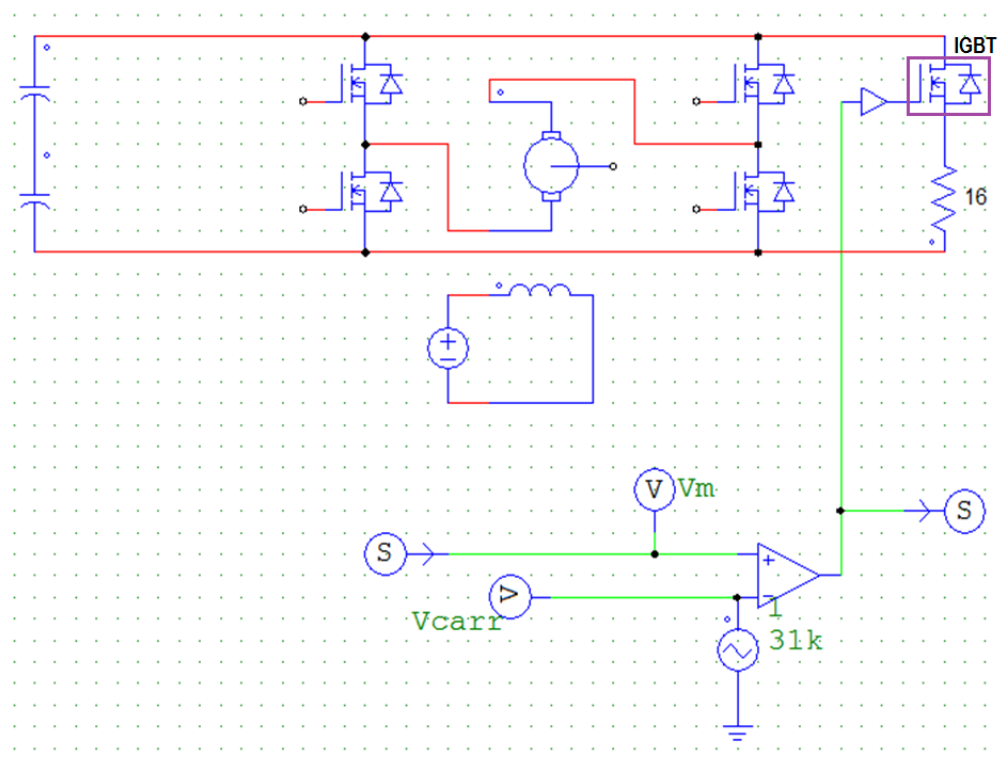


Figura 11: Diagrama esquemático do acionamento carga programável – PSim®

### 3.2 MatLab

Utilizou-se a ferramenta *simulink* para implementar o algoritmo de controle. A Figura 12 representa o diagrama de bloco criado. Pode-se observar o bloco de comunicação S\_Matlab\_1, com as 5 entradas e 2 saídas inseridas no circuito.

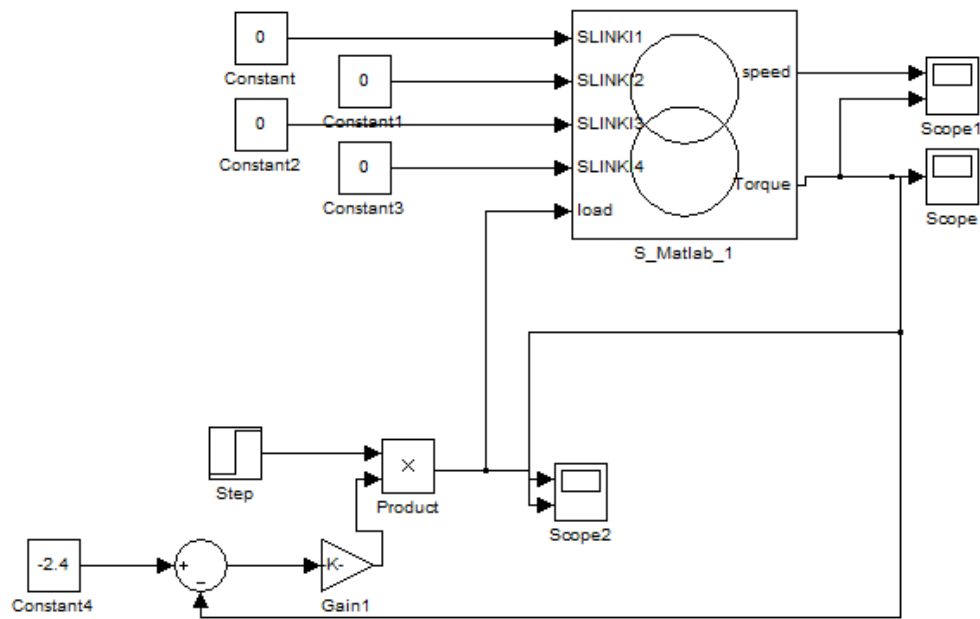


Figura 12: Diagrama de blocos do controle (simulink).

### 3.3 Experimento Prático

Realizada as simulações, realizou-se a montagem da plataforma de acordo com o esquemático mostrado na Figura 13, tendo em vista que o acionamento da MIP já havia sido desenvolvido por Benvenuti (2014).

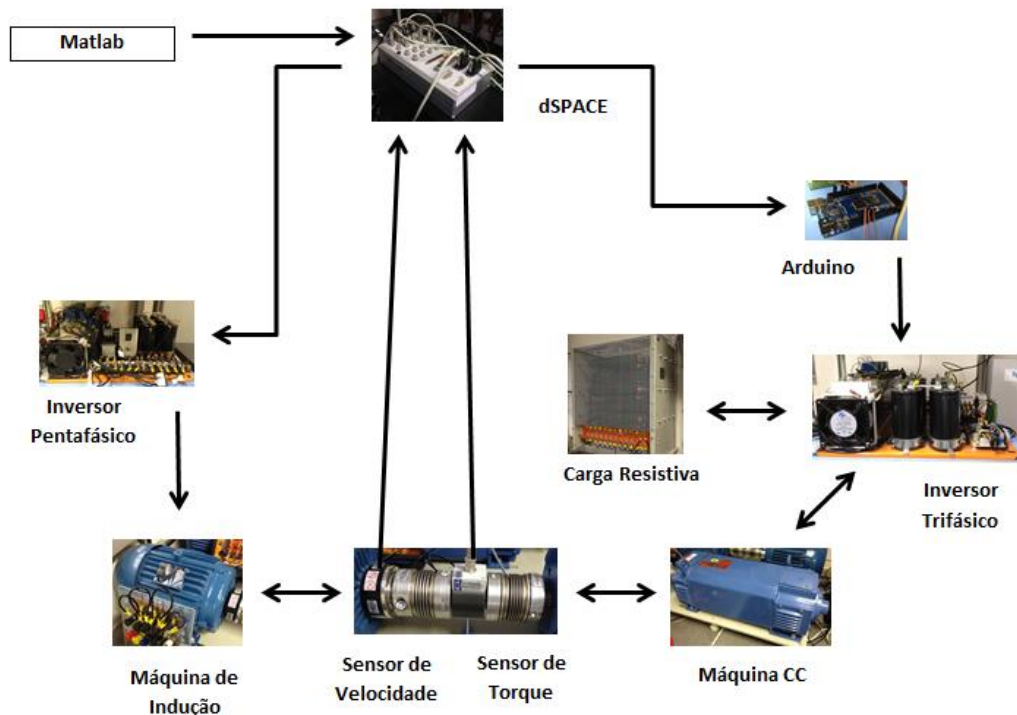
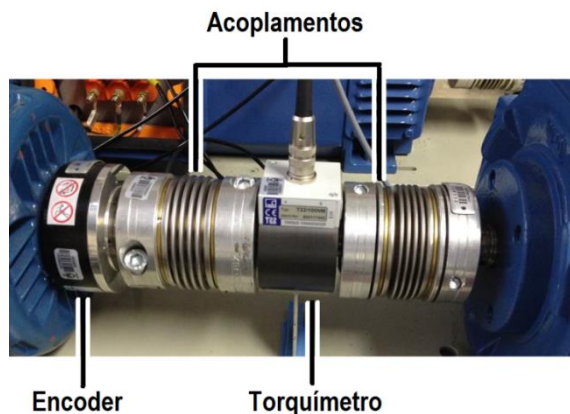


Figura 13: Sistema simplificado

O sistema é constituído por uma máquina de indução pentafásica(MIP) e uma máquina de corrente contínua(CC), sendo que ambas possuem potência de 5,5kW. Os seus eixos foram acoplados como mostra a Figura 14.



**Figura 14:** Acoplamento

Dois acoplamentos são responsáveis por conectar os dois eixos a um torqueímetro, que será responsável pela principal medição deste trabalho, a carga imposta no eixo. Este tem como limite máximo de carga 100N.m. Sabendo que o torque nominal da MIP é 30N.m, este limite é suficiente para os objetivos desta tarefa.

Além do sensor citado acima, o sistema acoplado também possui encoder, com o objetivo de mensurar a velocidade de rotação.

O banco de resistores consiste em doze resistores de 80  $\Omega$ , com uma potência total de 6kW, mostrado na Figura 15. Para este trabalho, foi feito um paralelo de 5 resistores, resultando em uma resistência de 16  $\Omega$ . Esta carga foi ligada em um ramo do inversor trifásico, e através de um IGBT será chaveada fechando o circuito de armadura da máquina de corrente contínua.



**Figura 15:** Banco de resistores

Para a geração do PWM foi utilizado o Arduino Mega 2560, um microcontrolador, que dispõe de diversas entradas e saídas, incluindo 15 saídas PWM e 16 entradas analógicas (Arduino, 2014). Neste projeto, ele lê, em uma de suas entradas analógicas, o sinal de controle gerado pela dSPACE, e gera um PWM com frequência de 31kHz e razão cíclica proporcional a entrada lida. Este sinal passa pela placa de interface, e aciona um dos ramos do inversor trifásico. A Figura 16 contém o código compilado no microcontrolador. É utilizada a linguagem wiring, baseada em C e C++.

```
#include <TimerOne.h>
float x;
float z;
int y;
int myEraser = 7;
int myPrescaler = 1;
void setup(){
  TCCR2B &= ~myEraser;
  TCCR2B |= myPrescaler;
  pinMode(10, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
}
void loop(){
  x = (float)analogRead(A0);
  z = 255-x*255/1023;
  y = (int)z;
  analogWrite(10, y);
  Serial.println(x);
  Serial.println(y);
}
```

**Figura 16:** Código Arduino

Realizada a montagem, iniciou-se os ensaios práticos com as máquinas. Para a realização de cada teste alguns passos foram seguidos. Primeiramente é definido um controle em Matlab/Simulink®, que é então compilado. Em seguida, carrega-se o arquivo para a Dspace®. Utilizando o *software* ControlDesck® define-se todos os parâmetros para a simulação. Em seguida toda a instrumentação da plataforma é conferida. A parte de potência é então ligada, com o Variac trifásico mantendo o link CC do inversor pentafásico em 400V. Então liga-se a máquina pentafásica. Após atingir velocidade nominal, a fonte do campo da máquina de corrente contínua é ligada, com isso os testes estão prontos para serem executados.

As bibliotecas de Benvenuti (2014), utilizadas para a comunicação com a plataforma real, e os blocos de controle, estão representados nas figuras 17 e 18.

Foi escolhido uma estrutura de controlador do tipo PI, pois a única especificação de desempenho deste controle é erro nulo em regime permanente para seguimento de referência constante. Esta estrutura é simples e capaz de satisfazer esse critério. Para seguimento de outro perfil de referência, o uso de controladores mais avançados deve ser estudado.

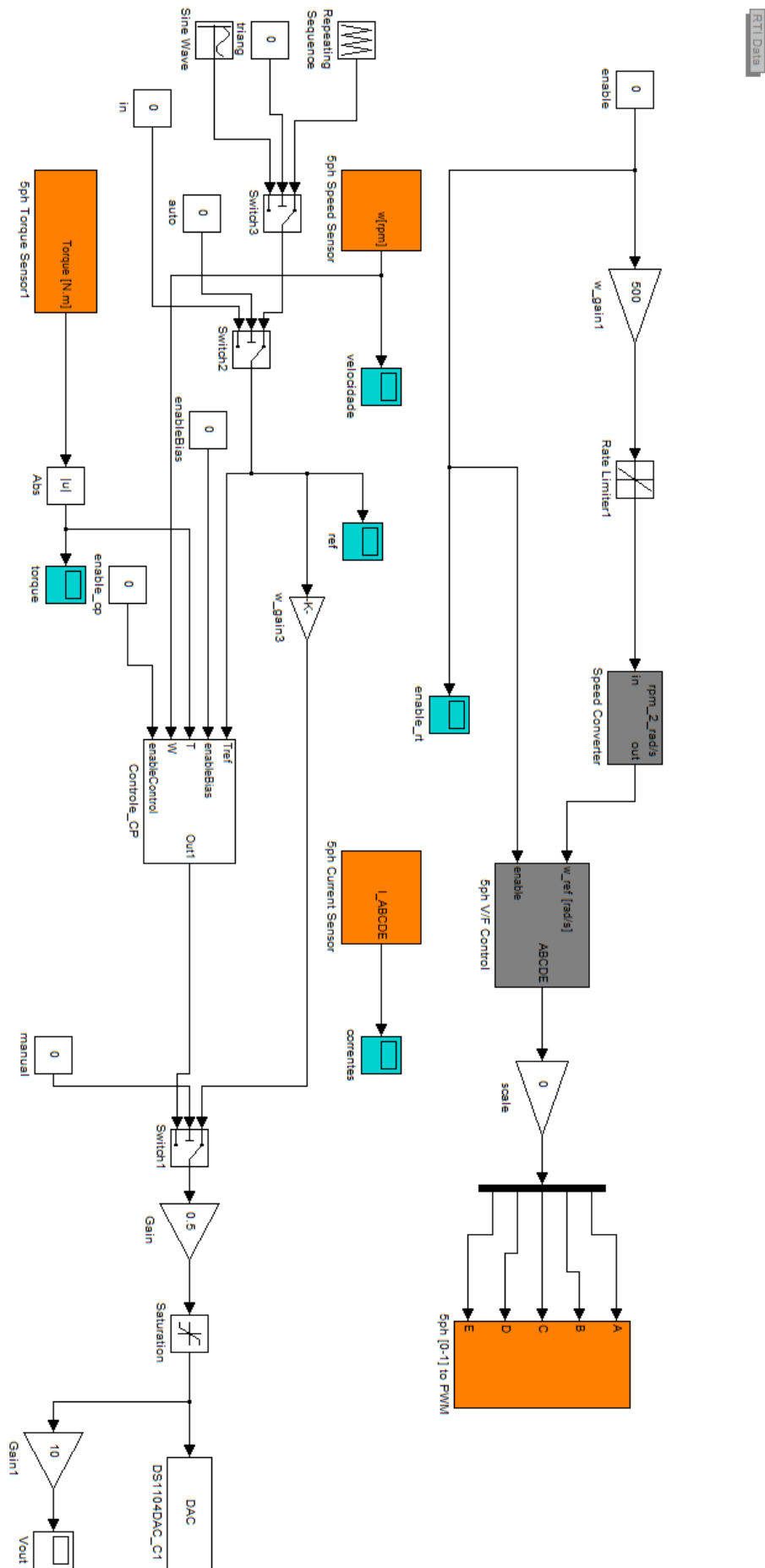


Figura 17: Diagrama de blocos para acionamento da plataforma

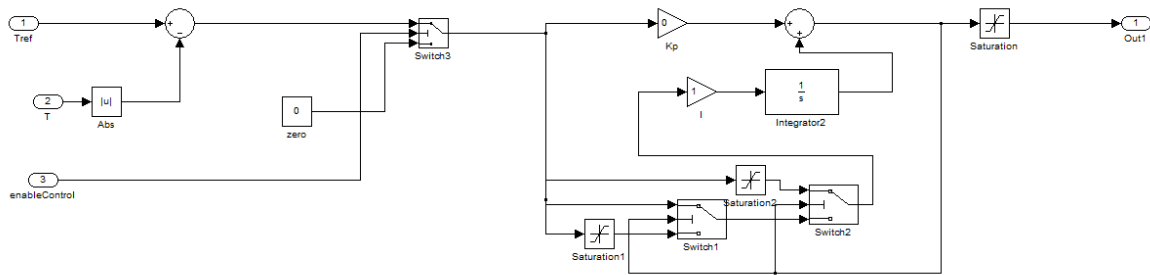


Figura 18: Diagrama de blocos do controlador

O *software* supervisorio utilizado para interface com a plataforma em tempo real, enquanto os testes estão sendo realizados é o ControlDesk (Figura 19). Nele foram inseridos campos que permitem alterar parâmetros do controle enquanto o controle está atuando na planta. Devido à essa facilidade de ajuste *online*, decidiu-se por sintonizar o controlador pelo método de tentativa e erro.

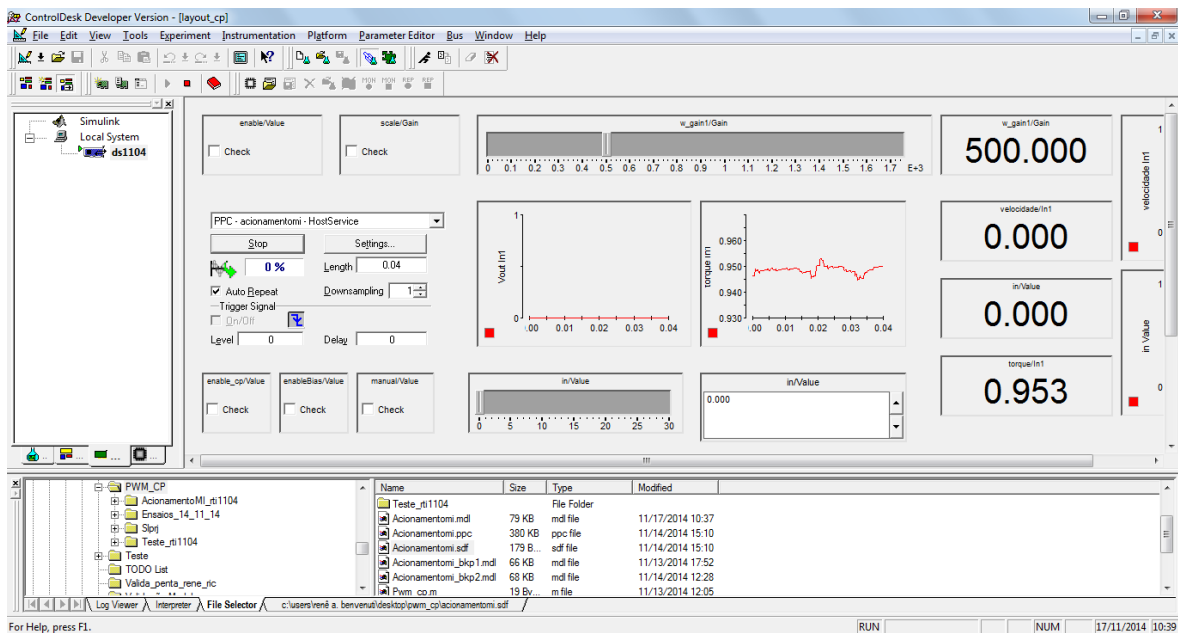


Figura 19: Ambiente ControlDesk®

### 3.4 Identificação

Considerando que a resposta do sistema é praticamente linear, com constantes de tempo elevadas, foi realizado um estudo dos fenômenos físicos do sistema, afim de projetar um controle em malha aberta.

A partir de (4) e (5), obtém-se:

$$I_a = \frac{E_a \cdot d}{R} = \frac{k_e \cdot \omega \cdot d}{R} \quad (6)$$



$$T = T_e + T_l = \frac{k_a \cdot k_e \cdot \omega \cdot d}{R} + T_l \quad (7)$$

$$d = \frac{(T - T_l) \cdot R}{k_a \cdot k_e \cdot \omega} \quad (8)$$

Onde:

$T_l$  é o torque de carga do sistema mecânico, independente da corrente [N.m]

$T$  é o torque que se deseja obter [N.m]

Foram realizados dois ensaios para levantar os seguintes parâmetros do sistema:  $T_l$ ,  $k_a$  e  $k_e$ . Primeiramente Variou-se o torque, e mensurou-se a corrente de armadura. Obtendo assim os valores apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Identificação do parâmetro  $K_a$

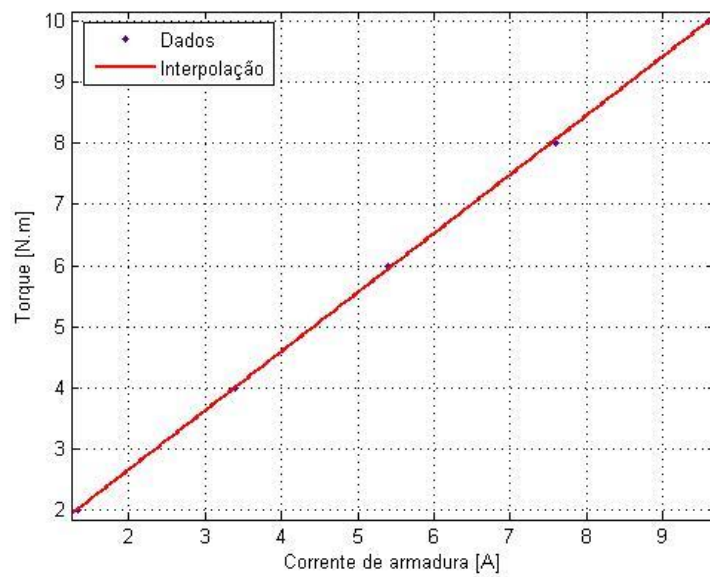
d [-]	Tm [N.m]	Ia [A]
0	0.85	0.07
0.224	2	1.33
0.404	4	3.4
0.594	6	5.4
0.796	8	7.59
0.985	10	9.6
1	10.77	10.4

O segundo ensaio variou a velocidade do eixo, e mediu-se a tensão gerada na armadura da máquina de corrente contínua. A Tabela 2 contém os resultados deste teste.

**Tabela 2:** Identificação do parâmetro  $K_e$

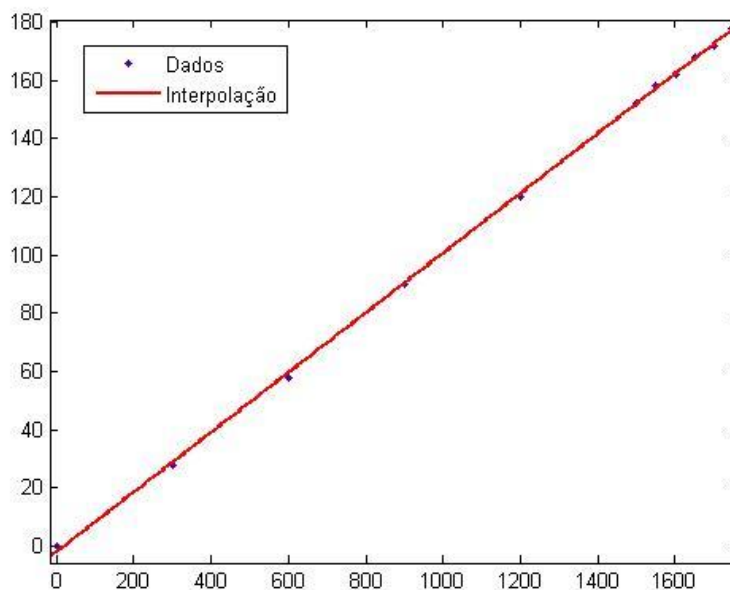
Ea [V]	W [rpm]
0	0
28	300
58	600
90	900
120	1200
152	1500
158	1550
162	1601.5
168	1650
172	1700
178	1747

Utilizando a ferramenta do Matlab *cftool*, foi possível interpolar os resultados por uma reta, gerando os gráficos apresentados nas figuras 20 e 21.



**Figura 20:** Interpolação (Torque x Corrente de armadura)

$$T = 0,9621 \cdot Ia + 0,7516 \quad (9)$$



**Figura 21:** Interpolação (Tensão x Velocidade)

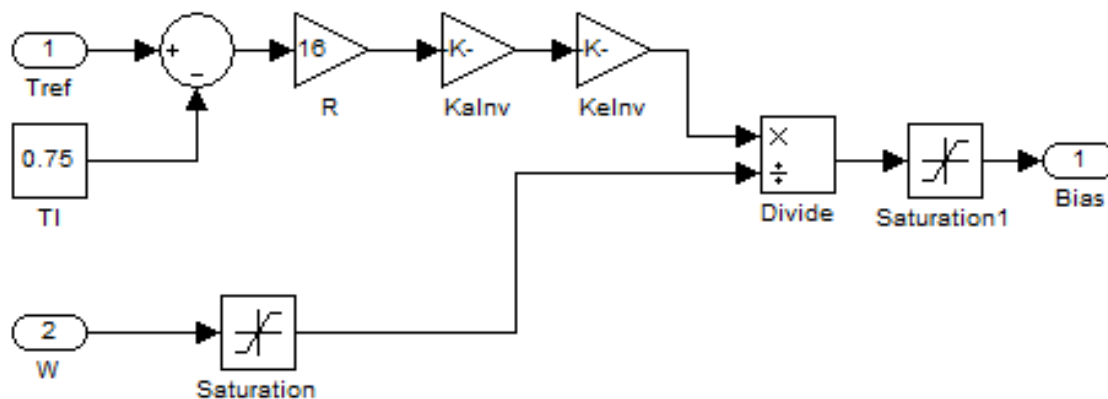
$$Ea = 0,1026 \cdot w \quad (10)$$

Com isso obtivemos  $T_l = 0.72 \text{ N.m}$ ,  $k_a = 0.9621 \text{ N.m/A}$  e  $k_e = 0.1026 \text{ V/RPM}$ , que substituindo em (5) temos:

$$d = \frac{(T - 0.72) \cdot 16}{0,96 \cdot 0,1026 \cdot \omega} \quad (11)$$

### 3.5 Controle Proposto

A função identificada anteriormente foi implementada em Matlab/Simulink® e está representado na Figura 22.



**Figura 22:** Controle em malha aberta - diagrama de blocos

Se o controle fosse implementado assim, teríamos um sistema em malha aberta, e não seria possível garantir erro nulo em regime permanente. Portanto também foi adicionado uma parcela integral com anti wind-up, assim resultando no diagrama de blocos da Figura 23.

A identificação foi feito considerando, no primeiro caso, uma velocidade constante, portanto essa aproximação só é válida quando a máquina CC está operando próximo à velocidade nominal. Para operar em uma velocidade mais baixa, deve-se realizar novos experimentos.

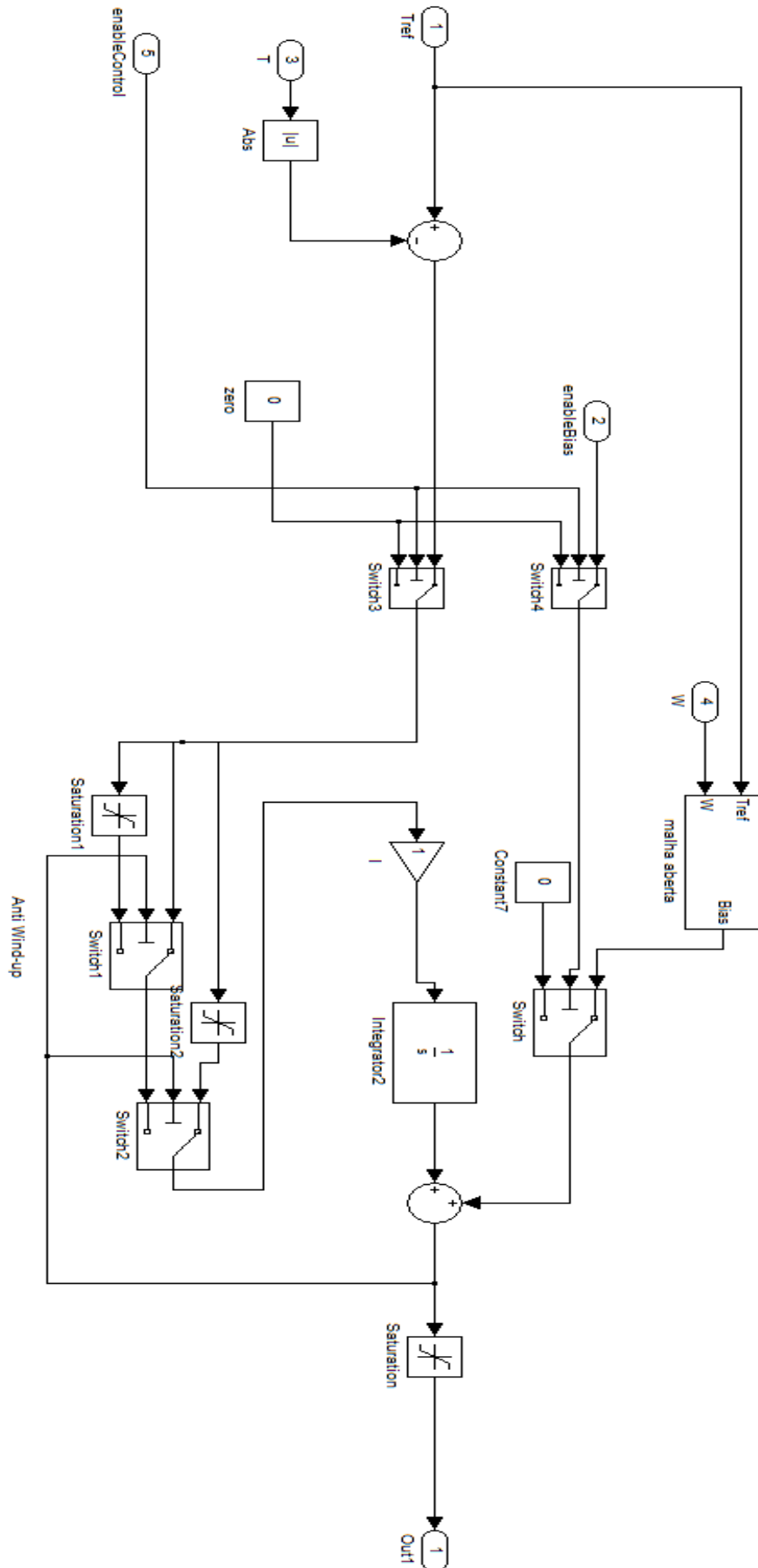


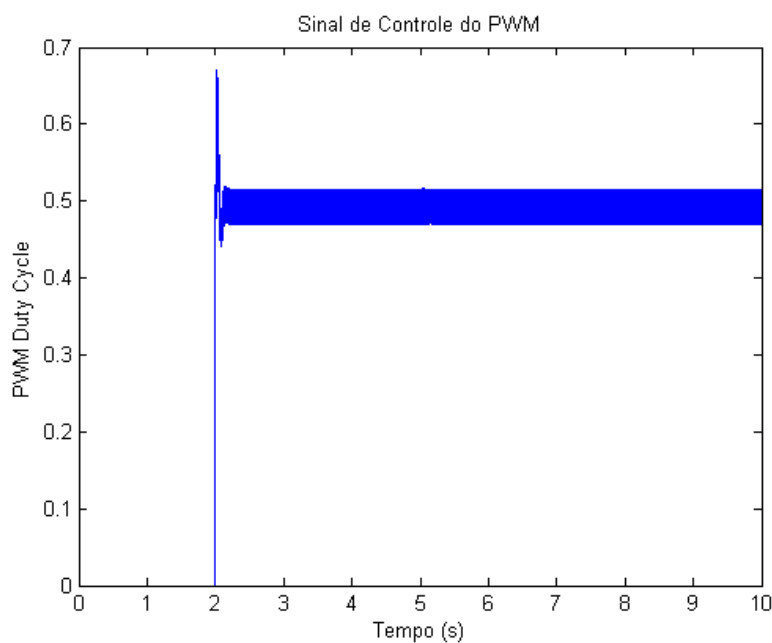
Figura 23: Controle com ação integral

## 4 Resultados Experimentais

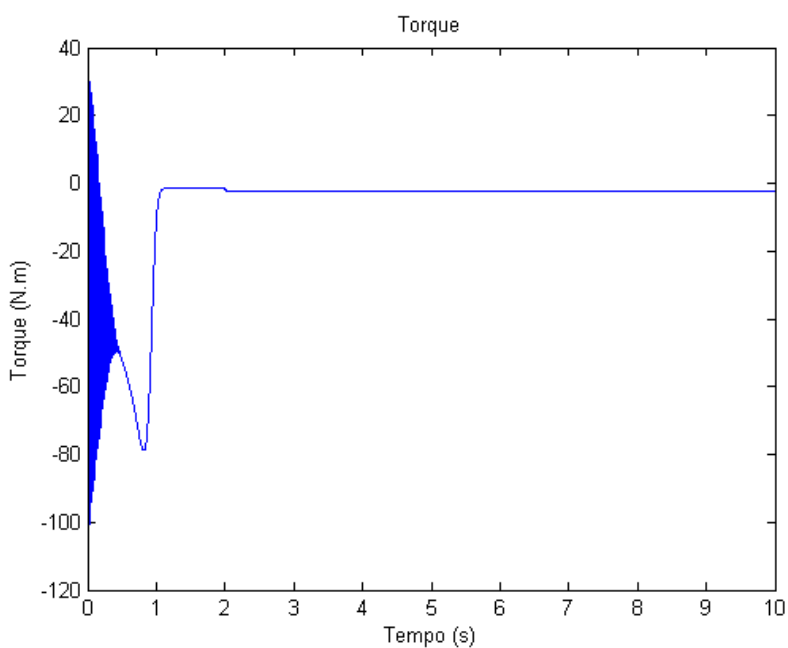
Seguindo os passos citados anteriormente, os seguintes testes foram realizados.

### 4.1 Simulação

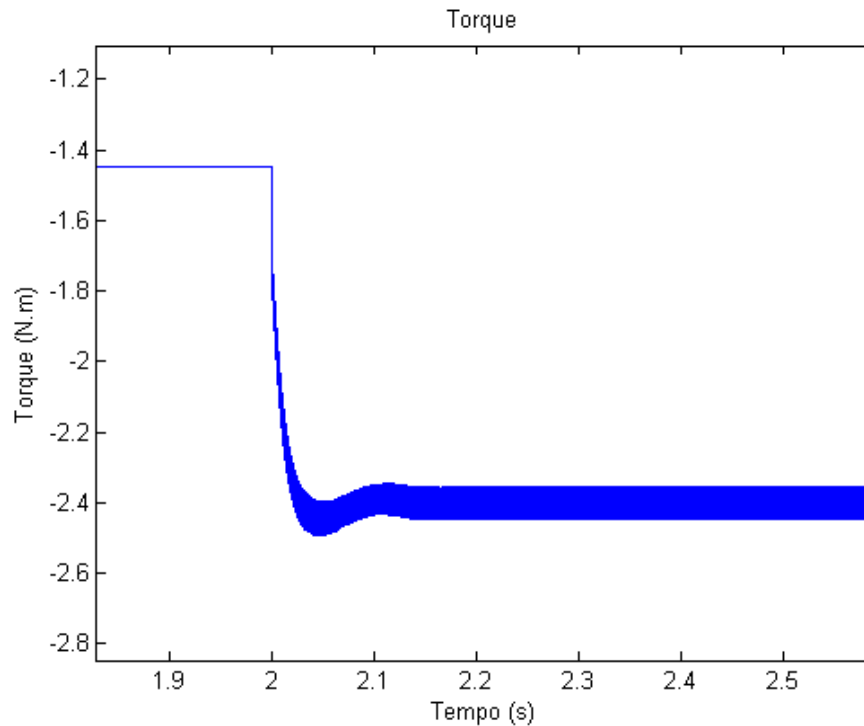
Realizada a simulação, obtivemos os resultados mostrados nas figuras 24,25 e 26. O controle de torque só é ativado no instante  $t = 2s$ . A referência de entrada é igual a 2,4N.m.



**Figura 24:** Razão cíclica do sinal de PWM aplicado no sistema.



**Figura 25:** Torque no eixo do motor de indução.

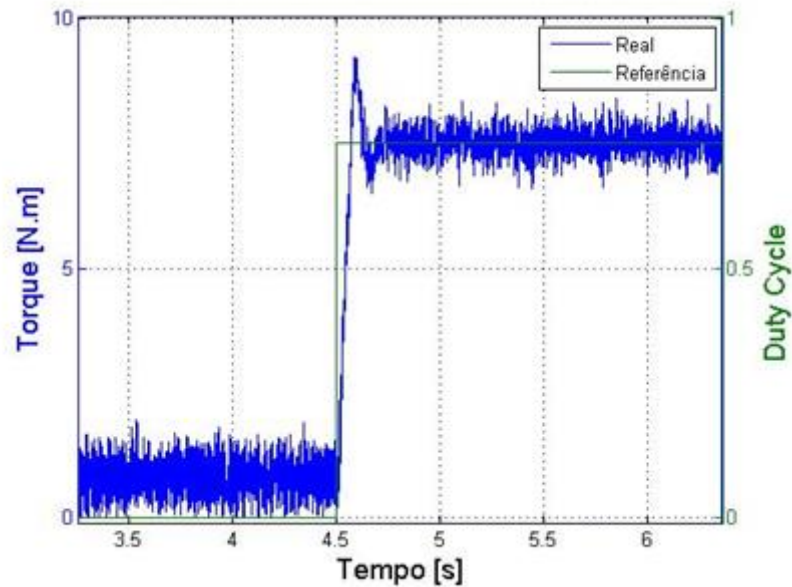


**Figura 26:** Torque no eixo do motor de indução (zoom).

Até o instante  $t = 1,2s$  pode-se notar a partida do motor. Quando o controle é ativado, observa-se o aumento da ação de controle. Existe um sobrepasso no sinal medido do torque, seguido de uma oscilação para então entrar em um regime estável. Nota-se um torque negativo, isso ocorre devido ao sentido de rotação escolhido. O controle não é afetado pois ele recebe como entrada o torque em módulo. O desempenho do controle não é avaliado nesse caso, pois não foi sintonizado. Este ensaio mostrou que o método proposto para aplicação de carga é plausível.

#### 4.2 Ensaio usando um degrau como sinal de referência

Para melhor projetar os controladores, um degrau foi aplicado no sinal de entrada do sistema, que é o duty cycle aplicado pelo PWM do arduíno no inversor. O torque medido e a referência podem ser vistos na Figura 27.

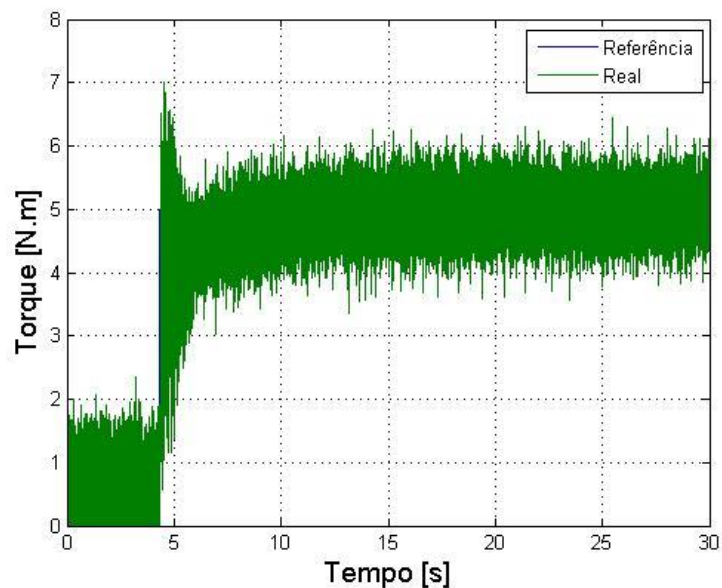


**Figura 27:** Resposta do sistema a um degrau de entrada

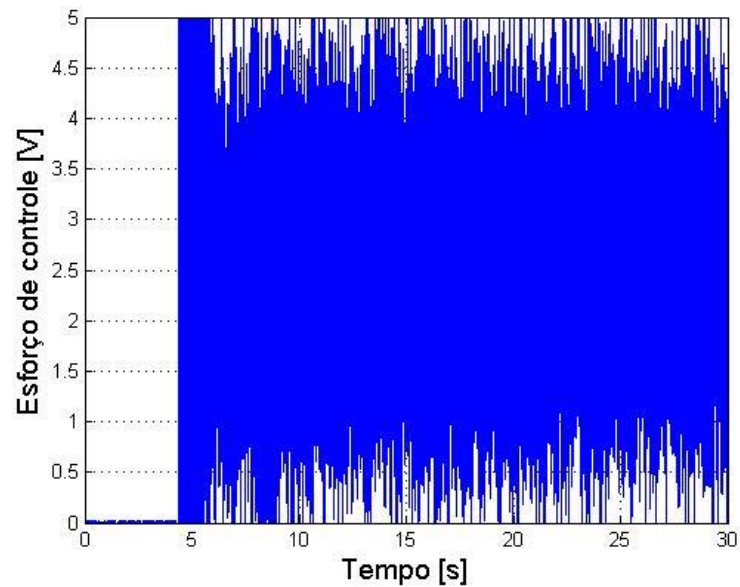
Constatou-se que com o ruído na medição do torque, os resultados ficaram pouco precisos. Pode-se estimar somente a constante de tempo do sistema como aproximadamente  $\tau = 0,1$  s.

#### 4.3 Controle com ruído na medição do torque

Com as máquinas ligadas, o controle foi sintonizado através da interface do *software* ControlDesk®. A Figura 28 refere-se ao melhor resultado que foi possível obter, com o esforço de controle representado na Figura 29.



**Figura 28:** Controle com ruído



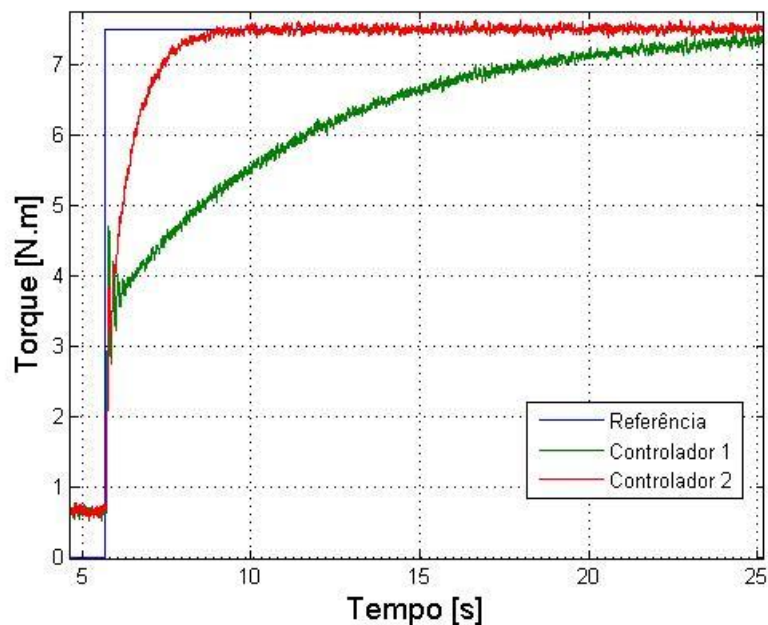
**Figura 29:** Esforço de controle do controle com ruído

Os parâmetros utilizados na sintonia do controlador foram:  $k_p = 0,08$  e  $k_i = 0,36$ . Observa-se que a ação de controle fica oscilatória, chegando a saturar em certos instantes de tempo devido ao ruído de medição. Esse comportamento prejudica o uso do PWM como atuador, pois a referência de duty cycle não é constante.

#### 4.4 Controlador PI

Após aplicado um filtro de *software* na entrada de torque mensurada, repetiu-se o experimento, sintonizando novamente um controle PI. As figuras 30, 31, 32 e 33 contém os resultados obtidos.





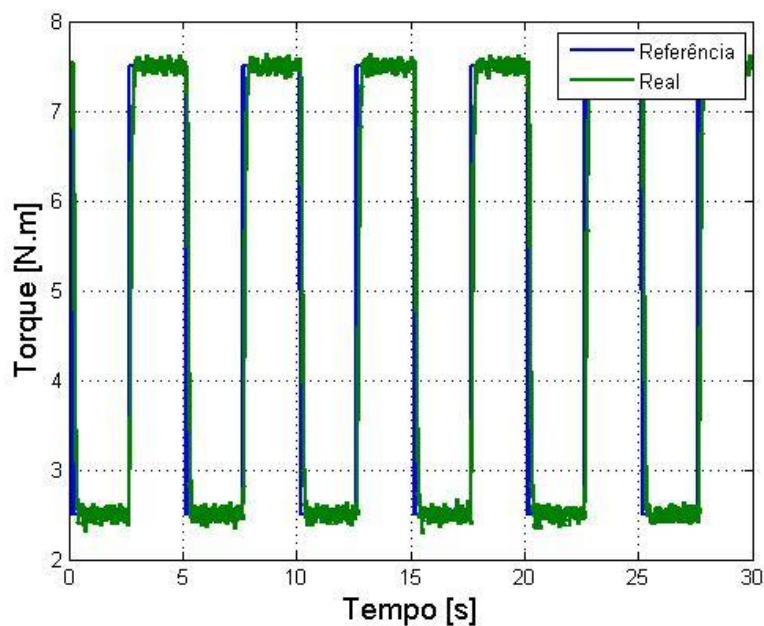
**Figura 30:** Comparação do controlador 1 com o 2

A Figura 26 compara dois controles diferentes:

Controlador 1:  $k_p = 0,08$  e  $k_i = 0,36$ .

Controlador 2:  $k_p = 0,05$  e  $k_i = 3,6$ .

Observa-se que com essa facilidade de ajustar o controle em tempo real, enquanto a plataforma está funcionando, é muito útil na busca de uma sintonia ideal.



**Figura 31:** Seguimento de referência com PI

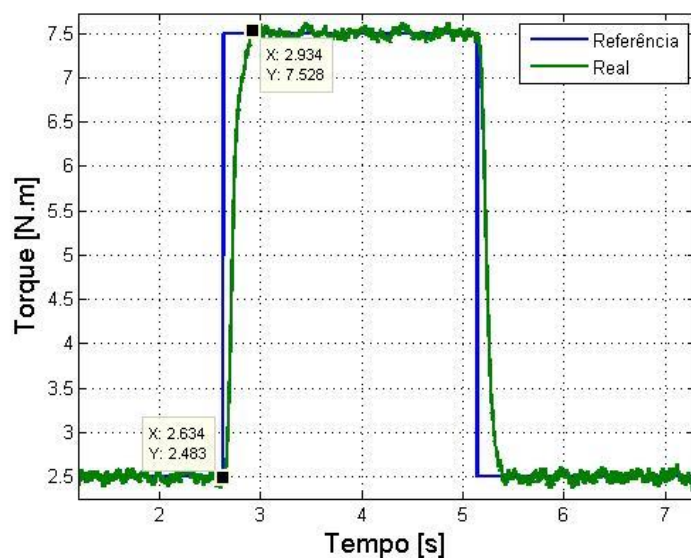


Figura 32: Seguimento de referência com PI (zoom)

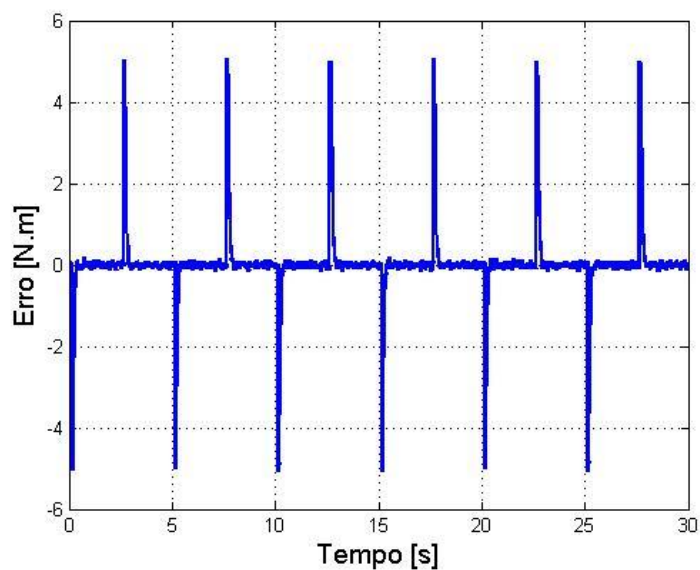
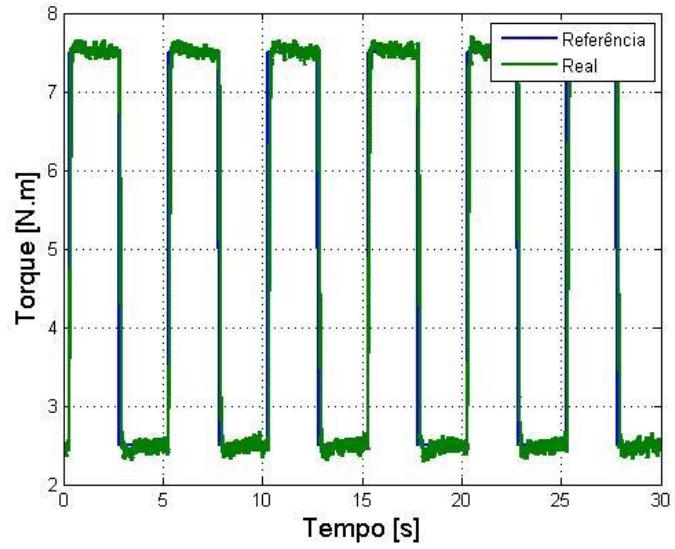


Figura 33: Erro - PI

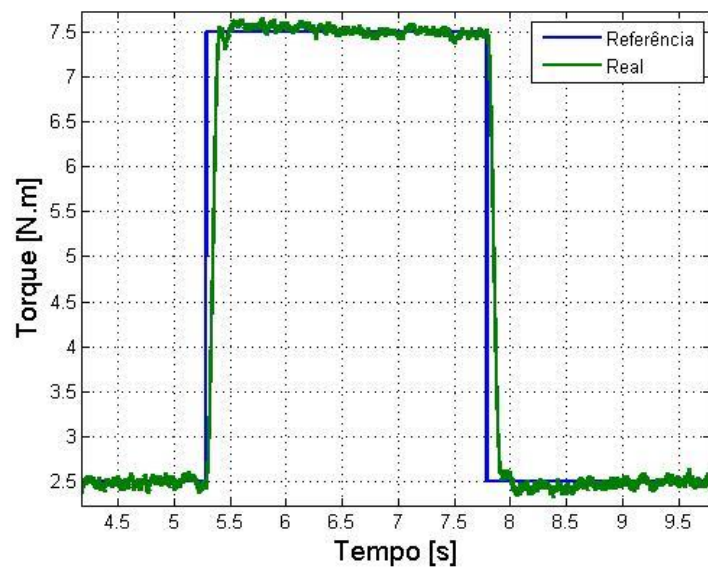
As figuras 27, 28 e 29 foram obtidas do ensaio com o controlador com os seguintes parâmetros: Controlador 1:  $k_p = 0,025$  e  $k_i = 40$ . Este apresentou erro nulo em regime permanente, e tempo de acomodação menor que 0,3 s, satisfazendo os critérios estabelecidos para um bom controle.

#### 4.5 Controlador proposto

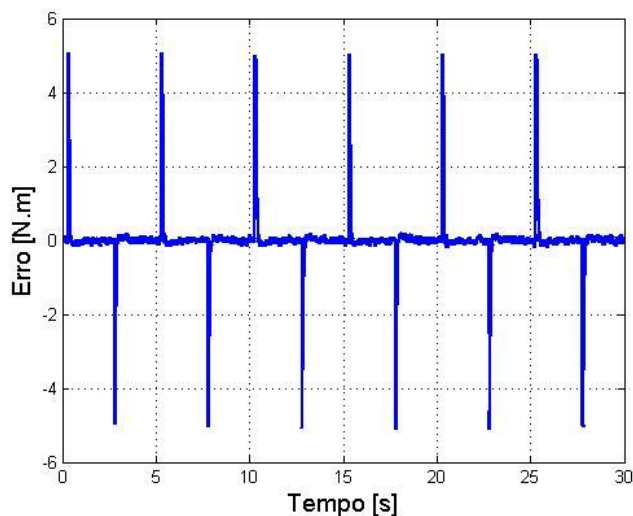
Aplicando o controle projetado na seção 4.5, e sintonizando o ganho integral para seu melhor desempenho ( $k_i = 8$ ), obtivemos os resultados representados nas figuras 34, 35 e 36.



**Figura 34:** Seguimento de referência – Controlador projetado



**Figura 35:** Seguimento de referência – Controlador projetado (zoom)

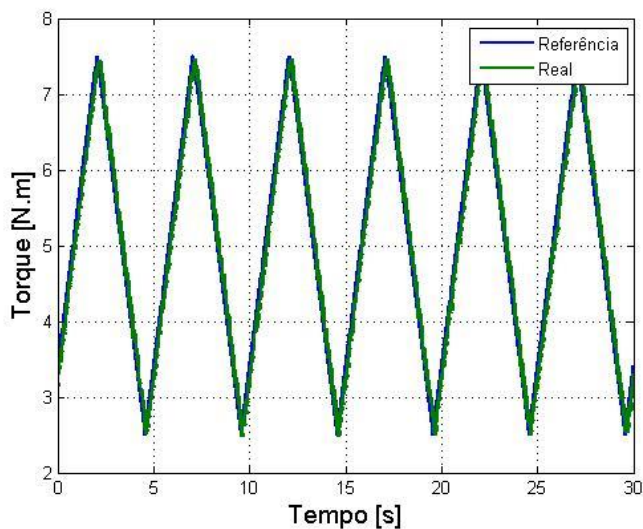


**Figura 36:** Erro – controlador projetado

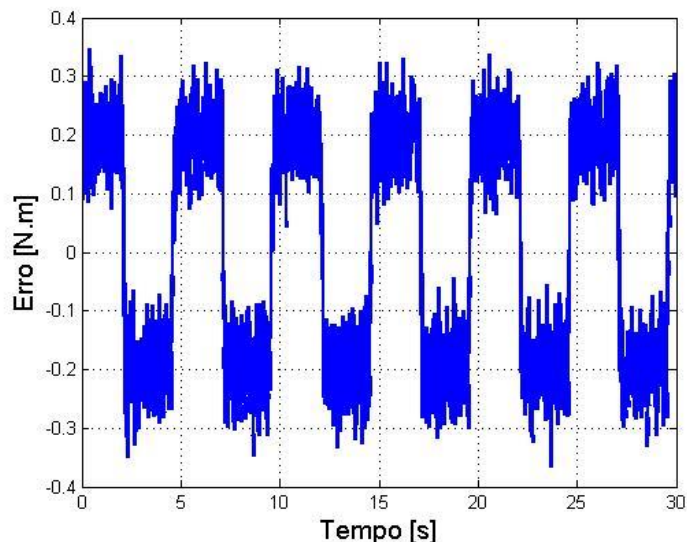
Assim como o controle PI, este ensaio obteve erro nulo em regime permanente. O tempo de acomodação, nesse caso, foi de 0,15s, obtendo assim um resultado melhor que o anterior. Porém nota-se um sobre passo na resposta.

#### 4.6 Seguimento de outras referências

A seguir, ambos os controladores foram aplicados a uma referência de onda triangular e onda senoidal. Os resultados são ilustrados pelas figuras de 37 a 42.

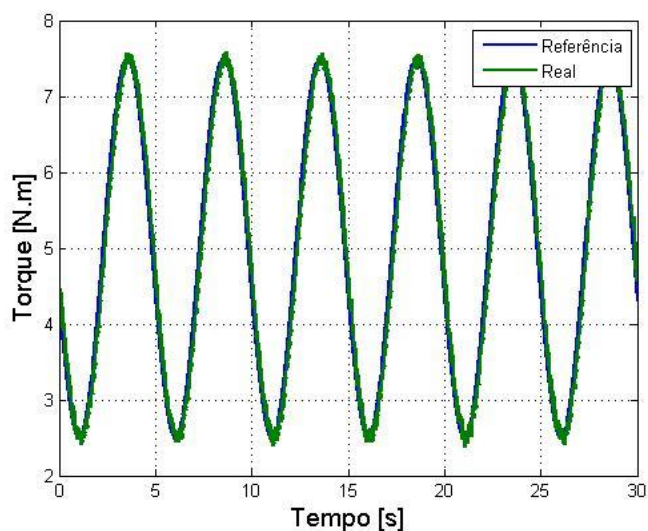


**Figura 37:** Seguimento de onda triangular - PI



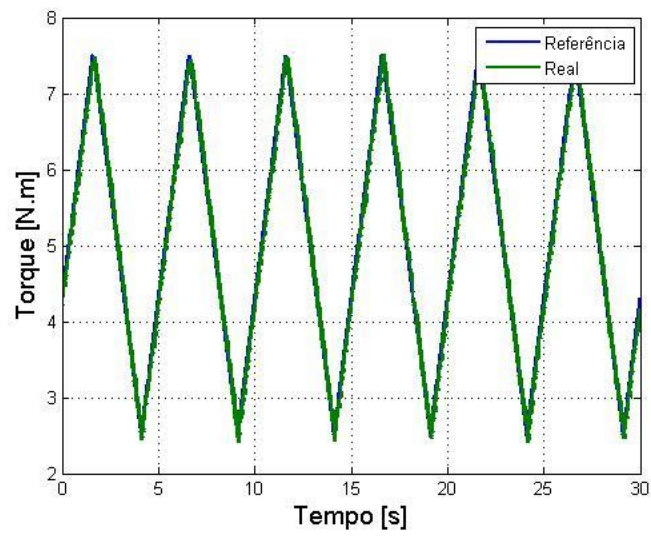
**Figura 38:** Erro de seguimento de onda triangular – PI

O controlador PI apresentou erro constante para uma entrada do tipo rampa. Esse comportamento já era esperado, considerando que o controle foi projetado apenas para uma referência do tipo salto. Porém, o resultado ainda assim é satisfatório, pois reproduz a forma de onda com erro de apenas 0.2 N.m, valor aceitável para aplicação de carga dinâmica.

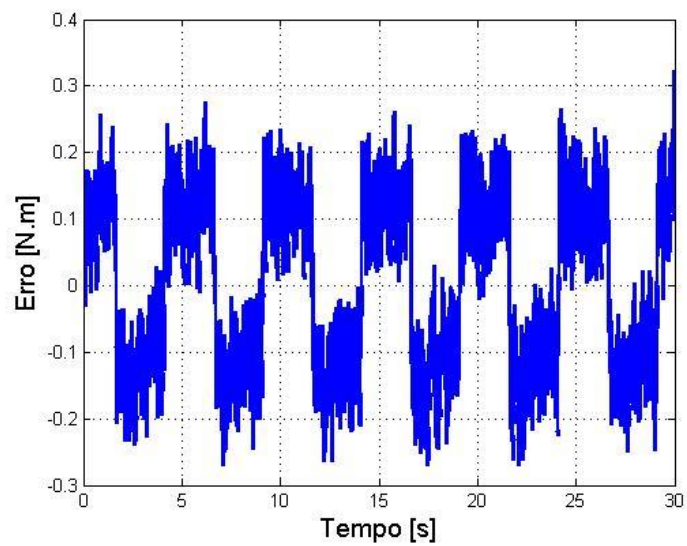


**Figura 39:** Seguimento de onda senoidal – PI

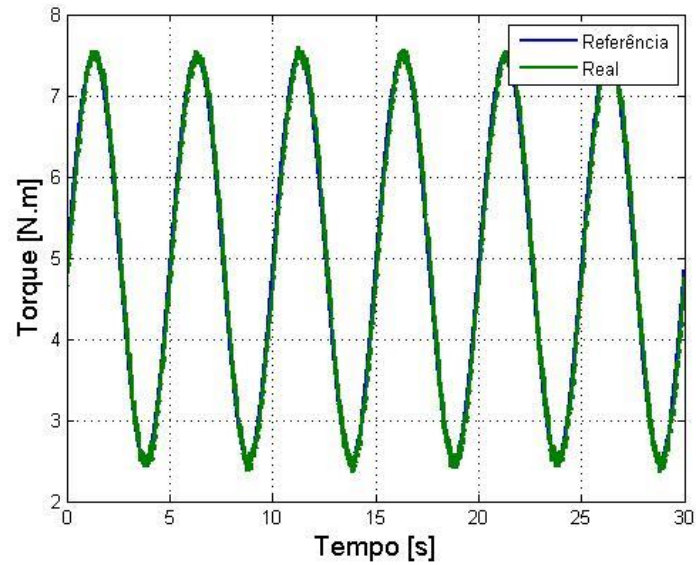
Para uma referência senoidal, obteve-se uma pequena defasagem. Mesmo assim, o controle conseguiu reproduzir a forma de onda com boa precisão. Considerando que não foi feito nenhum ajuste dedicado a este formato de onda, pode-se dizer que o resultado foi satisfatório.



**Figura 40:** Seguimento de onda triangular – Controlador projetado



**Figura 41:** Erro de seguimento de onda triangular – Controlador projetado



**Figura 42:** Seguimento de onda senoidal – Controlador projetado

Assim como o controlador PI, o controlador proposto por esse trabalho também obteve erro constante para a entrada do tipo rampa.

## 5 Conclusões

O presente trabalho buscou implementar uma plataforma para imposição de cargas dinâmica no eixo de uma máquina de indução. Realizou-se simulações em software, assim como ensaios práticos. Os resultados obtidos na prática mostraram-se satisfatórios, dado que reproduziram bem os resultados esperados pelas simulações.

Validou-se o uso da plataforma como ferramenta didática para o estudo de motores de indução, pois foi possível reproduzir curvas de carga programadas, que podem ser substituídas por dados reais.

A performance da plataforma foi satisfatória, pois foi atingido um seguimento de referência adequado, com erro nulo em regime permanente.

A execução de novos experimentos utilizando a carga programável se tornou possível, e com facilidade. O usuário pode estabelecer uma referência contante, que o sistema irá segui-la, apesar de não ter sido estudado o desempenho transitório.

Os dois controles testados se mostraram eficazes, cumprindo as especificações de desempenho. O PI teve melhor desempenho para o seguimento de referência constante, dado que não apresentou sobrepasso, e obteve um menor tempo de acomodação. O controlador projetado resultou em um erro constante menor para os casos de referência triangular e senoidal.

Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- Desenvolvimento e projeto de uma estratégia de controle para outros perfis de carga.
- Desenvolvimento de um bloco no simulink para facilitar o uso da carga programável em aplicações que não a tenham como principal objetivo.
- Projeto de um *hardware* dedicado para a função exercida pelo arduino, pois ele está sendo subutilizado.
- Adicionar mais resistores em paralelo com a carga, para obter um maior alcance de torque possível.



## 6 Referências

Arduino (2014). <http://www.arduino.cc/>.

BENVENUTI, R.A.; PEREIRA, L.F.A.; PEREIRA, L.A.; GOTZ, M. **Plataforma para simulação e implementação de técnicas de controle de MIT e MIP em Matlab/Simulink.** (2014).

BORBA, M.; PEREIRA, L.F.A.; SCHARLAU, C.C.; HAFFNER, J.F. **Modelagem, Implementação e Validação de Cargas Dinâmicas em Máquinas de Indução.** In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador. Anais do XVI CBA, 2006. v. 1. p. 2808-2813.

CONTE, R.; PEREIRA, L.F.A. e HAFFNER, J. **Ambiente integrado para desenvolvimento de estratégias de acionamento e controle de máquinas de corrente alternada,** XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado (2004).

dSPACE (2014). <http://www.dspace.com/>.

NASCIMENTO, J.; GERALDO ., **Máquinas elétricas: teoria e ensaios.** 4 Ed, São Paulo: Érica, 2011.

PSim (2014). <http://powersimtech.com/>.