

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE DINAMÔMETRO PARA  
TESTES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

por

Rafael da Cruz Haical

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2009.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE DINAMÔMETRO PARA  
TESTES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

por

Rafael da Cruz Haical  
Engenheiro Eletricista

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Isaac Newton Lima da Silva

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Prof. Horácio Antonio Vielmo  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, junho de 2009.

## RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada de torque e velocidade de rotação para testes de motores de combustão interna em uma bancada que possui um dinamômetro de correntes de Foucault. É apresentada uma revisão bibliográfica que abrange a fundamentação teórica básica sobre dinamômetro, alguns dos principais testes realizados em motores de combustão interna e técnicas de controle e instrumentação que estão sendo desenvolvidas por pesquisadores sobre o tema de controle de dinamômetro para testes de motores de combustão interna. O projeto surgiu com a necessidade do Laboratório de Motores da UFRGS realizar vários testes em motores a combustão tendo uma maior confiabilidade e rapidez para aquisição dos resultados. Este sistema está baseado num microcontrolador da família Atmega onde foram implementados os algoritmos de um controlador PID e um proporcional, que controlam respectivamente, os níveis de corrente contínua aplicadas no dinamômetro e o percentual de abertura da borboleta do motor combustão através de um motor de passo. A etapa de controle é executada no microcontrolador e uma interface gráfica foi implementada em Labview. Esta interface gráfica faz a leitura via porta serial dos dados do microcontrolador e traça suas curvas as salvando em arquivo, também se pode visualizar os sinais das temperaturas do motor e dinamômetro e nível de combustível do reservatório. A validação do controle desenvolvido foi comprovada através da verificação da convergência dos sinais para os valores de referência desejados. O controle propiciou também uma diminuição dos tempos para obtenção das respostas desejadas em comparação com o sistema anterior de controle manual.

**Palavras-chave:** dinamômetro, controle de velocidade, controle torque instrumentação, motor de combustão interna.

## ABSTRACT

### “DEVELOPMENT OF A DYNAMOMETER CONTROL SYSTEM OF TESTS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES.”

This paper describes the development of a torque and rotation speed closed loop control system for internal combustion engine tests in a bench using a Foucault current dynamometer. A bibliographical review that encompasses basic dynamometer theoretical concepts, some of the most important tests applied to internal combustion engines, and control and instrumentation techniques currently under development on dynamometer testing for internal combustion engines is presented. This project needs to perform tests in combustion engines which would produce more dependable and faster results. The system herein developed is based on an Atmega-type microcontroller where algorithms of both a PID and a proportion controller, controlling respectively the levels of direct current applied through the dynamometer coils and the opening of an internal combustion engine throttle body by means of a step motor, were implemented. The control stage was done in the microcontroller and a graphic interface for a personal computer was created in Labview. This graphic interface facilitates the microcontroller data reading and traces its curves, saving them in a file; also, the engine and dynamometer temperature signals and the tank fuel level can be visualized. The validation of this control has been proved by the signal convergence check for desired reference values. Furthermore, the control has enabled a reduction in ideal answer time attainment as compared to the previous manual system.

**Keywords:** dynamometer, speed control, torque control, instrumentation, internal combustion engine.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 O Problema</b> .....	1
<b>1.2 Objetivo Geral</b> .....	2
<b>1.3 Os Objetivos Específicos</b> .....	2
<b>1.4 Organização do Trabalho</b> .....	3
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	4
<b>2.1 Dinamômetro</b> .....	4
2.1.1 Descrição dos Tipos de Dinamômetros.....	4
2.1.1.1 Dinamômetro de Correntes de Foucault.....	4
2.1.1.2 Dinamômetro Hidráulico.....	6
2.1.1.3 Dinamômetro de Corrente Alternada.....	6
2.1.1.4 Dinamômetro de Corrente Contínua.....	7
<b>2.2 Motores de Combustão ou Térmicos</b> .....	7
2.2.1 Motores de Ciclo Quatro Tempos.....	7
<b>2.3 Tipos de Testes</b> .....	8
2.3.1 Teste de Emissões.....	9
2.3.2 Teste de Consumo de Combustíveis.....	10
2.3.3 Teste de Amaciamento de Motores.....	11
2.3.4 Teste de Desempenho de Lubrificantes.....	12
<b>2.4 Controlador</b> .....	12
2.4.1 Ação de Controle Proporcional.....	13
2.4.2 Ação de Controle Integral.....	13
2.4.3 Ação de Controle Derivativa.....	13
2.4.4 Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID).....	14
<b>2.5 O Software MATLAB</b> .....	14
2.5.1 O Software Simulink.....	14
2.6 O Software Labview.....	15
<b>2.7 Estado da Arte da Instrumentação e Controle de Bancada Dinamométrica</b> .....	15
<b>3. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	18
<b>3.1 Introdução</b> .....	18
<b>3.2 Descrição dos Componentes do Sistema</b> .....	19
3.2.1 Componentes Mecânicos.....	21

3.2.2 Sensores.....	23
3.2.3 Componentes Eletrônicos.....	29
3.2.4 Interface Gráfica.....	36
<b>4. IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS E MODELAGEM.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Identificação das Características do Dinamômetro.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Identificação das Características da Célula de Carga do Dinamômetro.....</b>	<b>41</b>
<b>4.3 Características do Motor de Passo.....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 Identificação e Modelagem Dinâmica do Sistema.....</b>	<b>42</b>
<b>5. PROJETO DE CONTROLADORES PARA ROTAÇÃO E POTÊNCIA.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1 As Ações dos Controladores Adotados.....</b>	<b>45</b>
<b>5.2 Controlador do Torque.....</b>	<b>45</b>
5.2.1 Controlador Proporcional para o Torque.....	45
5.2.2 Ajuste do Ganho do Controlador Proporcional.....	47
<b>5.3 Controlador da Rotação.....</b>	<b>47</b>
5.3.1 Controlador PID para Rotação.....	47
5.3.2 Ajuste dos Ganhos do Controlador PID.....	48
5.3.3 Validação dos Ajustes dos Ganhos.....	50
<b>6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>52</b>
<b>6.1 Resultados Experimentais de Teste de Amaciamento de Motores – Motor Fiat</b>	
<b>1.6/16V.....</b>	<b>52</b>
6.1.1 Condição do Controlador Variando a Rotação e Mantendo o Torque Fixo.....	58
6.1.2 Condição do Controlador Mantendo a Rotação Fixa e Variando o Torque.....	60
6.1.3 Condição do Controlador Variando Torque e Rotação Desejados.....	61
6.1.4 Condição do Controlador Variando Torque e Rotação Desejados a Partir da Condição Inicial do Motor.....	62
<b>6.2 Resultados Experimentais de Teste de Amaciamento de Motores - Motor GM151S.....</b>	<b>63</b>
<b>6.3 Resultados Experimentais de Teste de Consumo ou Desempenho de Combustíveis.....</b>	<b>67</b>
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>74</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>

## Lista de Símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
CO	Monóxido de carbono	
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	
d	Comprimento do braço de alavanca do dinamômetro	[m]
ECU	Unidade eletrônica de controle	
F	Força	[N]
HC	Hidrocarbonetos	
ISO	International Organization for Standardization	
K <sub>d</sub>	Ganho derivativo	
K <sub>i</sub>	Ganho integral	
K <sub>p</sub>	Ganho proporcional	
MPFI	Multi point fuel injection	
N	Velocidade de rotação do motor de combustão	[RPM]
NBR	Normas Brasileira Regulamentada	
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio	
P	Potência fornecida pelo motor de combustão interna	[W]
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)	
T	Torque	[Nm]
TPS	Throttle Position Sensor	
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: O esquema da ilustra princípio de funcionamento do freio eletromagnético.....	5
Figura 2.2: Tempos de um motor de combustão interna do Ciclo de Otto.....	8
Figura 2.3: Sistema de Controle de Malha Fechada.....	13
Figura 2.4: Diagrama em Blocos do controlador [Roos e Montijo, 2005].....	16
Figura 2.5 Interface gráfica [Cruz e Duarte, 2006].....	16
Figura 2.6: Interface Gráfica [Moulton, 2007].....	17
Figura 3.1: Aparato experimental de testes com o sistema de instrumentação e controle do bancada.....	18
Figura 3.2: Bancada de visualização e gravação de dados e etapa de controle.....	19
Figura 3.3: Diagrama esquemático das ligações do sistema instrumentação e controle da bancada.....	20
Figura 3.4: Vista geral do motor Fiat 1.6/16V.....	21
Figura 3.5: Dinamômetro de Correntes de Foucault ZÖLLNER.....	22
Figura 3.6: Motor de Passo SLO-SYN.....	23
Figura 3.7: LM35 da saída de água do dinamômetro.....	24
Figura 3.8: Sensor de posição acoplado ao corpo de borboleta.....	25
Figura 3.9: Sensor de rotação.....	26
Figura 3.10: Célula de carga Z-250.....	27
Figura 3.11: Esquema de fixação de célula de carga no dinamômetro.....	28
Figura 3.12: Célula de carga do reservatório de combustível.....	29
Figura 3.13: Interface com o microcontrolador.....	31
Figura 3.14: A placa condicionadora de sinais.....	32
Figura 3.15: Placa de Potência.....	33
Figura 3.16: Conversor A/D NI USB-6009.....	34
Figura 3.17: Diagrama esquemático da Unidade Eletrônica de Controle Electromotive TEC – II. Adaptado de Electromotive (1998).....	35
Figura 3.19: Interface gráfica implementada através do Labview.....	37
Figura 4.1: Exemplo de diferentes larguras de pulso de um PWM de período T.....	38
Figura 4.2: Corrente elétrica versus largura de pulso do sinal de acionamento do freio.....	39
Figura 4.3: Largura de pulso versus nível de freio.....	40



Figura 4.4: Gráfico da tensão na célula de carga versus massa.....	42
Figura 4.5: Respostas experimentais da rotação ao longo do tempo do sistema em malha aberta ao sinal degrau.....	43
Figura 4.6: Curvas de rotação obtidas através de experimentos e simulação.....	44
Figura 5.1: Diagrama em blocos para o controle do torque.....	46
Figura 5.2: Diagrama esquemático do laço de controle da carga.....	46
Figura 5.3: Diagrama em blocos para o controle de rotação.....	47
Figura 5.4: Diagrama Esquemático do laço de controle da rotação.....	48
Figura 5.5: Diagrama de blocos do controlador de rotação do sistema.....	49
Figura 5.6: Curvas do sinal de controle e do sinal saturado para o caso do controle de rotação do sistema.....	50
Figura 5.7: Validação dos ajustes dos ganhos do controlador da rotação do sistema.....	51
Figura 6.1: Resposta no tempo da rotação - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.....	54
Figura 6.2: Resposta no tempo do torque - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.....	55
Figura 6.3: Resposta da potência no tempo - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.....	55
Figura 6.4: Gráfico da resposta no tempo da abertura de borboleta - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.....	56
Figura 6.5: Gráfico da resposta no tempo do nível percentual de freio - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.....	57
Figura 6.6: Gráfico da resposta no tempo do nível de combustível do reservatório - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.....	57
Figura 6.7: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio.....	59
Figura 6.8: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio.....	60
Figura 6.9: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio.....	61
Figura 6.10: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio.....	63
Figura 6.11: Resposta no tempo da rotação - teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – GM151S.....	65

Figura 6.12: Resposta no tempo do torque - teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – GM151S.....	65
Figura 6.13: Resposta no tempo da potência, percentual de abertura da borboleta e nível percentual de freio - teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – GM151S.....	66
Figura 6.14: Diagrama em blocos para o controle do percentual de abertura de borboleta.....	67
Figura 6.15: Resposta no tempo da rotação - teste do tipo consumo ou desempenho de combustíveis no sistema de controle experimental – Fiat1.6/16V.....	69
Figura 6.16 Resposta no tempo do percentual de abertura da borboleta - teste do tipo consumo ou desempenho de combustíveis no sistema de controle experimental – Fiat 1.6/16V.....	69
Figura 6.17: Resposta no tempo do torque, potência, nível percentual de freio e nível de combustível do reservatório- teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – Fiat 1.6/16V.....	70

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Dados para teste de emissões de poluentes.....	9
Tabela 2.2: Dados para teste de consumo de combustíveis.....	10
Tabela 2.3: Dados da etapa I para teste de amaciamento de motores.....	11
Tabela 2.4: Dados da etapa II para teste de amaciamento de motores.....	11
Tabela 2.5: Dados para teste de desempenho de Lubrificantes.....	12
Tabela 3.1: Dados técnicos do motor Fiat 1.6/16V.....	22
Tabela 3.2: Dados Técnicos do Sensor LM35.....	24
Tabela 3.3: Dados Técnicos do Sensor Óptico H21B1.....	26
Tabela 3.4: Dados Técnicos da Célula de Carga Z-250.....	27
Tabela 3.5: Dados Técnicos da Célula de Carga CDL-10.....	28
Tabela 3.6: Dados técnicos do microcontrolador ATMEGA16.....	29
Tabela 3.7: Dados técnicos do display Tech1602b.....	30
Tabela 3.8: Dados técnicos do amplificador INA126.....	31
Tabela 3.9: Faixa de ganhos.....	32
Tabela 3.10: Dados técnicos da placa de aquisição NI USB-6009 DAQ.....	33
Tabela 3.11: Dados técnicos do transistor IRF640.....	34
Tabela 3.12: Dados técnicos técnicas do da fonte PS-6000.....	36
Tabela 3.13: Dados técnicos técnicas do da fonte MPC-303DI.....	36
Tabela 4.1: Valores de largura de pulso de acordo com a corrente aplicada ao dinamômetro.....	39
Tabela 4.2: Relação Nível de Freio e Largura de Pulso.....	40
Tabela 4.3: Tabela de Calibração da Célula Carga.....	41
Tabela 6.1: Dados para teste reduzido de amaciamento de motor.....	53
Tabela 6.2: Dados para teste reduzido de amaciamento de motor.....	64
Tabela 6.3: Dados para teste reduzido de consumo ou desempenho de combustíveis.....	68

## **1. INTRODUÇÃO**

O Laboratório de Motores da UFRGS tem realizado testes em motores de combustão interna com o objetivo de avaliar potência, desempenho de lubrificantes e combustíveis e questões ambientais, como o estudo dos gases provenientes da combustão.

Na maioria dos testes, é necessário utilizar um sistema que controle a velocidade de rotação e torque no motor de combustão interna, pois esses testes devem seguir curvas padrões que possuem velocidades e torques determinados, sendo que esses parâmetros devem permanecer aproximadamente constantes, mesmo com variações de outros parâmetros do sistema.

O controle da velocidade de rotação e do torque são realizados, respectivamente, com o uso de um controlador que varia a intensidade de corrente contínua que alimenta a bobina do dinamômetro e através do controle de posição da borboleta do acelerador do motor de combustão interna por um motor de passo.

Na configuração tradicional (anterior ao presente trabalho), os valores de torque e rotação desejados nos ensaios eram obtidos manualmente. Assim, a abertura da borboleta do motor de combustão interna era feita através da variação de posição de uma alavanca que, através de um cabo, estava conectada diretamente à borboleta. A variação da intensidade da corrente elétrica aplicada no dinamômetro era feita através de um potenciômetro, o qual estava ligado à placa condicionadora de sinal que fazia a variação dos níveis de correntes elétricas. Com os ensaios sendo controlados manualmente, o tempo gasto para obter valores desejados de torque e rotação eram em média de 90 segundos dependendo do operador, além dos mesmos serem bastante instáveis e inconstantes.

A motivação para realização desse trabalho parte da necessidade de dispor-se de um sistema de instrumentação e controle automático para obter com maior confiabilidade e rapidez os resultados dos testes realizados com motores de combustão interna no referido laboratório.

### **1.1 O Problema**

Atualmente, para o controle de bancadas de testes de motores de combustão interna existem diversas soluções, com diferentes métodos e dispositivos, que possibilitam obter

resultados satisfatórios. O problema do controle de rotação e do torque aplicado no motor é fazer com que ocorra uma relação intensidade de corrente elétrica/abertura de borboleta adequada para manter dentro de faixas toleráveis os valores a serem seguidos na realização dos testes.

## **1.2 Objetivo Geral**

Busca-se desenvolver um sistema de controle da velocidade de rotação e do torque através do qual seja possível ajustar as curvas para esses parâmetros de forma que eles sigam os valores desejados e mantendo a relação de intensidade de corrente elétrica/abertura de borboleta para a realização dos testes. Com isso se terá mais rapidez e confiabilidade para aquisição dos resultados dos testes realizados. O presente trabalho aborda o desenvolvimento e implementação desta proposta de solução.

## **1.3 Os Objetivos Específicos**

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Estruturar uma bancada experimental com motor de combustão interna e dinamômetro a corrente de Foucault;
- instrumentar o sistema com sensores de rotação no motor e com uma célula de carga na carcaça do dinamômetro;
- instrumentar o sistema com sensores de temperatura;
- desenvolver um sistema de aquisição e medição dos sinais advindos do sensor de rotação e da célula de carga;
- desenvolver um sistema de interface de potência para os atuadores;
- modelar matematicamente o funcionamento do sistema Motor-Dinamômetro;
- desenvolver um algoritmo de controle para torque e rotação;

- implementar experimentalmente o sistema de controle;
- desenvolver uma interface gráfica para usuários;
- testar a solução de controle e a implementação experimental;

#### **1.4 Organização do Trabalho**

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. No primeiro está uma introdução do que se trata o projeto. No Capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do projeto enquanto que no Capítulo 3 é feita uma descrição do sistema físico experimental e do seu funcionamento. No Capítulo 4 são desenvolvidas a modelagem e a identificação experimental dos componentes e parâmetros do sistema e no Capítulo 5 são apresentados os projetos dos controladores para a torque e rotação. No Capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais obtidos nos testes realizados para verificar o desempenho do sistema de controle. Finalmente no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são abordados os principais tópicos relacionados aos equipamentos utilizados no projeto, além dos principais tipos de testes realizados em motores de combustão interna. Posteriormente, também são descritas algumas das técnicas utilizadas para o controle de ensaios de motores de combustão interna e instrumentação para bancada dinamométrica usada nos testes.

### **2.1 Dinamômetro**

O dinamômetro é o equipamento capaz de medir a força, de um motor em suas diversas condições de funcionamento.

#### **2.1.1 Descrição dos Tipos de Dinamômetros**

Os principais tipos de dinamômetros são:

- Dinamômetro de Correntes de Foucault
- Dinamômetro Hidráulico
- Dinamômetro de Corrente Alternada
- Dinamômetro de Corrente Contínua

##### **2.1.1.1 Dinamômetro de Correntes de Foucault**

Segundo Souza, 2005, o funcionamento dos dinamômetros de Foucault está baseado na criação de correntes elétricas que se originam dentro de uma massa metálica condutora inserida dentro de um campo magnético variável. Estas correntes, chamadas de “Correntes de Foucault”, circulam em torno de linhas de fluxo nas massas metálicas onde elas se desenvolvem. O campo magnético oriundo do indutor é geralmente um campo fixo, onde a variação do elemento induzido é obtida pelo movimento mecânico do eixo de movimentação a ser freado.

Como pode ser visto na Fig. 2.1, o disco metálico que pode girar livremente na ausência de corrente de alimentação dos imãs é freado assim que uma corrente começa a circular nestes imãs, criando um campo magnético que atravessa o disco induzido. As correntes de Foucault criadas no disco produzem um campo magnético que se opõe a variação do fluxo que os produziu e tende, portanto, a se opor ao deslocamento.

As forças eletromagnéticas que agem sobre o disco são proporcionais à velocidade de rotação e dirigidas no sentido inverso desta velocidade. Pode-se, desta forma, frear o disco em rotação sem aplicar atrito mecânico sobre ele.

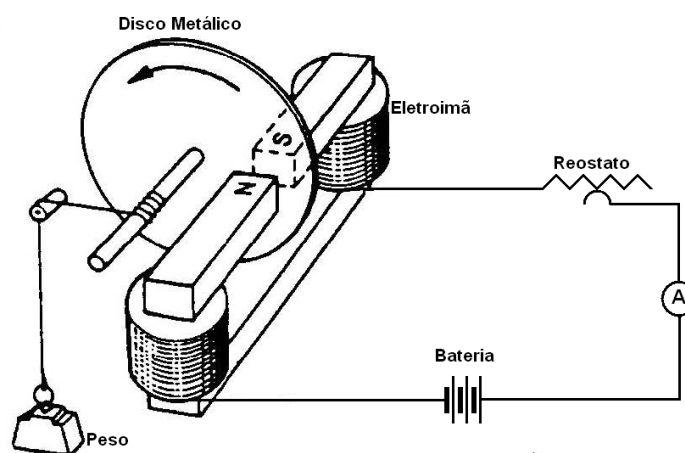


Figura 2.1: O esquema da ilustra princípio de funcionamento do freio eletromagnético.

O alojamento do freio (dinamômetro de correntes de Foucault) é montado em balanço e abriga um rotor, que apresenta “dentes” ao longo de seu perímetro e dois eixos são fixados nas duas extremidades. No interior do alojamento do freio está a bobina de excitação, além das câmaras de refrigeração que são percorridas pela água de refrigeração do freio. As superfícies dos dentes do rotor, em aço especial de grande permeabilidade magnética, são separadas das superfícies correspondentes das câmaras de refrigeração por um anteparo.

Percorrida por uma corrente contínua, a bobina de excitação cria um campo magnético onde as linhas de força se fecham em torno do enrolamento perpendicular à direção desta corrente. Este campo é estacionário na região dos dentes da roda polarizada,



que significa que ele gira ao mesmo tempo em que o rotor e provoca pulsações de fluxos nas paredes das câmaras de refrigeração, seguindo a frequência dos dentes rotativos.

As correntes de Foucault geradas nestas paredes produzem um campo magnético que se opõe à variação do fluxo que as produziu e tende, assim, a se opor ao movimento do rotor.

Os freios eletromagnéticos são atualmente muito empregados, mesmo com o preço do equipamento sendo mais elevado que os freios hidráulicos, em razão das seguintes vantagens:

- Compacto e baixa inércia para potências baixas e médias
- Bom controle e velocidade de resposta, permitindo ciclos transientes
- Boa relação custo/benefício para potências baixas e médias

#### 2.1.1.2 Dinamômetro Hidráulico

Segundo Pereira, 1999, o Dinamômetro Hidráulico é um dispositivo destinado à medição e absorção de energia de uma fonte motora capaz de acioná-lo. Para absorver a energia e realizar troca do calor gerado no processo, é necessário fornecer um fluxo contínuo de água. Este tipo de dinamômetro funciona como uma centrífuga ineficiente, ou seja, cerca de 2% da energia é convertida em pressão hidráulica. Quanto maior o volume de água e velocidade do motor, maior será a pressão hidráulica. Este tipo de dinamômetro geralmente é utilizado para testes de potência em motores automobilísticos.

#### 2.1.1.3 Dinamômetro de Corrente Alternada

O dinamômetro de corrente alternada funciona como um gerador elétrico que, acionado pela máquina em prova, produz energia elétrica que é consumida por uma carga variável, a qual pode ser uma cuba eletrolítica ou um banco de resistores. A medição exige a correção dos instrumentos elétricos para compensar o rendimento do gerador. Tem a vantagem de poder ser utilizado como motor elétrico e acionar a máquina em prova para medição de potência.

#### 2.1.1.4 Dinamômetro de Corrente Contínua

O dinamômetro de corrente contínua possui o mesmo princípio de funcionamento do dinamômetro corrente alternada. Funciona tanto como gerador ou como motor e tem a função de frear ou acionar a máquina, por outro lado, é muito volumoso e tem um custo muito alto, por isso estão sendo substituídos por sistemas de corrente alternada.

### 2.2 Motores de Combustão Interna ou Térmicos

O motor de combustão interna é uma máquina térmica, que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. Nesses motores, o combustível e o fluido ativo, que neste caso trata-se do ar necessário à combustão, se misturam, efetuando a queima dentro do próprio motor. Após a queima, a liberação da energia calorífica eleva a temperatura da mistura, fazendo os gases se expandirem e, assim, realizarem trabalho. Essa mistura (ou fluido de trabalho) passa por mudança na sua composição após a combustão, variando de ar mais combustível para produtos da combustão (gases).

#### 2.2.1 Motores de Ciclo Quatro Tempos

Os motores de combustão interna ou endotérmicos são classificados também em relação aos ciclos de trabalho. Existem os motores com ignição por centelha e os motores com ignição por compressão (motores Diesel). Motores movidos a gasolina ou álcool são exemplos de motores com ignição por centelha. Neste caso, a queima do combustível é iniciada com uma centelha fornecida pela vela de ignição, que é um componente instalado na superfície superior do cilindro, na parte chamada de cabeçote do motor.

Durante seu funcionamento, um motor admite uma quantidade de ar/combustível, que é comprimida, queimada e expandida antes de expulsá-la do cilindro. Assim, o ciclo completo de potência é realizado quando o êmbolo executa quatro movimentos, dois para cima e dois para baixo, chamando-se então de motor de quatro tempos. Os quatro tempos de um motor endotérmico são mostrados esquematicamente na Fig. 2.2.

O motor utilizado neste trabalho se enquadra na classificação de motor de combustão interna ciclo Otto, que são os seguintes:

- **Admissão:** a válvula de admissão se abre e a de escapeamento mantém-se fechada. O êmbolo desce, aspirando a mistura ar/combustível que penetra no cilindro. No fim deste curso a válvula de admissão fecha-se.
- **Compressão:** as válvulas de admissão e escape mantêm-se fechadas. Ao subir, o êmbolo comprime a mistura na câmara de explosão, que resulta na sua vaporização devido ao calor gerado pela compressão.
- **Expansão:** as válvulas de admissão e escape permanecem fechadas. O gás comprimido, ao ser inflamado pela centelha da vela de ignição, expande-se, impelindo o êmbolo para baixo.
- **Exaustão:** a válvula de admissão mantém-se fechada e a válvula de escape permanece aberta. O êmbolo sobe a fim de expulsar os gases restantes da combustão.

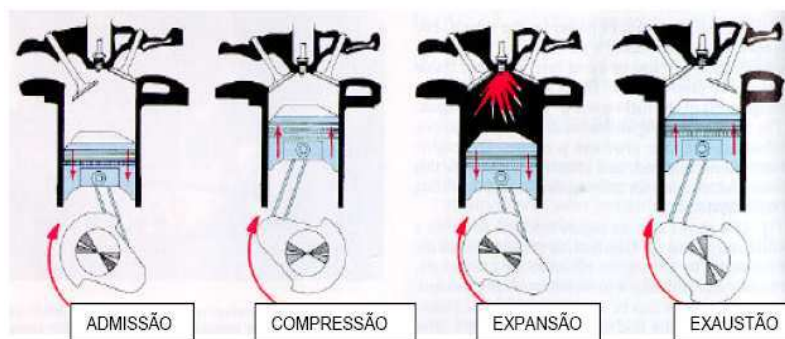


Figura 2.2: Tempos de um motor de combustão interna do Ciclo de Otto.

### 2.3 Tipos de Testes

Os testes que serão descritos a seguir neste capítulo estão em conformidade com as normas NBR ISO 1585 (ABNT, 1996), NBR ISO 14489 e EURO 3, que tem como objetivo especificar brevemente alguns métodos para os testes de bancada em motores de combustão interna.

Segundo Rohenkohl, 2004, alguns dos principais testes de bancada realizados em motores de combustão interna são:

- Teste de Emissões
- Teste de Consumo de Combustíveis de Combustíveis
- Teste de Amaciamento de Motores
- Teste de Desempenho de Lubrificantes

### 2.3.1 Teste de Emissões

Os testes de emissões de poluentes servem para obter dados sobre os gases do escapamento do motor em termos das emissões de CO, CO<sub>2</sub>, HC e NO<sub>x</sub>. São testes importantes sob o ponto de vista mais amplo de eficiência dos motores de combustão interna, que considera também, além do trabalho produzido e do consumo de combustível, os impactos causados ao meio ambiente onde estes recursos são empregados.

Segundo Trielli, 2007, na Tabela 2.1 que segue o Ciclo 13 Pontos de acordo com a norma europeia EURO 3, pode-se visualizar os valores do tempo, rotação e torque que deve se seguir para realizar esse tipo de teste.

Tabela 2.1: Dados para teste de emissões de poluentes

<b>Ponto do Ciclo</b>	<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Torque [%]</b>	<b>Tempo de Estagio [s]</b>	<b>Tempo Acumulado [s]</b>
1	Marcha Lenta	0	360	360
2	Intermediária	10	360	720
3	Intermediária	25	360	1080
4	Intermediária	50	360	1440
5	Intermediária	75	360	1800
6	Intermediária	100	360	2160
7	Intermediária	0	360	2520
8	Nominal	100	360	2880
9	Nominal	75	360	3240
10	Nominal	50	360	3600
11	Nominal	25	360	3960
12	Nominal	10	360	4320
13	Nominal	0	360	4680

### 2.3.2 Teste de Consumo de Combustíveis.

Este teste é realizado para obter o valor do consumo de combustível do motor de combustão interna testado.

Na Tabela 2.2 podem ser visualizados os valores do tempo, posição do acelerador (percentual de abertura da borboleta) que devem ser seguidos segundo a norma NBR ISO 1585 (ABNT, 1996), para realizar esse tipo de teste.

Tabela 2.2: Dados para teste de consumo de combustíveis.

<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Posição Acelerador [%]</b>	<b>Tempo de Estágio [s]</b>	<b>Tempo Acumulado [s]</b>
1000	25	120	120
1000	50	120	240
1000	75	120	360
1000	100	120	480
1000	0	120	600
1200	25	120	720
1200	50	120	840
1200	75	120	960
1200	100	120	1080
1000	0	120	1200
1400	25	120	1320
1400	50	120	1440
1400	75	120	1560
1400	100	120	1680
...	...	...	...
4000	25	120	9120
4000	50	120	9240
4000	75	120	9360
4000	100	120	9480
1000	0	120	9600

### 2.3.3 Teste de Amaciamento de Motores

Este teste é realizado com o objetivo de “amaciar” o motor em bancada, preparando-o para os testes de desempenho de óleos lubrificantes. O ciclo de amaciamento tem duas etapas.

Nas tabelas 2.3 e 2.4 podem ser visualizados os valores do tempo, rotação e torque que se deve seguir segundo a norma NBR ISO 1585 (ABNT, 1996), para realizar esse tipo de teste.

#### Etapa I

Tabela 2.3: Dados da etapa I para teste de amaciamento de motores.

<b>Passo</b>	<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Torque [%]</b>	<b>Tempo de Estágio [s]</b>	<b>Tempo Acumulado [s]</b>
1	2000	25	1800	1800
2	2500	30	1800	3600
3	3000	30	1800	5400
4	3500	30	1800	7200
5	2000	30	1800	9000
6	3000	40	1800	10800

#### Etapa II

Tabela 2.4: Dados da etapa II para teste de amaciamento de motores.

<b>Passo</b>	<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Torque [%]</b>	<b>Tempo de Estágio [s]</b>	<b>Tempo Acumulado [s]</b>
1	3000	40	1800	1800
2	3500	40	1800	3600
3	4000	40	1800	5400
4	2500	50	1800	7200

Continuação da Tabela 2.4: Dados da etapa II para teste de amaciamento de motores.

5	3000	60	1800	9000
6	3500	60	1800	10800
7	4000	60	1800	12600
8	4500	60	1800	14400
9	3000	100	1800	16200
10	3500	100	1800	18000
11	4000	100	1800	19800
12	4500	100	1800	21600

#### 2.3.4 Teste de Desempenho de Lubrificantes

Este teste é realizado para analisar o desempenho de um tipo de lubrificante quanto ao desgaste de peças do motor, durabilidade e consumo do óleo (lubrificante).

Segundo Rohenkohl, 2004, na Tabela 2.5 que segue a seqüência IIIIE GM151S, pode-se visualizar os valores do tempo, rotação e potência que se deve seguir para realizar esse tipo de teste.

Tabela 2.5: Dados para teste de desempenho de Lubrificantes.

<b>Parâmetros</b>	<b>Limites</b>
Tempo total do teste (turnos)	64 horas (8 x 8 horas)
Rotação	3000 RPM
Potência	33,1KW

#### 2.4 Controlador

Segundo Ogata, 2000, um sistema de controle com realimentação (ou de malha fechada) refere-se a uma operação que, na presença de perturbações, tende a diminuir a diferença entre o sinal de saída de um sistema e algum sinal de entrada (referência) e atua sobre o sistema controlado com base nessa diferença.

A estrutura básica de um sistema de controle em malha fechada utilizando controlador pode ser vista na Fig. 2.3:

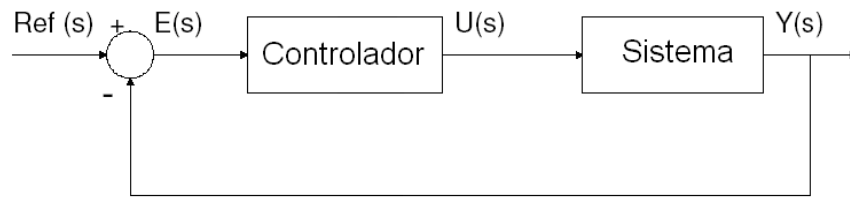


Figura 2.3: Sistema de Controle de Malha Fechada

#### 2.4.1 Ação de Controle Proporcional

Segundo Ogata, 2000, muitas vezes processos mais simples podem ser facilmente controlados apenas por uma ação proporcional, ou seja, aplicando apenas o ganho podemos melhorar a resposta transitória aumentando o tempo de subida, mas o sobre-sinal aumenta e ocorre uma redução do erro em regime (não o eliminando completamente). Além disso, a margem de estabilidade do sistema é reduzida.

#### 2.4.2 Ação de Controle Integral

Segundo Ogata, 2000, a ação de controle integral visa à eliminação do erro em regime permanente. A correção tenderá a aumentar com o passar tempo geralmente atingindo um valor suficiente para poder eliminar por completo tal erro. Com parâmetros escolhidos cuidadosamente pode-se obter um sobre-sinal pequeno ou até mesmo nulo. Contudo a utilização do controlador PI, pode fazer com que o sistema aumente sua margem de estabilidade, e aumente o seu tempo de assentamento. Ganhos integrais indevidos podem levar o sistema à instabilidade.

#### 2.4.3 Ação de Controle Derivativa

Segundo Ogata, 2000, a ação derivativa tem como objetivo melhorar as características da resposta transitória, a margem de estabilidade do sistema e um menor tempo de subida.



#### 2.4.4 Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa, gerando um sinal de controle consiste no controlador proporcional-integral-derivativo, mais conhecido por controlador PID.

O objetivo do controlador PID é o de aproveitar as características de cada ação de controle (proporcional, integral e derivativa) para obter uma melhoria nas respostas do sistema controlado.

### 2.5 O Software MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) é um software interativo voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente amigável, onde problemas e soluções são expressos da forma como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

Além disso, o MATLAB é um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite geralmente a resolução de problemas numéricos mais rapidamente que utilizando programas semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C. Além disso, as soluções dos problemas são expressas quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

#### 2.5.1 O Software Simulink

O Simulink, desenvolvido pela companhia The MathWorks, é uma ferramenta para modelamento, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. O software oferece alta integração com ambiente MATLAB. Simulink é amplamente usado em teoria de controle, processamento digital de sinais e simulação.

## **2.6 O Software Labview**

Segundo Ramalho, 2006, o Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é uma linguagem de programação gráfica originária da empresa National Instruments. Os principais campos de aplicação do Labview são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem facilidades para a aquisição de dados e para a sua manipulação.

O Labview usa ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução de um programa.

A Interface de operador é construída por um conjunto de ferramentas e objetos, sendo designada por “painel frontal”. O programa é construído usando representações gráficas de funções, para controlar os objetos no painel frontal.

O código fica definido em um diagrama de blocos, que pode ser associado a um fluxograma. Os programas de Labview são chamados instrumentos virtuais, ou VIs, pois sua aparência e operação imita instrumentos físicos, tal como osciloscópios e multímetros. Cada VI usa funções que manipulam as entradas da interface e exibe essa informação ou a transforma para outros blocos.

## **2.7 Estado da Arte da Instrumentação e Controle de Bancada Dinamométrica**

Nesta seção são apresentados alguns sistemas que estão sendo desenvolvidos por pesquisadores sobre a instrumentação e controle de bancadas dinamométricas para motores de combustão interna.

Segundo Roos e Montijo, 2005, a bancada existente no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Universidade de Brasília se trata de um dinamômetro para o teste de motores a combustão interna. Este dinamômetro é do tipo hidráulico, ou seja, possui uma válvula borboleta para que, aumentando ou diminuindo o fluxo de água, se produza uma carga no motor e se varie a velocidade. E esta válvula é movimentada através de um servomotor. No sistema proposto por Roos e Montijo, 2005, foi desenvolvido um controlador PID (proporcional, integral e derivativo) implementado em um microcontrolador que realiza o controle do sinal aplicado ao freio dinamométrico para calcular a posição do servo

motor e aumentar ou diminuir o fluxo água e, conseqüentemente, diminuir ou aumentar a velocidade do motor de combustão interna. No esquema de Roos e Montijo, 2005, representado na Fig. 2.4, tem-se como entrada a referência, ou seja, o valor desejado para a velocidade do motor a combustão interna e na saída a velocidade de rotação, a qual é subtraída da velocidade desejada, originando o sinal do desvio.

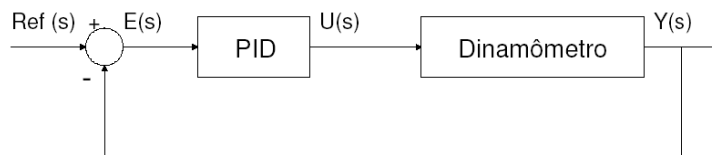


Figura 2.4: Diagrama em Blocos do controlador [Roos e Montijo, 2005].

Cruz e Duarte, 2006, utilizaram o sistema já implementado por Roos e Montijo em 2005, e desenvolveram uma interface gráfica que faz a leitura via porta serial do computador dos dados enviados do microcontrolador, traça suas curvas em tempo real e as salva em arquivo para estudos posteriores. Além disso, podem ser ajustados alguns parâmetros via programa, tais como, a velocidade de referência e os ganhos do controlador. Na Fig. 2.5 pode-se visualizar a interface gráfica implementada por Cruz e Duarte (2006).

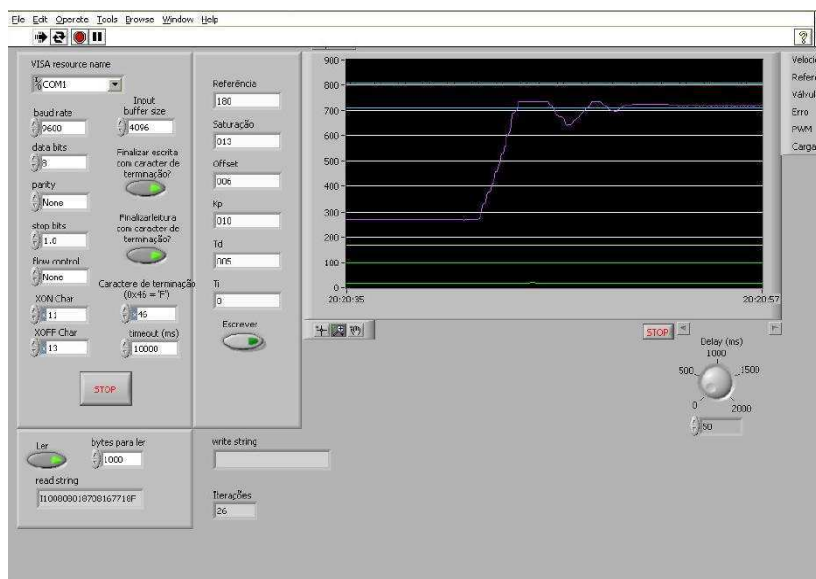


Figura 2.5: Interface gráfica [Cruz e Duarte, 2006].

O sistema proposto por Moulton, 2007, utiliza uma bancada com um dinamômetro de corrente de Foucault para realizar testes em pequenos motores de combustão interna (no caso motores de ciclo 2 tempos). Neste caso, foi implementado um controlador PI (proporcional-integral) para controlar a intensidade de freio do dinamômetro e, conseqüentemente, a rotação do motor. O autor instrumentou o sistema com sensores de temperatura e célula de carga e fez uma interface gráfica para visualização dos sinais dos sensores e aquisição de resultados nos testes em motores. Nas fig. 2.6 pode-se visualizar a interface gráfica do sistema implementado por Moulton, 2007.

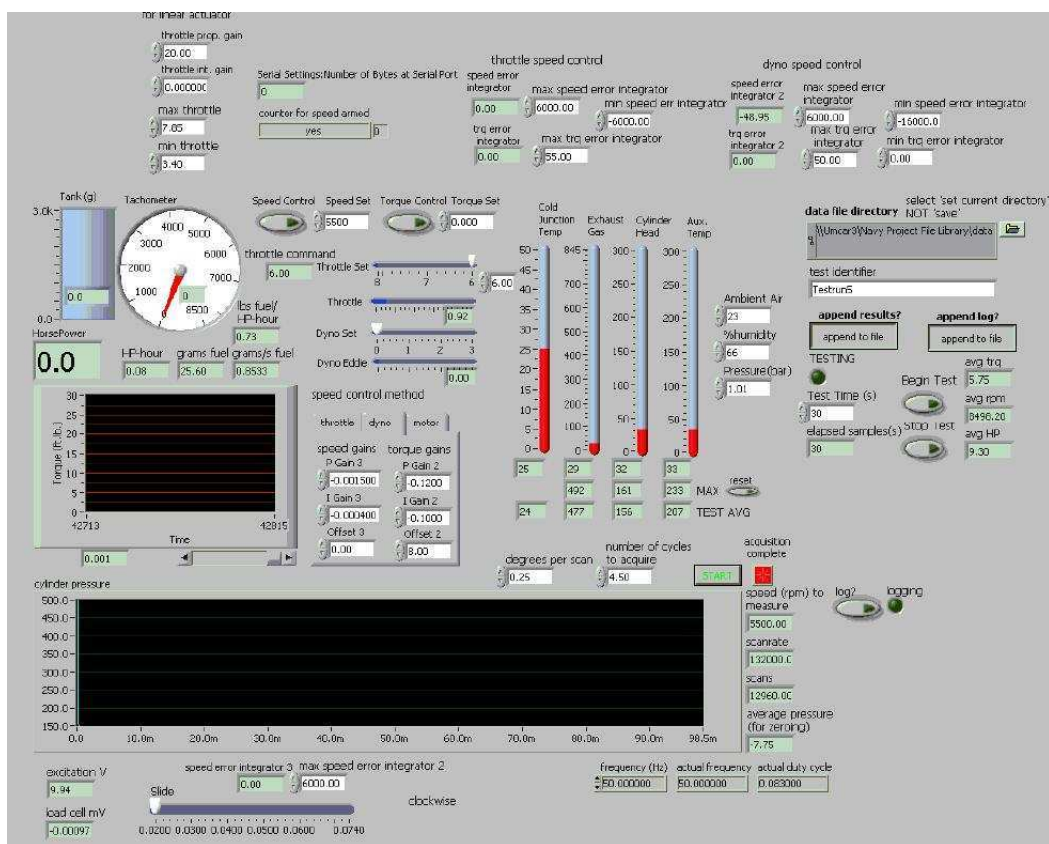


Figura 2.6: Interface gráfica [Moulton, 2007].

### 3. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos relacionados à descrição geral, modelagem e identificação experimental dos parâmetros dos componentes do sistema de controle e instrumentação do bancada de testes de motores instalada no Laboratório de Motores da UFRGS.

#### 3.1 Introdução

A implementação experimental do sistema de instrumentação e controle da bancada de testes de motores foi realizada no Laboratório de Motores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A bancada, com motor e dinamômetro, é mostrada na foto apresentada na Fig. 3.1. Mais adiante, na Fig. 3.2, apresenta-se também o sistema implementado para visualização, gravação de dados e controle.

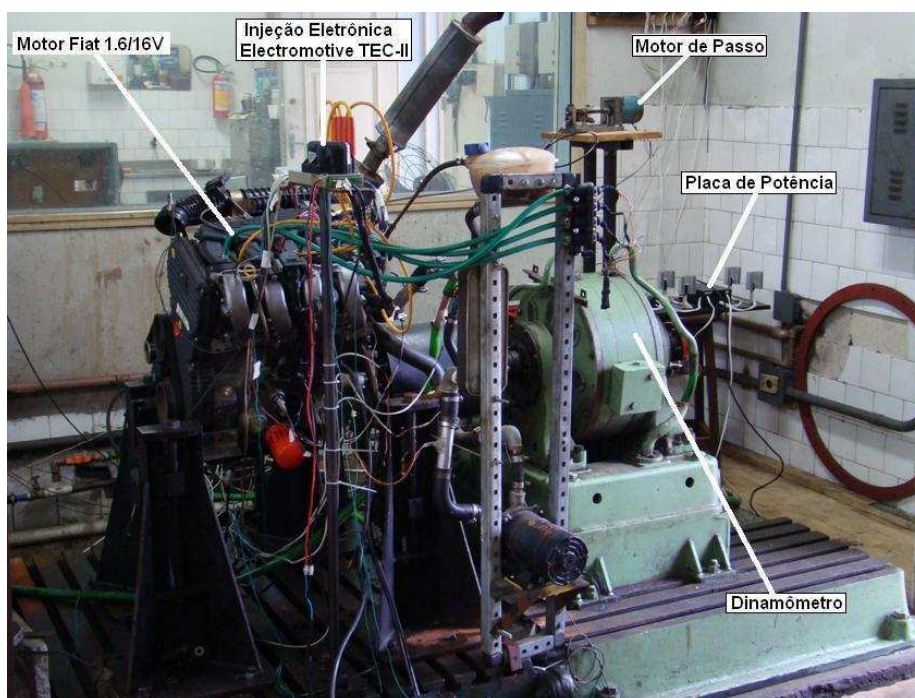


Figura 3.1: Aparato experimental de testes com o sistema de instrumentação e controle do bancada.

Os sinais condicionados dos sensores de rotação e torque são amostrados e convertidos por um conversor analógico digital (A/D) e, depois, recebidos por um microcontrolador. Este microcontrolador processa as informações e, através de um conversor digital analógico (D/A) e placas condicionadoras de sinais, atua sobre motor de passo ligado a borboleta do acelerador do motor de combustão interna. A intensidade de corrente aplicada no dinamômetro também é, da mesma forma, controlada. O microcontrolador está conectado a um microcomputador via porta serial, permitindo visualizar e gravar os dados através de uma interface gráfica programada no Labview.

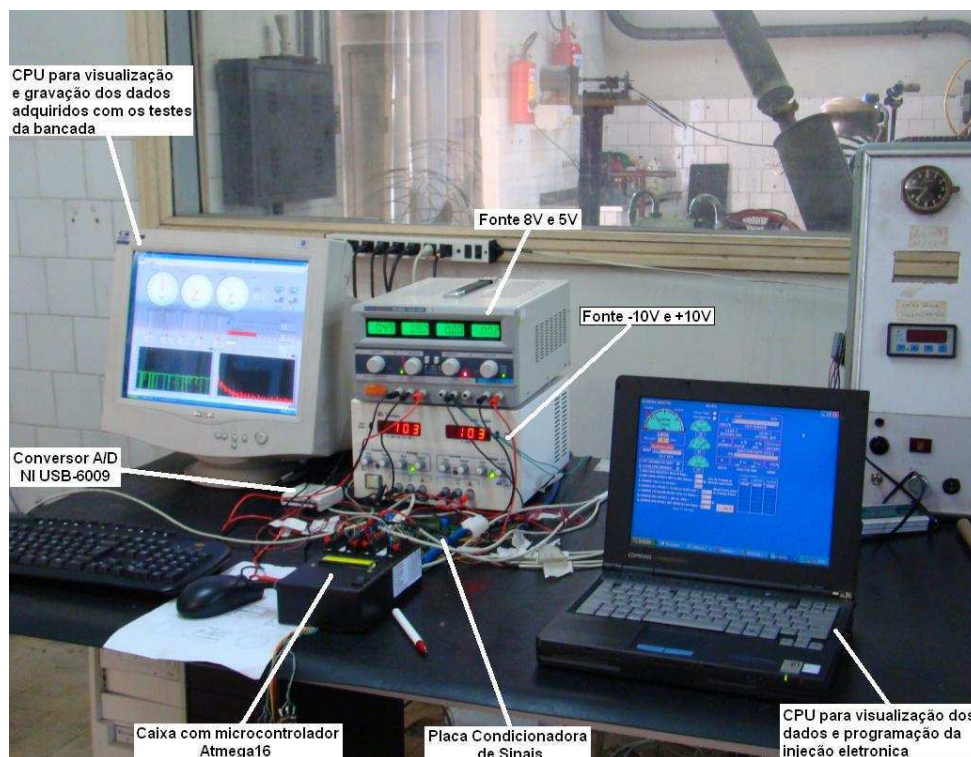


Figura 3.2: Bancada de visualização e gravação de dados e etapa de controle.

### 3.2 Descrição dos Componentes do Sistema

Os principais componentes do sistema estudado para o controle da bancada testes de motores de combustão interna estão representados no diagrama esquemático da Fig. 3.3:



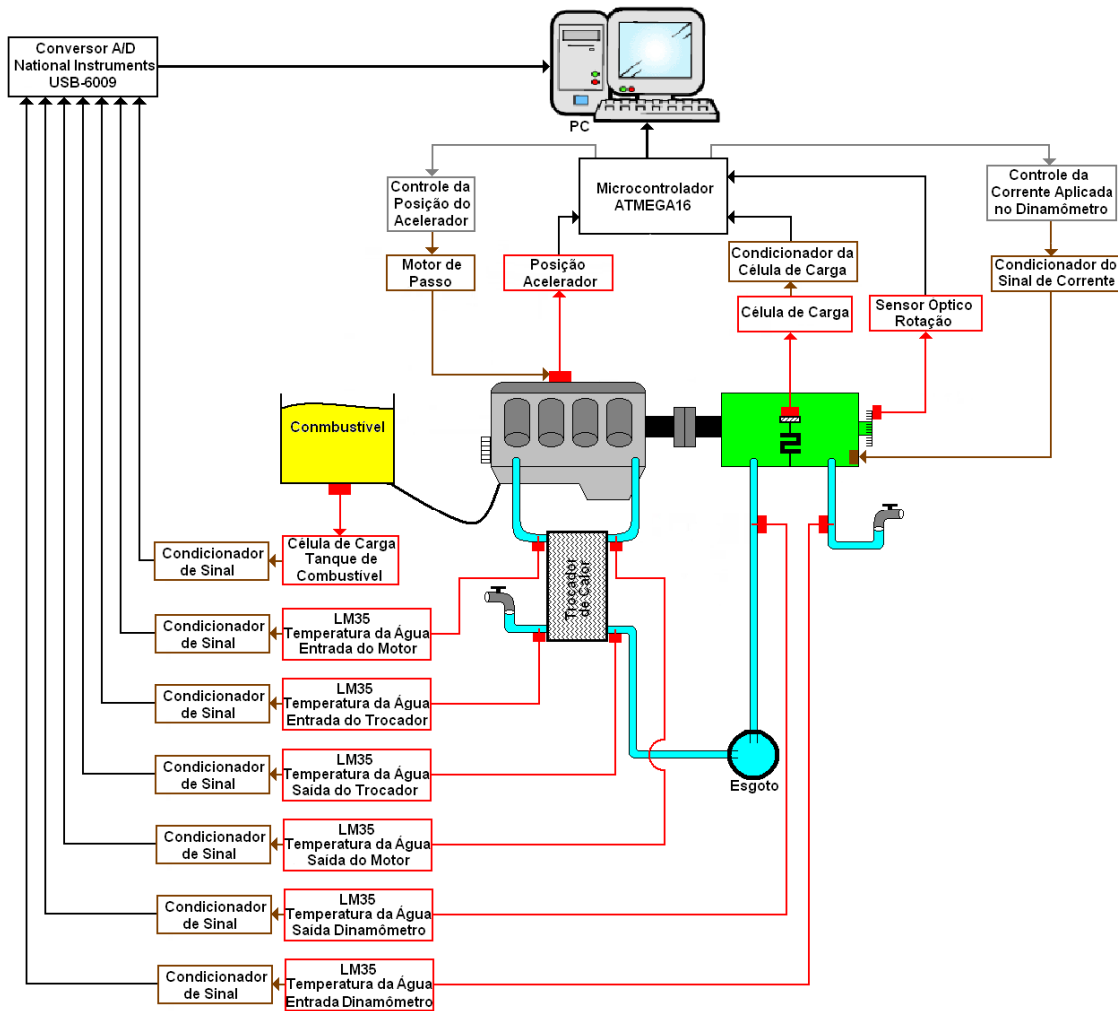


Figura 3.3: Diagrama esquemático das ligações do sistema instrumentação e controle da bancada.

Conforme apresentado nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3, o sistema é constituído pelos seguintes componentes: um motor de combustão interna, um dinamômetro, um motor de passo, seis sensores de temperatura LM35, um sensor óptico de rotação, duas células de carga, um sensor de posição da borboleta (potenciômetro), duas placas condicionadoras de sinais, um microcontrolador ATMEGA16, uma placa conversora de sinal analógico para digital e um microcomputador.

Visando facilitar a sua descrição, o sistema foi dividido em quatro partes: componentes mecânicos, sensores, componentes eletrônicos e interface gráfica. Seguem suas descrições:

### 3.2.1 Componentes Mecânicos

Os componentes mecânicos são: motor de combustão interna, dinamômetro e o motor de passo.

O motor utilizado nos testes, mostrado na Fig. 3.4, foi um FIAT 1.6, 4 cilindros, 16 válvulas, sistema de ignição por centelha e gerenciamento de mistura por injeção de combustível multiponto (Multi Point Fuel Injection – MPFI). Originalmente desenvolvido para gasolina automotiva tipo C, possui relação de compressão de 9,5:1 (Ver ficha técnica, Tabela 3.1). O sistema de ignição é composto pela unidade eletrônica de controle (ECU), duas bobinas de ignição, cabos supressivos de ruído e velas NGK. O sistema de alimentação de combustível é composto por um reservatório com capacidade de 10 litros, bomba de combustível Bosch de vazão nominal de 105 l/h com filtro e regulador de pressão Bosch. O sistema de arrefecimento utiliza água como refrigerante e é composto por um trocador de calor compacto tipo casco e tubo de escoamento cruzado água/água. O sistema de lubrificação do motor é tipo bomba de óleo e cárter úmido sem arrefecedor. O óleo lubrificante usado tem classificação SAE 20W50 API SJ. O sistema de escapamento utilizou ponteira silenciadora e abafador de ruído intermediário, sem dispositivos antipoluição (catalisador).



Figura 3.4: Vista geral do motor Fiat 1.6/16V



Tabela 3.1: Dados técnicos do motor Fiat 1.6/16V

Relação de Compressão	9,5:1
Potência Máxima (kW/RPM)	78/5500(Gasolina C)
Torque Máximo (N.m/RPM)	151,1/4500 (Gasolina C)

O dinamômetro de Foucault ZÖLLNER D-500, mostrado na Fig. 3.5, com potência nominal de frenagem de 200kW é constituído por um estator em balanço e um rotor acionado pelo motor em teste girando imerso em um campo de força magnético de intensidade variável produzido pelas bobinas do estator. A intensidade do campo de força é controlada por um gerador de corrente contínua aplicada na bobina do estator, podendo-se, pela variação desta corrente, modular a carga aplicada sobre o eixo.



Figura 3.5: Dinamômetro de Correntes de Foucault ZÖLLNER D-500

O motor de passo HS50 do fabricante SLO-SYN está mostrado na Fig. 3.6 e tem como máxima tensão de trabalho 5 V, torque de 0,6 N.m e 200 passos por volta. Sua função é a de variar o percentual de abertura da borboleta do acelerador do motor de combustão

interna. O motor de passo é acionado através de uma interface de potência que, por sua vez, está conectada a um canal do microcontrolador.

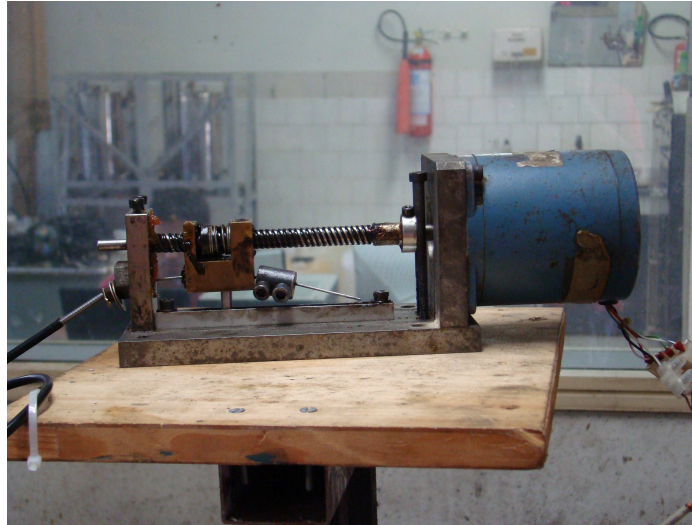


Figura 3.6: Motor de Passo SLO-SYN HS50.

### 3.2.2 Sensores

Foram utilizados os seguintes sensores: seis medidores de temperatura, um sensor óptico de rotação, duas células de carga e um sensor de posição da borboleta (potenciômetro).

O sensor LM35 é um sensor de precisão, fabricado pela National Semiconductor, que apresenta uma saída de tensão linear em relação à temperatura em que ele se encontra no momento da sua alimentação por uma tensão de 4 a 30V, tendo em sua saída um sinal de 10mV para cada grau Celsius de temperatura variado.

O LM35 não necessita de qualquer calibração externa para fornecer valores temperatura com variações de  $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$  a  $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ . Este sensor tem saída com baixa impedância, tensão linear e calibração precisa, fazendo com que o interfaceamento de leitura seja especificamente simples, barateando todo o sistema em função disto. Ele drena apenas  $60\mu\text{A}$  para alimentação, sendo assim, seu autoaquecimento é de aproximadamente  $0,1^{\circ}\text{C}$  ao ar livre. O sensor LM35 é apresentado



O sensor de posição da borboleta do acelerador do fabricante Magneti Marelli é um potenciômetro linear, cuja resistência se altera de acordo com o movimento de um cursor sobre uma pista resistiva.

O cursor está ligado a um eixo solidário ao eixo da borboleta de aceleração. Assim, com o movimento de abertura da borboleta, altera-se a posição do curso sobre a trilha, alterando também a sua resistência. Na Fig. 3.8 pode se visualizar o sensor de posição ligado ao corpo de borboleta.

O sensor de posição de borboleta (também chamado de TPS) possui três terminais, sendo um terra, um sinal de referência (5 V) e um sinal de retorna à unidade de comando (valor variável entre 0 a 5 V).



Figura 3.8: Sensor de posição acoplado ao corpo de borboleta

O sensor óptico H21B1 do fabricante Fairchild é constituído por dois blocos isolados eletricamente, um emissor de luz e outro elemento fotossensível. O sensor está acoplado em um disco, como mostra a Fig. 3.9, e, a cada volta do disco, 6 pulsos de 0 a 5V são emitidos a um canal do microcontrolador. Na Tabela 3.3 estão apresentadas algumas das características técnicas do sensor óptico H21B1.



Tabela 3.3: Dados Técnicos do Sensor Óptico H21B1

<b>Emissor</b>	
Corrente Contínua Direta IF	50mA
Tensão de Polarização Inversa VR	6V
Dissipação de Potência PD	100mW
<b>Sensor</b>	
Tensão entre Coletor e Emissor VCEO	30V
Tensão entre Emissor e Coletor VECO	6V
Corrente do Coletor IC	40mA
Dissipação de Potência PD	150mW

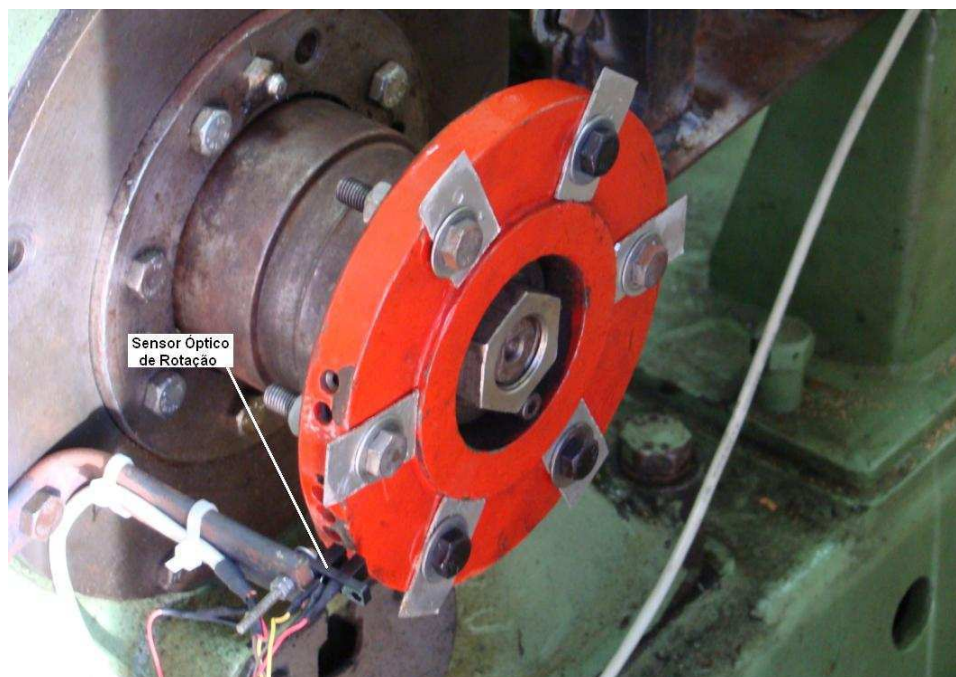


Figura 3.9: Sensor de rotação

A célula de carga tipo Z-250, fabricada pela Alfa Instrumentos, está fixada na carcaça do dinamômetro, onde se pôde verificar o torque aplicado no motor de combustão interna. As figuras 3.10 e 3.11 respectivamente apresentam a célula de carga utilizada no trabalho e um esquema de como é fixada no dinamômetro. Na Tabela 3.4 estão apresentadas algumas das características técnicas da célula do tipo Z-250.

Tabela 3.4: Dados Técnicos da Célula de Carga Z-250

Capacidade Nominal	250kg
Capacidade de Força	2500N
Erro combinado - % saída nominal	<0,03%
Máxima sobrecarga sem alterações % capacidade nominal	150%
Sobrecarga de ruptura % capacidade nominal	300%
Excitação VCC ou VCA	máxima: 15    recomendada : 10

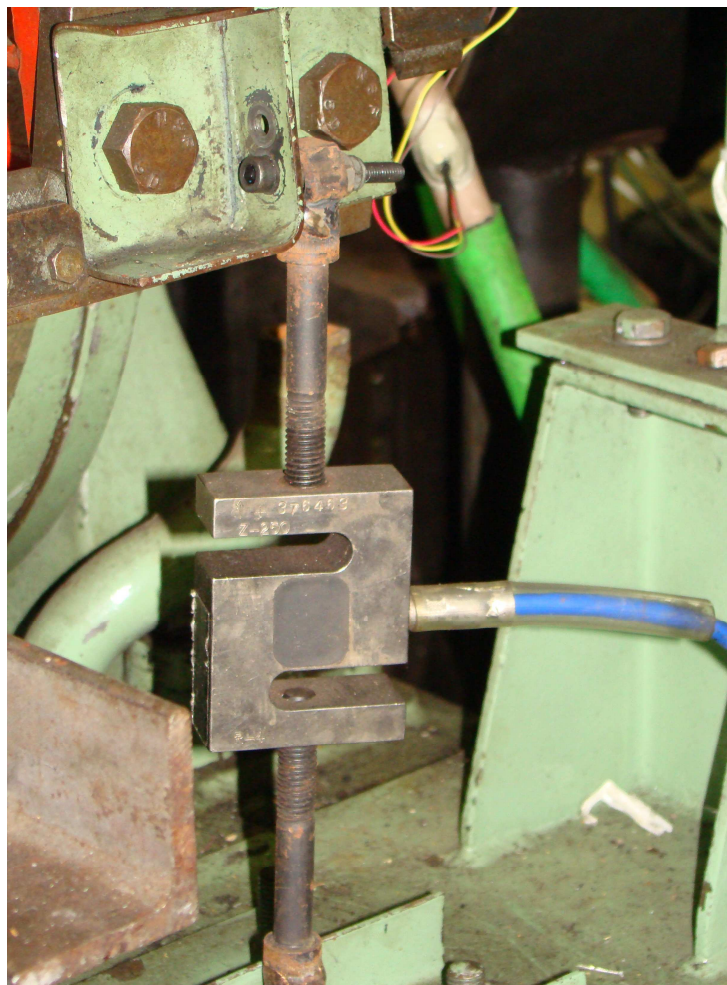


Figura 3.10: Célula de carga Z-250.

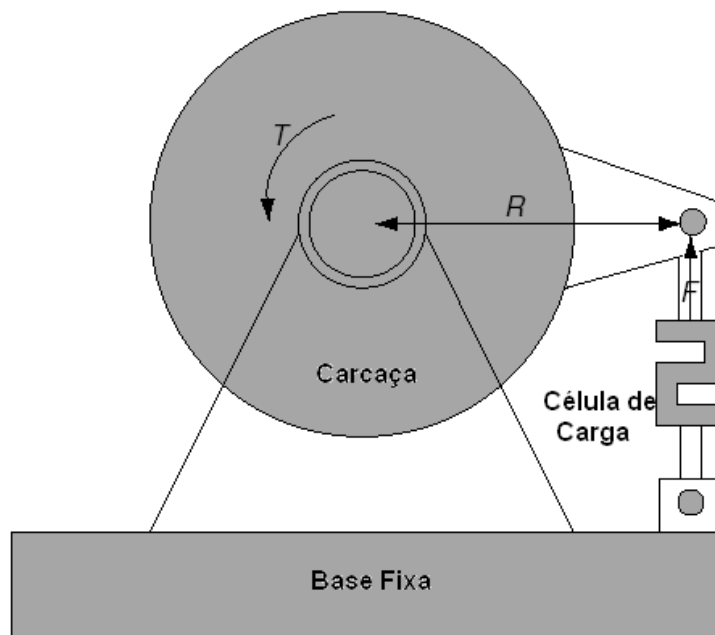


Figura 3.11: Esquema de fixação de célula de carga no dinamômetro.

A célula do tipo Single Point de alumínio, modelo CDL-10, do fabricante Flexar foi calibrada e submetida ao peso do reservatório de combustível, conforme a Fig. 3.12. Ela é utilizada para verificar o consumo de combustível pelo método gravimétrico. Na Tabela 3.5 estão apresentadas algumas das características técnicas da célula de carga CDL-10.

Tabela 3.5: Dados Técnicos da Célula de Carga CDL-10.

Tensão Máxima	15V
Capacidade Nominal	10kg
Capacidade de Força	100N
Sensibilidade	0,03%
Não-linearidade	0,0003
Não-repetibilidade	0,0002
Máxima sobrecarga	1,5
Efeito da temperatura no zero	+/- 0,003
Resistência de isolamento	>5000 Mohms



Figura 3.12: Célula de carga do reservatório de combustível

### 3.2.3 Componentes Eletrônicos

O microcontrolador é do modelo ATMEGA16 do fabricante Atmel Corporation e é baseado na arquitetura RISC (Reduced Instruction Set Computing) de 131 instruções. Na Tabela 3.6 estão apresentadas principais características técnicas do microcontrolador.

Tabela 3.6: Dados técnicos do microcontrolador ATMEGA16.

Memória Flash Programável	16 Kbytes
Ciclos de Gravação	10000 ciclos
Contadores	2 x 8 bits e 1 x 16 bits
Canais PWM	2 x 10 bits e 2 x 8 bits
Entradas Analógicas	8 x 10 bits
Porta de Comunicação Serial	1
Entradas Digitais Programáveis	32
Encapsulamento	40 pinos PDIP
Frequência de Trabalho	0 ~ 16 MHz
Tensão de Operação	4,5 ~ 5,5 V



O display do modelo Tech1602b do fabricante Linpo Technology. Apresenta visor com duas linhas e dezesseis colunas. Tem a função de mostrar ao operador as informações de estado de operação, tempo de realização do processo, rotação e torque desejados e rotação e torque de saída do sistema. Na Tabela 3.7 estão apresentadas algumas características técnicas do display Tech1602b.

Tabela 3.7: Dados técnicos do display Tech1602b

Item	Símbolo	Min	Max	Unidade
Tensão	VDD-VSS	0	7	V
Tensão de Entrada	V <sub>in</sub>	VSS	VDD	
Faixa de Operação de Temperatura	TOP	0	+50	°C
Faixa de Armazenamento da Temperatura	TST	-20	+60	

A interface serial RS-232 é implementada através do circuito integrado MAX-232 do fabricante Texas Instruments. É um duplo transmissor/receptor contendo um gerador de tensão capacitivo para suprir os sinais a partir de um fonte de 5 V. Cada receptor converte os sinais de entrada normalizados TIA/EIA-232-F para os níveis de 5 V. Esses receptores têm como valor de disparo típico 1,3 V e histerese típica de 0,5 V e aceitam como entrada valores de até +30 V. O tempo de amostragem de 1 s, o microcontrolador envia todos os dados envolvidos no sistema da bancada para um microcomputador compatível com IBM-PC, onde os mesmos são armazenados para posterior estudo e pesquisa.

Foi implementada uma interface (vide Fig. 3.13) onde estão localizados o microcontrolador, o display, os terminais de aquisição dos sinais dos sensores e transmissão dos sinais de controle. Uma chave liga/desliga tem como função permitir ou não o início do processo de controle e dois potenciômetros são utilizados para controlar manualmente a abertura de borboleta e o nível percentual de freio do dinamômetro.



Figura 3.13: Interface com o microcontrolador.

A placa condicionadora de sinais (vide Fig. 3.14) foi confeccionada no LAMECC (Laboratório de Mecatrônica e Controle) e tem como função tratar os sinais dos sensores LM35 e das células de carga. É composta pelo amplificador operacional INA126 (vide dados técnicos na Tabela 3.8) do fabricante Texas Instruments e possui 8 canais. O INA126 é um amplificador com uma boa precisão, um baixo nível de ruído e uma ampla faixa de tensão de funcionamento que varia de  $\pm 1,35\text{V}$  a  $\pm 18\text{V}$ . A placa foi projetada para possuir quatro faixas de ganho que são de 5, 10, 100 e 1000 vezes o valor do sinal de entrada. Na Tabela 3.9 está apresentada a faixa de ganho de cada sensor.

Tabela 3.8: Dados técnicos do amplificador INA126

Corrente Quiescente	175mA
Faixa Larga da Fonte	$\pm 1.35\text{V}$ a $\pm 18\text{V}$
Tensão do Offset	250mV máximo
Drift do Offset	3mV/°C máximo
Ruído	35nV/Hz
Baixa Corrente da Polarização da Entrada	25nA máximo

Tabela 3.9: Faixa de ganhos

<b>Sensor</b>	<b>Ganho</b>
LM35 da temperatura da água de entrada do motor. (Arrefecimento)	<b>5</b>
LM35 da temperatura da água de saída do motor.	<b>5</b>
LM35 da temperatura da água de entrada do trocador. (Rede)	<b>10</b>
LM35 da temperatura da água de saída do trocador.	<b>10</b>
LM35 da temperatura da água de entrada do dinamômetro. (Rede)	<b>10</b>
LM35 da temperatura da água de saída do dinamômetro.	<b>10</b>
Célula de carga reservatório de combustível.	<b>100</b>
Célula de carga dinamômetro	<b>1000</b>

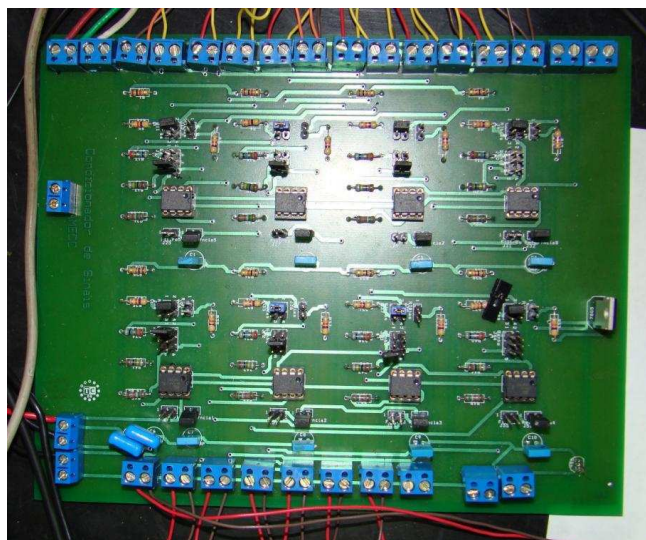


Figura 3.14: A placa condicionadora de sinais

A placa condicionadora de corrente (implementada no âmbito do presente trabalho) mostrada na Fig. 3.15 é utilizada para controlar a intensidade de corrente elétrica aplicada nas bobinas do dinamômetro. A intensidade de corrente elétrica aplicada no dinamômetro é controlada por um canal PWM do microcontrolador. Assim, para modelar o funcionamento

da placa de potência, diferentes valores de largura de pulso foram aplicados à entrada desta, permitindo obter diferentes valores de corrente aplicadas ao dinamômetro.

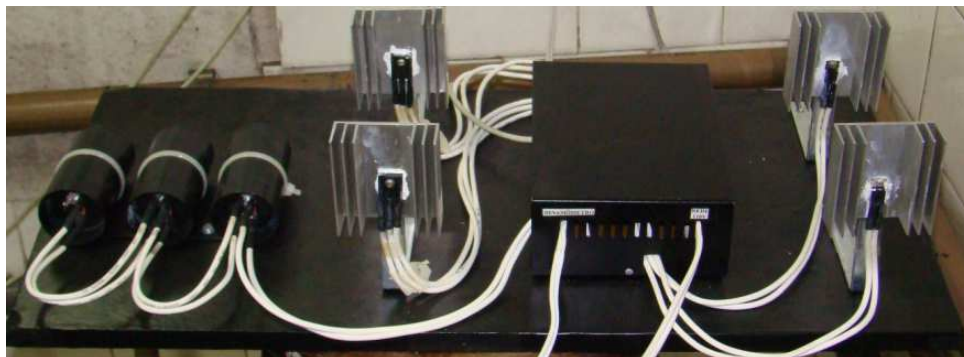


Figura 3.15: Placa de potência

A placa de aquisição de dados NI USB-6009 DAQ do fabricante National Instruments (vide Fig. 3.16) proporciona capacidades multifuncionais com oito canais de 14 bits na entrada analógica, duas saídas analógicas, 12 linhas de E/S digitais e um contador. Ambos usam alimentação através do barramento USB, portanto, não necessitam de uma fonte de alimentação externa para operar. Esta placa é utilizada como conversor de sinal analógico para digital dos sinais dos LM35 e da célula de carga do tanque de gasolina e se comunica diretamente com o microcomputador via porta USB. Na Tabela 3.10 estão apresentadas as principais das características técnicas da placa de aquisição NI USB-6009 DAQ.

Tabela 3.10: Dados técnicos da placa de aquisição NI USB-6009 DAQ

Número Entradas Analógicas	8
Número de Saídas Analógicas	2
Resolução das Entradas (Bits)	14
Taxa de Amostragem (kS/s)	48
Faixa de Valores nas Entradas (V)	$\pm 1$ a $\pm 20$
Resolução de Saída (Bits)	12
Taxa de Saída (Hz)	150
Faixa de Saída (V)	0 a 5
Contador de 32-Bit	1



Figura 3.16: Conversor A/D NI USB-6009

Para acionamento das bobinas do motor de passo, as quais necessitam de uma alta intensidade de corrente contínua, foi utilizada uma interface de potência constituída de quatro transistores mosfet de IRF640 do fabricante Farchild. Na Tabela 3.11 estão apresentadas algumas das características técnicas do transistor IRF640.

Tabela 3.11: Dados técnicos do transistor IRF640

Tensão(drain-source) $V_{DS}$	200V
Tensão(gate-source) $V_{GS}$	$\pm 20V$
Corrente (drain) $I_D$	18A
Corrente Máxima(drain) $I_{DM}$	72A
Potência Total $PTOT$	125W

O gerenciamento da injeção de combustível e da ignição da combustão foi realizado por uma unidade eletrônica de controle (ECU) *Electromotive TEC-II*. Este sistema proporciona ao usuário, um adequado controle sobre as variáveis operacionais do motor. É composta por um sistema de ignição eletrônica e de um sistema de injeção eletrônica de combustível, ambos podendo ser programados pelo usuário em ambiente Windows, de

acordo com a exigência do motor. A ECU é alimentada por sinais de entrada de um conjunto de sensores distribuídos no motor e gerencia os atuadores, ou seja, a bomba de combustível, as bobinas de ignição, o atuador de marcha lenta e os atomizadores de combustível. Na Fig. 3.17 está representado o diagrama esquemático desta ECU. A unidade eletrônica de controle *Electromotive TECII* permite também sua utilização como *data-logger*.

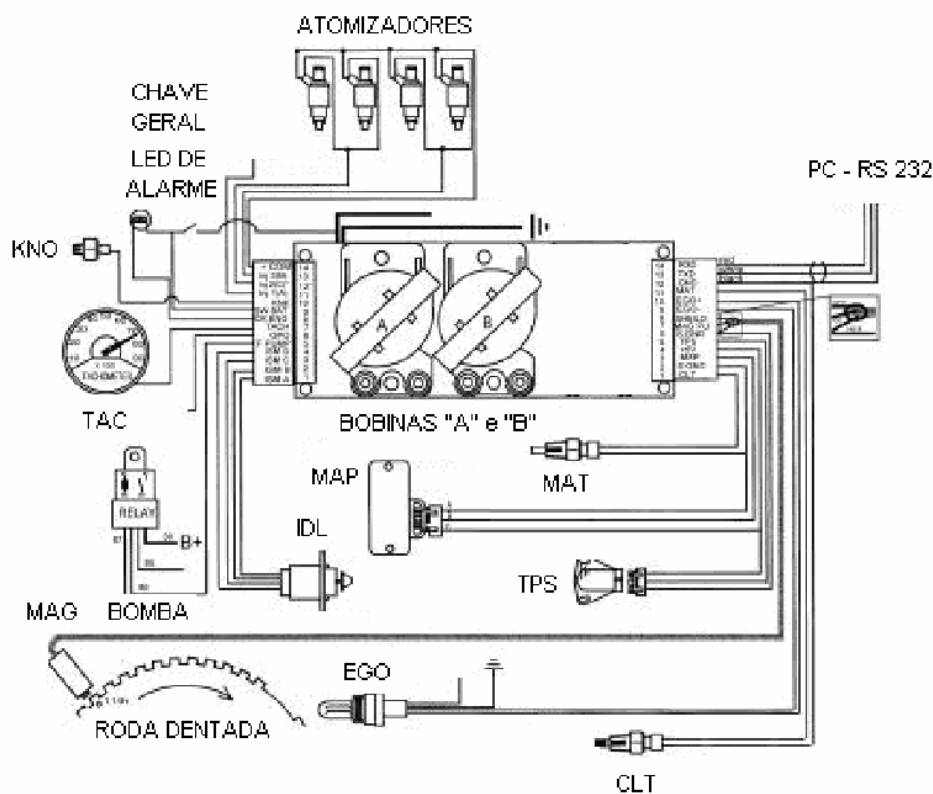


Figura 3.17: Diagrama esquemático da unidade eletrônica de controle Electromotive TEC – II. Adaptado de Electromotive (1998).

Dois fontes chaveadas distintas são utilizadas no experimento. A primeira fonte é do tipo chaveada variável, modelo PS-6000 do fabricante ICEL. Esta fonte fornece tensões de 8 V e 5 V. Esta fonte é utilizada para alimentar a placa do microcontrolador e o motor de passo. Na Tabela 3.12 estão apresentadas as principais características técnicas da fonte de alimentação PS-6000.

Tabela 3.12: Dados técnicos técnicas do da fonte PS-6000

<b>Características Técnicas</b>	
Alimentação	115/230V (50/60Hz)
Dimensões e peso:	340X160X260mm, 25Kg
Temperatura e umidade de operação	de 0° a 40°C, menos que 80%
Temperatura e umidade de armazenamento	de -10° a 70°C, menos que 70%

A segunda fonte é do tipo chaveada variável, modelo MPC-303DI do fabricante Minipa. Esta fonte fornece tensões -10 V e +10 V e é utilizada para alimentar as células de carga e a placa condicionadora de sinais. Na Tabela 3.13 estão apresentadas principais características técnicas da fonte de alimentação MPC-303DI.

Tabela 3.13: Dados técnicos técnicas do da fonte MPC-303DI

<b>Características Técnicas:</b>	
Display	Duplo, 3 1/2 dígitos
Saídas Variáveis	0 ~ 30V DC / 0 ~ 3A DC (2 Fontes Indep)
Saída Fixa	Comutaçãodas fontes para 5V / 3A.
Precisão	± (0.5% da Leitura + 2 Dígitos).
Fundo de Escala do Voltímetro	199.9V.
Fundo de Escala do Amperímetro	19.99A.
Ambiente de Operação	0 ~ 40°C, RH < 80%.
Alimentação	110 / 220V, 50 / 60Hz
Consumo	400W Máximo.
Dimensões	160(A) x 267(L) x 310(P)mm.
Peso	9.5kg.

### 3.2.4 Interface Gráfica

Foi desenvolvida em Labview uma interface de fácil utilização e modificação (vide Fig. 3.19). Ela faz a leitura via serial dos dados do microcontrolador e traça suas curvas, salvando-as em arquivo. Também permite visualizar os sinais das temperaturas (da entrada e saída da água de resfriamento do motor, a entrada e saída da água de resfriamento do

dinamômetro e a entrada e saída da água de resfriamento do trocador de calor) e do nível de combustível do reservatório, ambos transmitidos através do conversor A/D NI USB-6009.

A interface permite salvar em arquivo os resultados dos valores de rotação, torque, nível percentual de freio, abertura da borboleta, potência fornecida pelo motor e o nível de combustível do reservatório durante a realização de um teste.

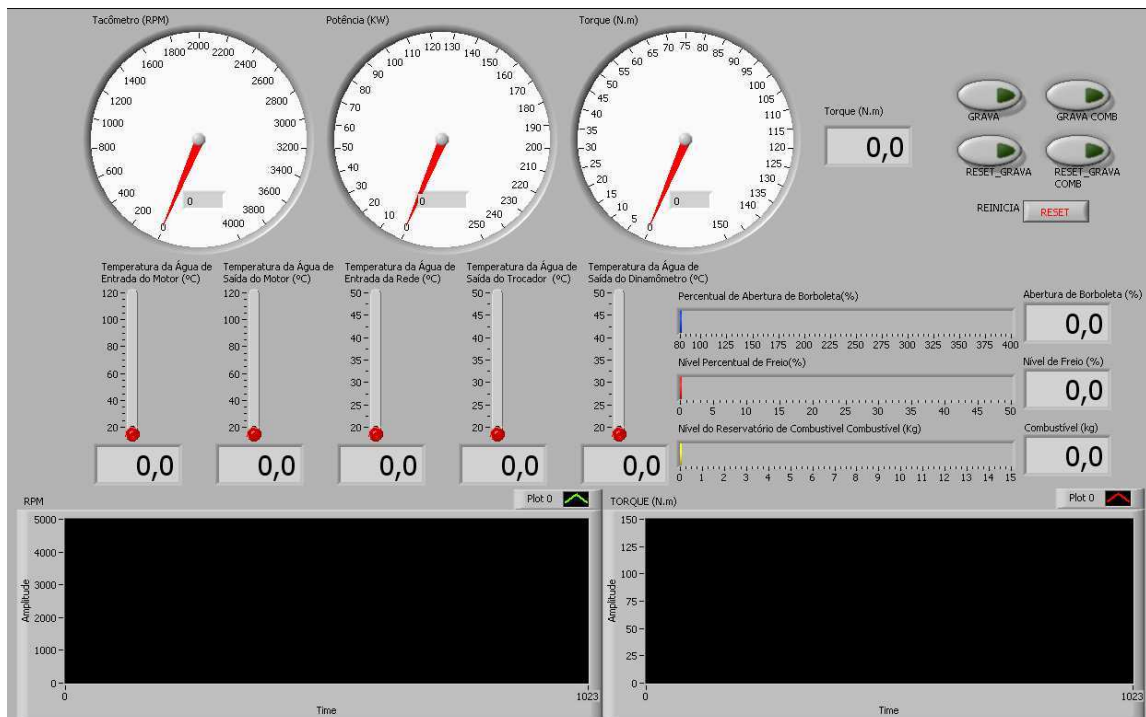


Figura 3.19: Interface gráfica implementada através do Labview



## 4. IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS E MODELAGEM

Neste capítulo são apresentadas a modelagem e a identificação experimental dos parâmetros envolvidos no funcionamento do bancada. Este capítulo se divide em duas partes: identificação das características da célula de carga do dinamômetro e modelagem dinâmica do sistema.

### 4.1 Identificação das Características do Dinamômetro.

O dinamômetro é comandado pela interface de potência, que, por sua vez, é acionada por um canal PWM do microcontrolador. O freio é, portanto, comandado por pulsos de larguras diferentes sob um mesmo período, como mostrado na Fig. 4.1. Note que  $t_1$  e  $t_2$  são exemplos de duas larguras de pulso distintas.

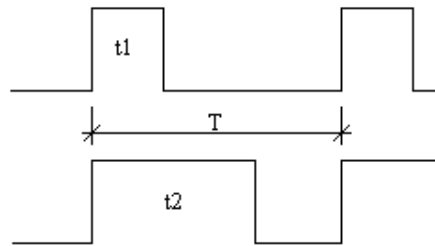


Figura 4.1: Exemplo de diferentes larguras de pulso de um PWM de período  $T$ .

O canal PWM do microcontrolador que aciona a placa de potência que está ligada ao dinamômetro está configurada para obter 1024 diferentes larguras de pulsos. Alterando-se esta largura pode-se alterar o *duty cycle*, que é a razão do tempo em que o sinal permanece em nível lógico alto com relação ao período.

Para identificar o funcionamento do freio, diferentes valores de largura de pulso foram aplicados à entrada da placa de potência ligada ao freio, permitindo obter na sua saída diferentes níveis de corrente DC aplicadas no dinamômetro, como mostrado na Tabela 4.1. Através deste procedimento foi possível determinar a relação entre a largura do pulso e o nível de corrente elétrica.

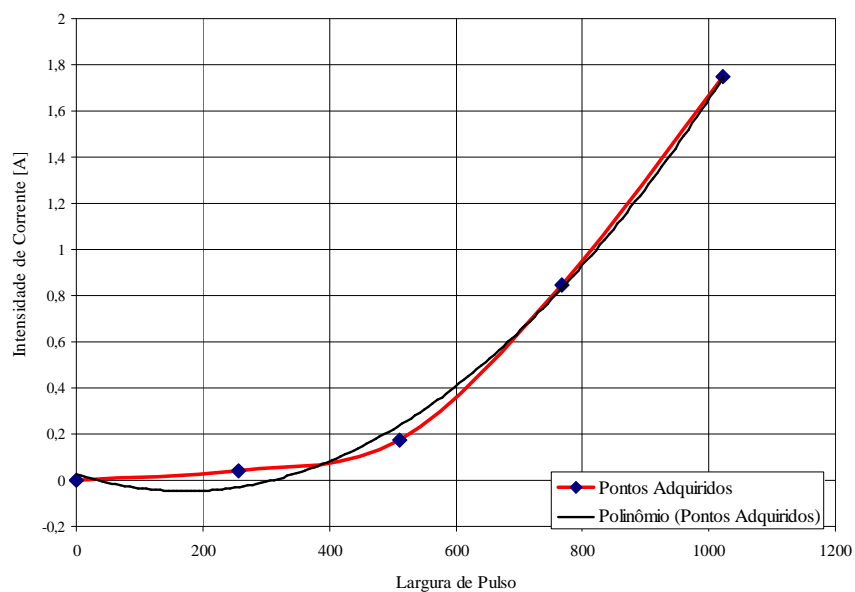
Tabela 4.1: Valores de largura de pulso de acordo com a corrente aplicada ao dinamômetro.

Largura de Pulso [s]	Intensidade de Corrente [A]
0	0
256	0,04348
512	0,17391
768	0,84783
1023	1,75

Com base nos valores mostrados na Tabela 4.1, foi traçado um gráfico que está apresentado na Fig. 4.2. A partir deste gráfico foi obtida a função:

$$y = 2 \cdot 10^{-6} x^2 - 0,0008x + 0,0255 \quad (4.1)$$

onde,  $y$  é intensidade de corrente elétrica [A] e  $x$  é a largura de pulso[s].

Figura 4.2: Corrente elétrica *versus* largura de pulso do sinal de acionamento do freio.

Foi feita a relação entre o nível percentual de freio com a largura de pulso. Essa relação pode ser visualizada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Relação Nível Percentual de Freio e Largura de Pulso

Nível Percentual de Freio [%]	Largura de Pulso [s]
0	0
25	256
50	512
75	768
100	1023

Com base nos dados mostrados na Tabela 4.2 foi traçado o gráfico apresentado na Fig. 4.3. A partir deste gráfico foi obtida a função:

$$y = 10,232x + 0,2 \quad (4.2)$$

onde,  $y$  é largura de pulso [s] e  $x$  é o nível percentual de freio.

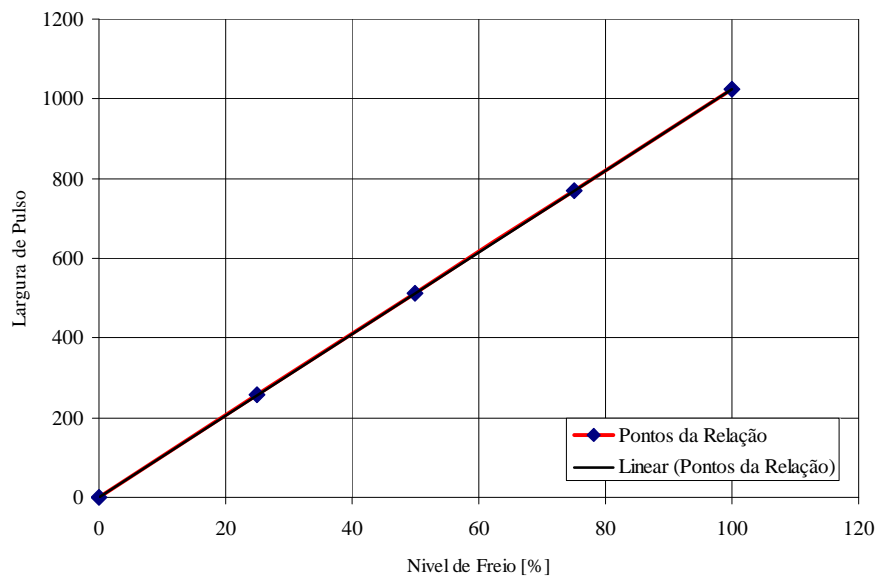


Figura 4.3: Largura de pulso *versus* nível percentual de freio

## 4.2 Identificação das Características da Célula de Carga do Dinamômetro

Para calibração da célula de carga foram conectadas massas de diferentes pesos na extremidade de uma barra de 0,48m de comprimento fixada ao dinamômetro. Esta barra tem o mesmo o comprimento do braço de alavanca que prende a célula de carga ao dinamômetro. A célula de carga tem seu sinal de tensão variado juntamente com a alteração dos pesos colocados na extremidade da barra. Na Tabela 4.3 pode-se visualizar os valores de tensão obtidos para a calibração da célula carga.

Com força e distância conhecidas pode-se calcular o torque a partir da Equação 4.3.

$$T = F \times d \quad (4.3)$$

onde  $T$  é o torque [N.m],  $F$  é a força [N] e  $d$  comprimento do braço de alavanca [m].

Tabela 4.3: Calibração da Célula Carga.

Massa [Kg]	Tensão [V]
0	0
1	0,23
2	0,41
3	0,585
4	0,736
10	1,915
11	2,07
12	2,25
13	2,46
14	2,69

Com base nos dados obtidos na Tabela 4.3 foi traçado o gráfico que está apresentado na Fig. 4.4. A partir deste gráfico foi obtida a função:

$$y = 0,1885x + 0,0153 \quad (4.4)$$

onde,  $y$  é a tensão [V] e  $x$  é a massa [kg].

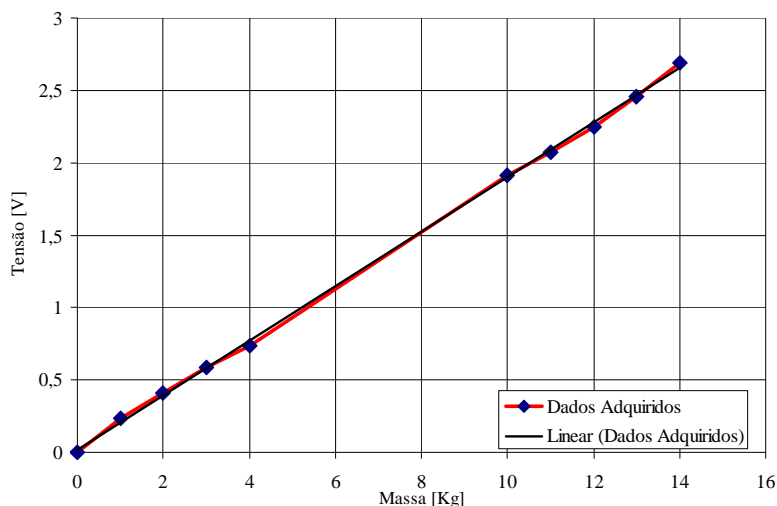


Figura 4.4: Gráfico da tensão na célula de carga *versus* massa.

### 4.3 Características do Motor de Passo

O motor de passo move-se em incrementos angulares (conhecidos como passos) em resposta a pulsos digitais aplicados a um driver a partir de um controlador digital, no caso, o microcontrolador. O número de pulsos e a cadência com que estes pulsos são aplicados controlam a posição e a velocidade do motor, respectivamente.

O motor de passo utilizado no presente trabalho tem como uma das características a execução 200 passos por volta com o sinal de atuação de *passo-completo*. O microcontrolador foi programado para enviar ao motor de passo sinais de atuação de *meio-passo*, que resulta no dobro do número de passos por volta (400 passos por volta) e um torque 1,5 vezes maior. Este torque foi necessário para vencer a mola da borboleta do acelerador (por isso adotou-se a atuação de *meio-passo*).

### 4.4 Identificação e Modelagem Dinâmica do Sistema

Para a modelagem dinâmica do sistema Motor-Dinamômetro foram realizados dois ensaios como o objetivo de obter uma aproximação dos parâmetros necessários para a sintonia do controlador PID.

A borboleta do acelerador foi fixada em uma posição adequada para manter o motor com uma rotação fixa e o dinamômetro com o nível percentual de freio próximo a zero. Em seguida, foi bruscamente aplicada uma ação de frenagem (nível percentual de freio) ao sistema, no intuito de reproduzir a aplicação de um sinal degrau. Para capturar as características dinâmicas, foram realizados dois ensaios para a identificação da resposta do sistema ao sinal degrau.

No primeiro ensaio foi fixada uma rotação de 3000 RPM (314,15928 rad/s) para o motor e aplicado 65% de nível percentual de freio no dinamômetro. No segundo ensaio foi fixada uma rotação de 3000 RPM (314,15928 rad/s) no motor e aplicado 60% de nível percentual de freio no dinamômetro.

Para cada um dos dois ensaios foram levantados os dados experimentais das curvas de resposta da rotação do motor no tempo. Na Fig. 4.5 pode-se observar as duas curvas dos ensaios.

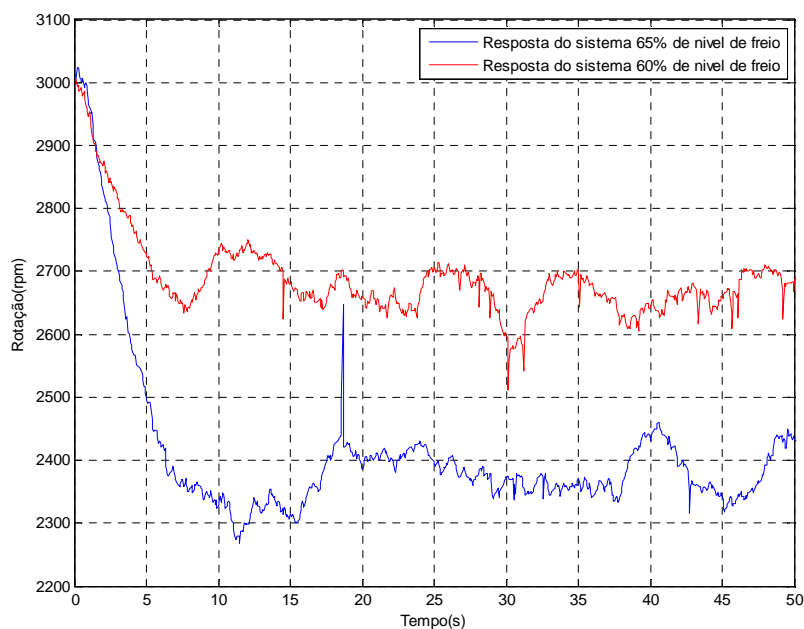


Figura 4.5: Respostas experimentais da rotação ao longo do tempo do sistema em malha aberta ao sinal degrau.

Uma função de transferência de primeira ordem foi aproximada através da média das respostas dos dois ensaios. Na Fig. 4.6 pode-se observar as respostas medidas nos ensaios do sistema Motor-Dinamômetro, a média das duas respostas e a resposta do modelo teórico da média dos dois ensaios com a aproximação da função de transferência de primeiro grau da rotação devidamente ajustada, expressa por:

$$T(s) = \frac{40}{5s + 1} \quad (4.5)$$

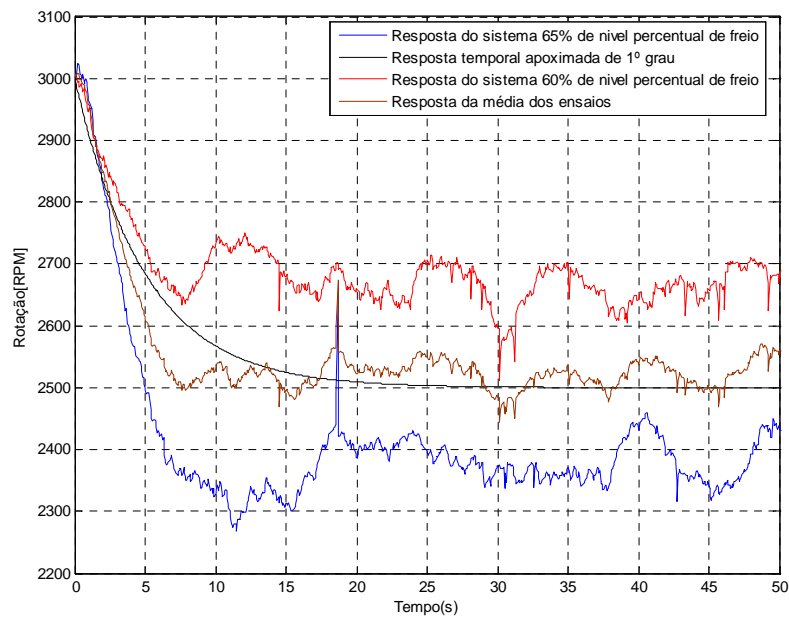


Figura 4.6: Curvas de rotação obtidas através de experimentos e simulação.

A função de transferência obtida para o sistema foi aplicada na programação de um modelo teórico visando à simulação do comportamento do sistema no auxílio ao desenvolvimento de um controlador, e será apresentado no Capítulo 5.

## **5. PROJETO DE CONTROLADORES PARA ROTAÇÃO E POTÊNCIA**

Este capítulo trata dos controladores em malha fechada proporcional e PID (proporcional integral e derivativo) desenvolvidos e aplicados ao sistema e também aborda o problema da sintonia dos ganhos dos controladores implementados e de sua validação.

### **5.1 As Ações dos Controladores Adotados**

Para a realização efetiva dos ensaios é necessário se obter os valores de torque disponibilizado pelo motor de combustão interna a determinadas rotações. Isto é feito através da medição do torque aplicado pelo motor ao dinamômetro que mantém a rotação aproximadamente constante. Usualmente, o funcionamento do sistema de testes baseia-se em modular o torque fornecido pelo motor através do controle da abertura da borboleta do acelerador e o controle da velocidade de rotação através da modulação da intensidade de corrente elétrica aplicada na bobina do dinamômetro. Assim, é possível obter, diversas rotações para uma mesma abertura de borboleta.

A seguir na seção 5.2 será descrito o controlador para o torque através da abertura da borboleta do acelerador e o ajuste do ganho do controlador proporcional. E na seção 5.3 será descrito o controle da rotação através freio do eletromecânico do dinamômetro e o ajuste dos ganhos do controlador PID.

### **5.2 Controlador do Torque**

Para cada velocidade seguida no teste, controla-se imediatamente o torque disponibilizado através do valor lido pela célula de carga do dinamômetro. Enquanto o dinamômetro está seguindo um valor de rotação, abre-se ou fecha-se a borboleta do motor para seguir o valor de torque necessário para cada velocidade de rotação a ser disponibilizada nos ensaios.

#### **5.2.1 Controlador Proporcional para o Torque**

No diagrama de blocos apresentado na Fig. 5.1 tem-se como entrada a referência, ou seja, o valor desejado para o torque que será aplicado ao motor de combustão interna e na



saída o valor de torque atual, que é subtraído do torque desejado, originando o sinal do desvio. Este sinal, então, serve como base para que o controlador proporcional tome a decisão de qual será o sinal de controle que será aplicado ao motor de passo para atuar na borboleta do acelerador, determinando se o motor de passo deve abrir ou fechar a borboleta do acelerador e, conseqüentemente, aumentar ou diminuir o torque (e, conseqüentemente, a potência) aplicado até obter o valor desejado.

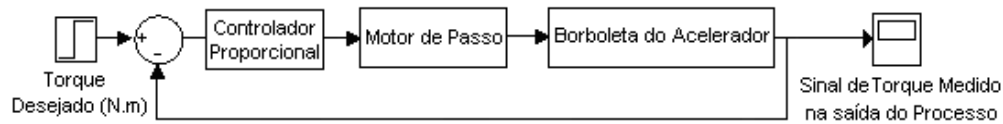


Figura 5.1: Diagrama em blocos para o controle do torque.

No diagrama esquemático da Fig. 5.2 é apresentado o laço de controle em malha fechada para o torque. No microcontrolador se tem o sinal de referência e o controlador proporcional, o qual também faz a leitura do sinal de torque aplicado através da célula de carga e envia o sinal para o motor de passo abrir ou fechar a borboleta do acelerador do motor.

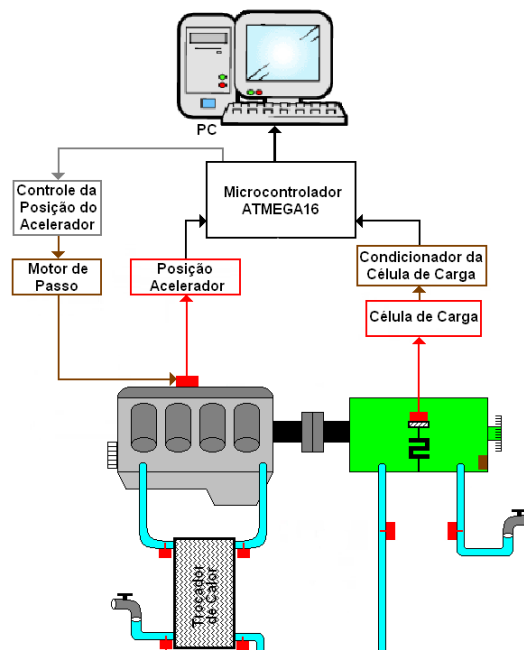


Figura 5.2: Diagrama esquemático do laço de controle do torque.

### 5.2.2 Ajuste do Ganho do Controlador Proporcional

Para o controlador proporcional foi utilizado primeiramente um ganho unitário, e como o sistema se comportou satisfatoriamente, não houve a necessidade de alterá-lo.

## 5.3 Controlador da Rotação

Para cada torque seguido no ensaio, controla-se imediatamente a velocidade de rotação do sistema disponibilizada através do sensor óptico de rotação. Enquanto a borboleta do motor de combustão interna esta seguindo um valor de torque, se aumenta ou diminui a intensidade de corrente elétrica aplicada na bobina do dinamômetro para seguir o valor de velocidade de rotação necessário para cada torque a ser disponibilizada nos ensaios.

### 5.3.1 Controlador PID para Rotação

No diagrama de blocos apresentado na Fig. 5.3 tem-se como entrada a referência, ou seja, o valor desejado para a rotação do motor de combustão interna e na saída a rotação atual, que é subtraída da rotação desejada originando o sinal de desvio. Este sinal, então, serve como base para que o controlador PID calcule qual será o sinal de controle a ser aplicado ao freio dinamométrico, ou seja, qual será o nível de corrente elétrica aplicado nas bobinas do dinamômetro para, conseqüentemente, diminuir ou permitir o aumento da rotação do motor de combustão interna, respectivamente até obter um valor próximo ao desejado.

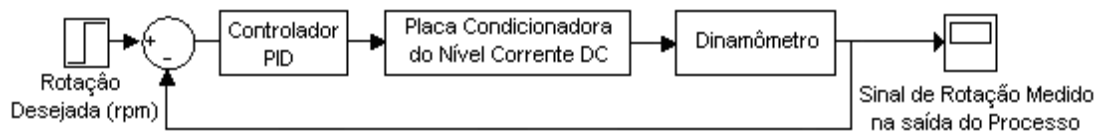


Figura 5.3: Diagrama em blocos para o controle de rotação

No diagrama esquemático da Fig. 5.4 é apresentado o laço de controle em malha fechada para o sinal de rotação. No microcontrolador se tem o sinal de referência e o controlador PID, onde também é realizada leitura do sinal de rotação do sistema através do sensor óptico e é enviado o sinal de nível percentual de freio para a placa de potência, que condiciona a corrente elétrica aplicada nas bobinas do dinamômetro.

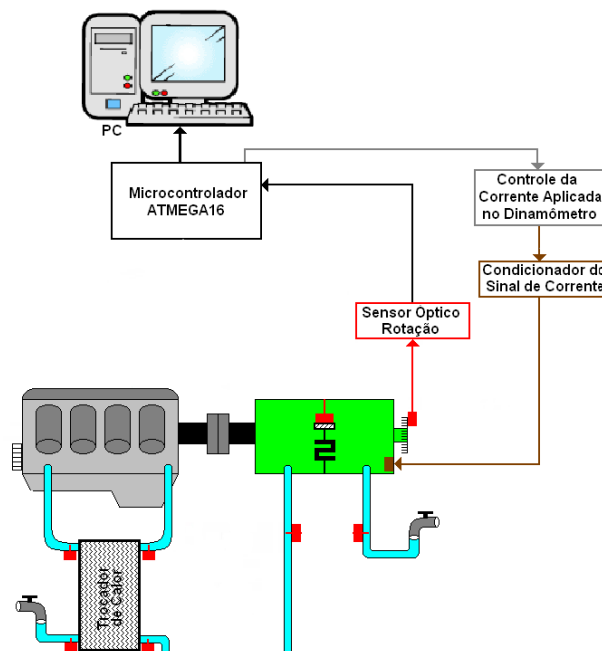


Figura 5.4: Diagrama esquemático do laço de controle da rotação.

### 5.3.2 Ajuste dos Ganhos do Controlador PID

Para ajustar adequadamente os ganhos das ações proporcional, integral e derivativa do controlador foi utilizada uma ferramenta computacional denominada de Simulink Response Optimization (Otimização de Respostas do Simulink) do software Matlab. Esta ferramenta proporciona ao usuário a possibilidade de operar com uma interface gráfica que, através de limites e restrições devidamente inseridos, ajusta automaticamente os ganhos dos controladores, de acordo com o desempenho necessário do sistema a partir de sua resposta no tempo. Assim, os valores limites (também chamados de limites de saturação) são

aplicados para que determinadas variáveis de controle não excedam os valores físicos reais ou para que não superem determinados valores operacionais do sistema de controle.

Os ganhos encontrados com a ferramenta de otimização para o sistema de controle de rotação através de simulações utilizando o modelo desenvolvido que pode ser visualizado na Fig. 5.5 foram:  $K_p$  (ganho proporcional) = 80,  $K_i$  (ganho integral) = 0,5 e  $K_d$  (ganho derivativo) = 140.

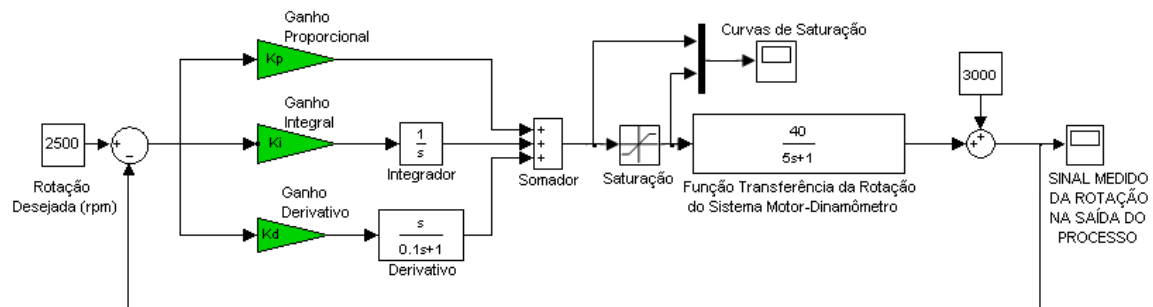


Figura 5.5: Diagrama de blocos do controlador de rotação do sistema.

No esquema adotado, o desvio é calculado a partir da diferença entre a rotação desejada e o sinal medido de rotação na saída do sistema. Este desvio é multiplicado pelos ganhos proporcional, integral e derivativo e a soma destas três ações resultantes corresponde à ação de controle proporcional-integral-derivativa. O valor desta ação pode, em determinados momentos, superar os valores máximos e mínimos da faixa operacional do sistema. Para evitar este problema, os limites de saturação determinam que os valores da ação de controle sejam mantidos sempre entre 0 e 100 de nível percentual de freio. Neste caso, os valores correspondem ao mínimo e ao máximo de nível de corrente elétrica que pode ser aplicada às bobinas do dinamômetro (vide exemplo da Fig. 5.6). Proporcionalmente ao nível de corrente elétrica aplicada ao dinamômetro ocorre a ação de frenagem, que altera a rotação da saída medida que é realimentada para um novo cálculo do desvio, utilizado no controle realimentado.

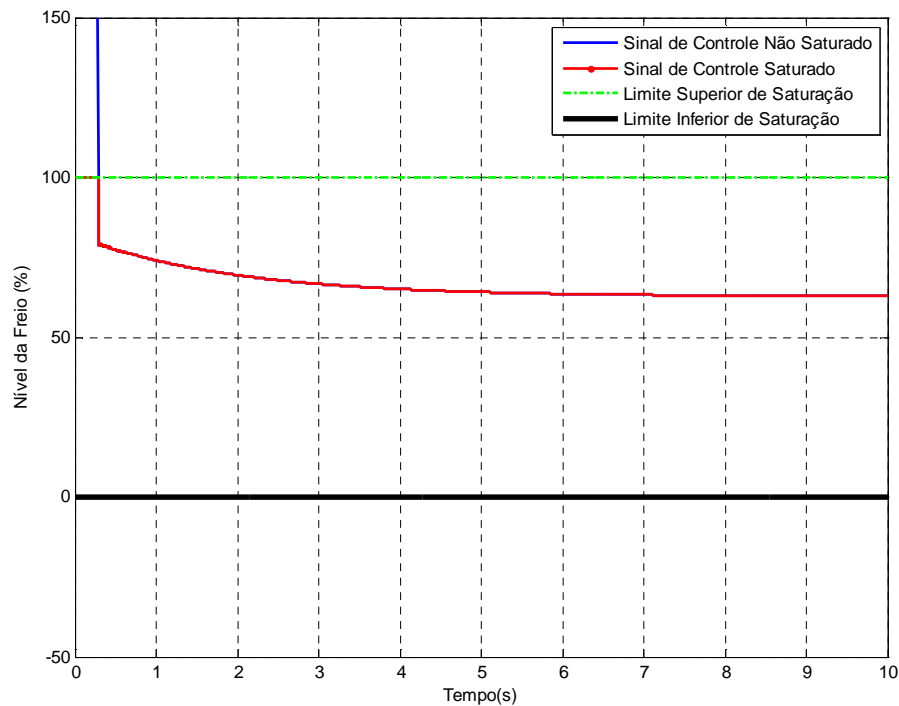


Figura 5.6: Curvas do sinal de controle e do sinal saturado para o caso do controle de rotação do sistema

### 5.3.3 Validação dos Ajustes dos Ganhos

Para validar os ajustes dos ganhos calculados, foi realizada uma simulação no Simulink onde foram aplicadas ao sistema controlado diferentes entradas de referência de rotação, de modo a verificar a convergência do sinal de saída para o valor desejado.

Pode-se observar através da Fig. 5.7 que os resultados foram satisfatórios, já que os valores de saída convergiram para os respectivos valores de referência aplicados às entradas das rotações.

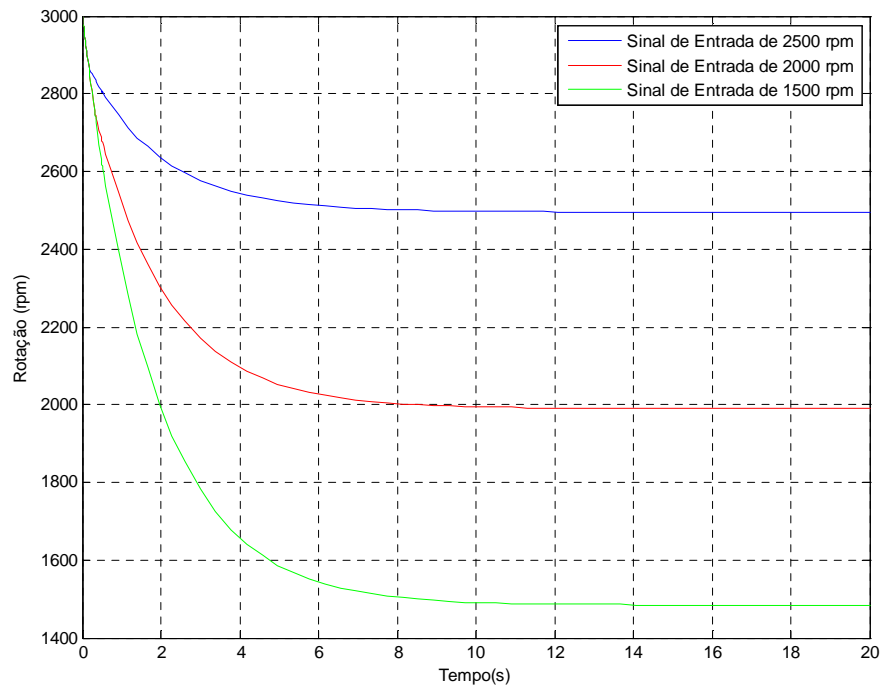


Figura 5.7: Validação dos ajustes dos ganhos do controlador da rotação do sistema.

## **6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais da atuação dos controladores implementados com microcontrolador Atmega16 atuando sobre o sistema Motor-Dinamômetro. Valores desejados de torque e rotação foram especificados para realizar dois testes do tipo amaciamento de motores. No primeiro teste foi utilizado o motor já especificado no trabalho, o FIAT 1.6/16V e, no segundo teste, um motor GM151S. O terceiro teste foi realizado com o motor FIAT 1.6/16V. Este teste foi executado com o objetivo de testar o controlador na situação em que a referência foi tomada em função da abertura de borboleta ao invés dos valores desejados de torque. Este teste é do tipo consumo de combustíveis.

O principal objetivo dos testes realizados é apresentar os resultados do comportamento dos controladores atuando sobre o sistema Motor-Dinamômetro seguindo os valores desejados, sejam estes de torque, rotação ou abertura de borboleta.

### **6.1 Resultados Experimentais de Teste de Amaciamento de Motores – Motor Fiat 1.6/16V**

Para a realização dos testes experimentais do sistema de controle implementado, foram aplicadas em suas entradas valores desejados de rotação e torque conforme a Tabela 6.1, com o objetivo de simular um teste reduzido do tipo amaciamento de motores. A redução se fez necessária para que não houvesse um desgaste e nem causasse danos ao motor.

A condição inicial do sistema Motor-Dinamômetro (Fiat 1.6/16V), comumente chamada de marcha - lenta, é de 1900 RPM (198,967544 rad/s) e torque nulo. Este número de revoluções por minuto é pré-estabelecido de acordo com a regulação dos parâmetros do sistema de injeção eletrônica programável utilizado. Observe que o mesmo é elevado se comparado com valores tradicionais de motores de quatro cilindros de ciclo Otto, os quais ficam compreendidos entre 950 RPM (99,483772 rad/s) e 1100 RPM (115,191736 rad/s). Logo, é importante salientar que o acerto dos parâmetros desta não é o objeto de análise do presente trabalho.

Na Tabela 6.1 pode-se observar que, para cada intervalo de tempo do teste, se possui valores de rotação e torque desejados a serem seguidos pelos controladores. Os intervalos do teste nos quais se deseja um torque nulo (aproximadamente zero) consistem no ponto que o sistema Motor-Dinamômetro é levado a sua condição inicial (marcha – lenta). Isso é necessário para haver o intervalo de “descanso do motor”.

Tabela 6.1: Dados para teste reduzido de amaciamento de motor.

<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Torque [N.m]</b>	<b>Tempo de Estágio [s]</b>	<b>Intervalo de Tempo [s]</b>
1900	0	60	0 - 60
2300	33,01	60	60 - 120
2300	18,86	60	120 - 180
1900	0	60	180 - 240
2600	23,57	60	240 - 300
2000	23,57	60	300 - 360
1900	0	60	360 - 420
3000	18,86	60	420 - 480
3200	28,29	60	480 - 540
1900	0	60	540 - 600
1700	37,72	60	600 - 660
3500	14,14	60	660 - 720
1900	0	60	720 - 780

Os valores desejados aplicados no teste foram escolhidos de maneira a apresentar o funcionamento dos controladores, assim como as suas atuações sobre o sistema Motor-Dinamômetro nas seguintes condições:

- Variando rotação e torque.
- Mantendo a rotação fixa e variando o torque;
- Variando a rotação mantendo a toque fixo;



Os resultados experimentais da rotação, torque, potência, percentual de abertura de borboleta, nível percentual de freio e nível de combustível do reservatório podem ser visualizados nas figuras a seguir.

Nas figuras 6.1 e 6.2, estão apresentados os resultados experimentais da rotação e torque do sistema Motor-Dinamômetro Fiat 1.6/16V sendo controlado seguindo os valores desejados de rotação, segundo a Tabela 6.1.

Na Fig. 6.3, pode-se visualizar o gráfico da potência mecânica fornecida pelo motor de combustão interna Fiat 1.6/16V durante a realização do teste. A potência pode ser definida a partir da Equação 6.1 a seguir:

$$P = \frac{2 \times \pi \times N \times T}{60} \quad (6.1)$$

onde  $P$  é a potência [W],  $T$  é o torque [N.m],  $N$  velocidade de rotação [RPM].

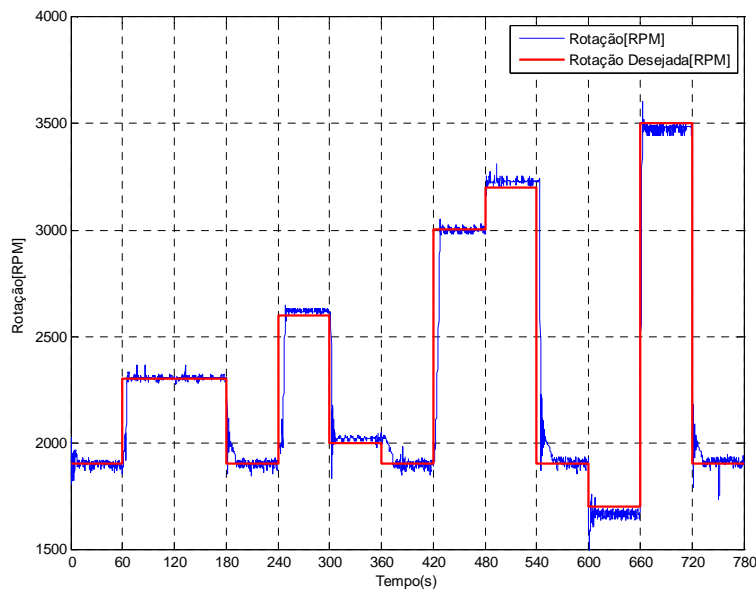


Figura 6.1: Resposta no tempo da rotação - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.

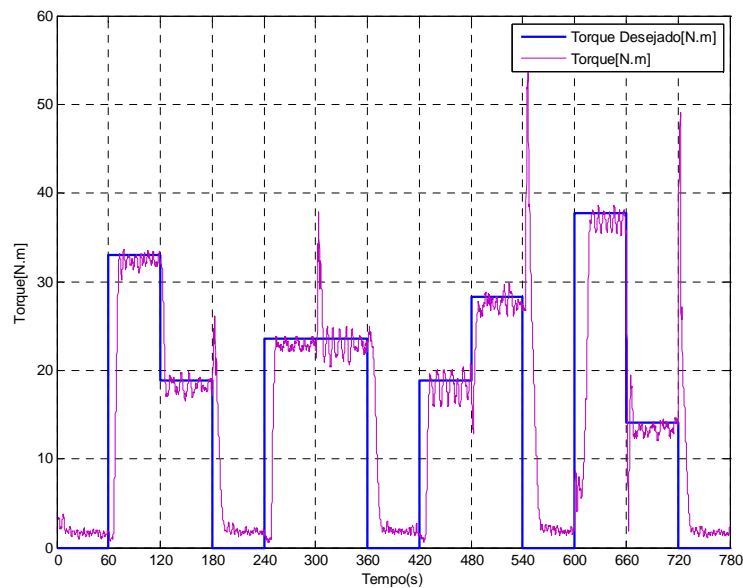


Figura 6.2: Resposta no tempo do torque - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.

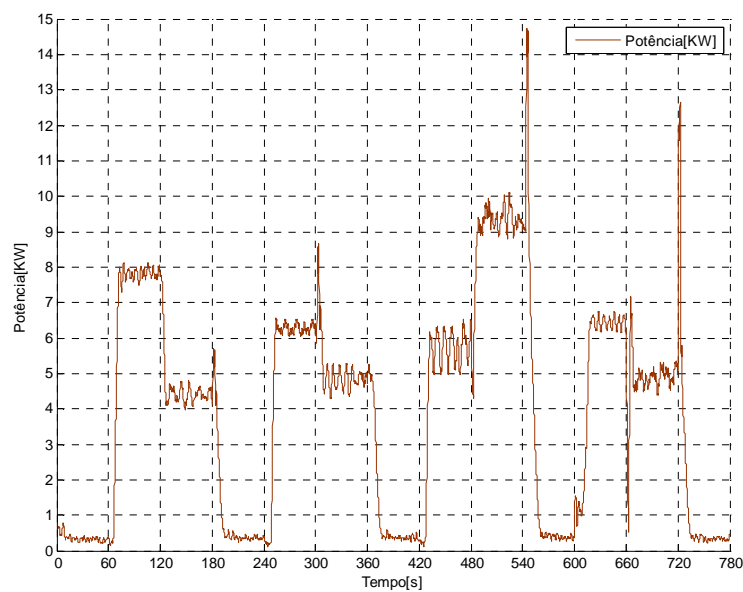


Figura 6.3: Resposta da potência no tempo - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V

Nas figuras 6.4 e 6.5, respectivamente, pode-se visualizar os gráficos do valor percentual da abertura da borboleta e nível percentual de freio aplicados pelos controladores para seguir os valores de torque e rotação desejados durante o teste. E logo a seguir, na Fig. 6.6, está apresentado o gráfico do nível de combustível do reservatório do motor Fiat 1.6/16V, o qual apresenta o consumo de combustível em kg do motor Fiat 1.6/16V, e que pode auxiliar (caso for necessário) nos cálculos de consumo específico de combustível, que representa a taxa que o motor está convertendo o combustível em trabalho.

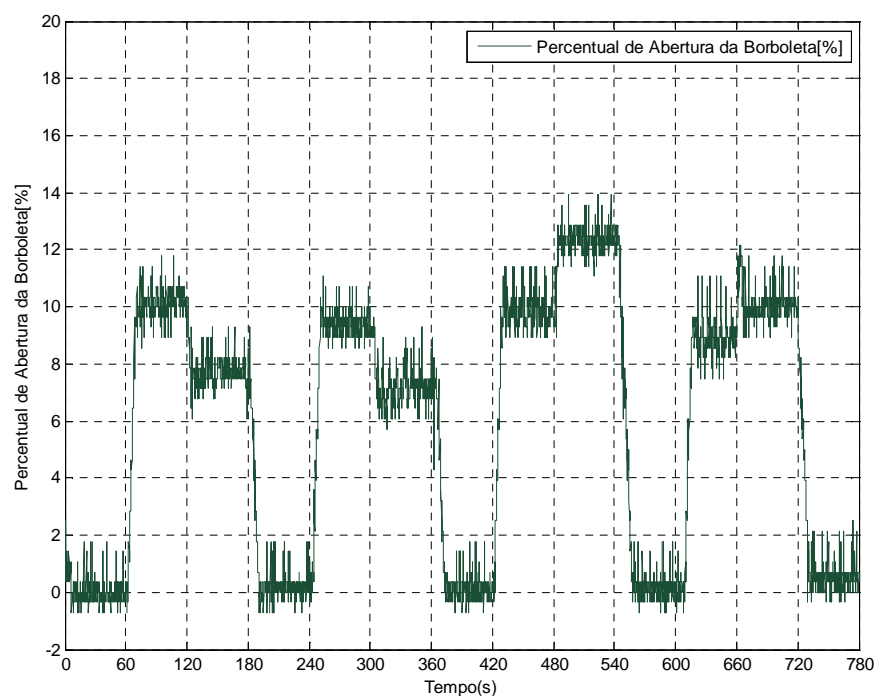


Figura 6.4: Gráfico da resposta no tempo da abertura de borboleta - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.

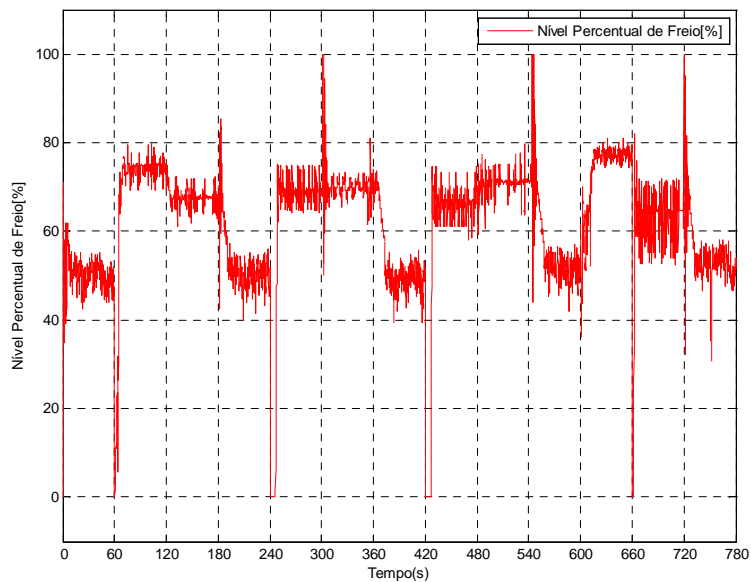


Figura 6.5: Gráfico da resposta no tempo do nível percentual de freio - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.

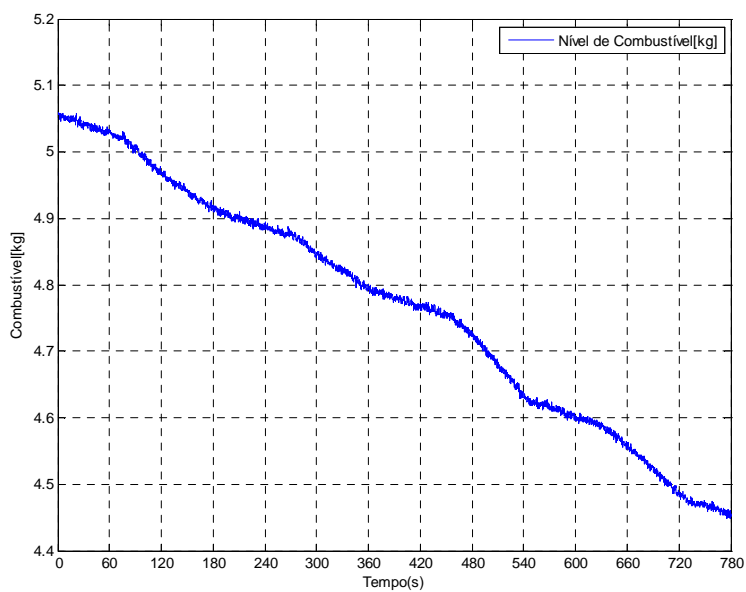


Figura 6.6: Gráfico da resposta no tempo do nível de combustível do reservatório - teste de amaciamento de motores no sistema de controle experimental - Fiat 1.6/16V.

A validação dos controladores implantados na bancada de testes de motores se dá através da convergência da rotação e torque para os valores de referência desejados. Esta convergência pode ser observada através do comparativo dos resultados obtidos experimentalmente, os quais são mostrados nas figuras 6.1 e 6.2, onde têm-se rotação e torque, com os valores da Tabela 6.1. Os sobresinais de torque observados na Fig. 6.2 são devido à grande diferença de dinâmica dos controladores. Percebe-se a dinâmica do controlador de torque é muito mais lenta que a do controlador de rotação. Com isso, verificou-se através dos resultados experimentais que a convergência da rotação para o valor desejado é mais rápida que a do torque.

Os resultados experimentais apresentam pequenas variações nos valores desejados. Isso ocorre pela existência de ruídos e de vibrações no sistema Motor-Dinamômetro.

Os resultados obtidos são considerados satisfatórios, os valores de rotação e torque obtidos se mantiveram próximos dos valores desejados. Pode-se observar também que o sistema comportou-se adequadamente no seguimento dos valores desejados de torque e rotação nas condições que foram propostas para o teste.

Nas seções 6.1.1 a 6.1.4 são apresentadas breves considerações de como os controladores atuaram para que a rotação e o torque convergissem para os valores desejados nas três condições propostas no teste do Fiat 1.616V.

#### 6.1.1 Condição do Controlador Variando a Rotação e Mantendo o Torque Fixo.

Na Fig. 6.7, apresenta-se a situação onde o torque desejado é mantido e a rotação é alterada, ou seja, em um primeiro momento a rotação e o torque desejados são respectivamente, 2600 RPM (272,27 rad/s) e 23,57 N.m e, após certo tempo de funcionamento, apenas a rotação desejada será alterada para 2000 RPM (209,44 rad/s) (após 300s do início do teste). Durante este período transitório de rotação, o torque deve permanecer aproximadamente constante. Durante a operação, o controlador de rotação aumenta o nível percentual de freio com o objetivo de alcançar o valor desejado de 2000 RPM (209,44 rad/s). Essa ação do controlador de rotação resulta em um aumento de torque, e com isso, o controlador de torque atua de forma a diminuir o percentual de abertura da

borboleta, até alcançar o valor de torque desejado novamente. Após convergir para 2000 RPM (209,44 rad/s), e, ao mesmo tempo em que, controlador de torque diminui o percentual de abertura da borboleta, o controlador de rotação diminuir o nível percentual de freio a fim de manter a rotação desejada constante. Uma pequena perturbação no torque pode ser observada. Isto ocorre devido à dinâmica do controlador de torque ser muito mais lenta do que a do controlador de rotação.

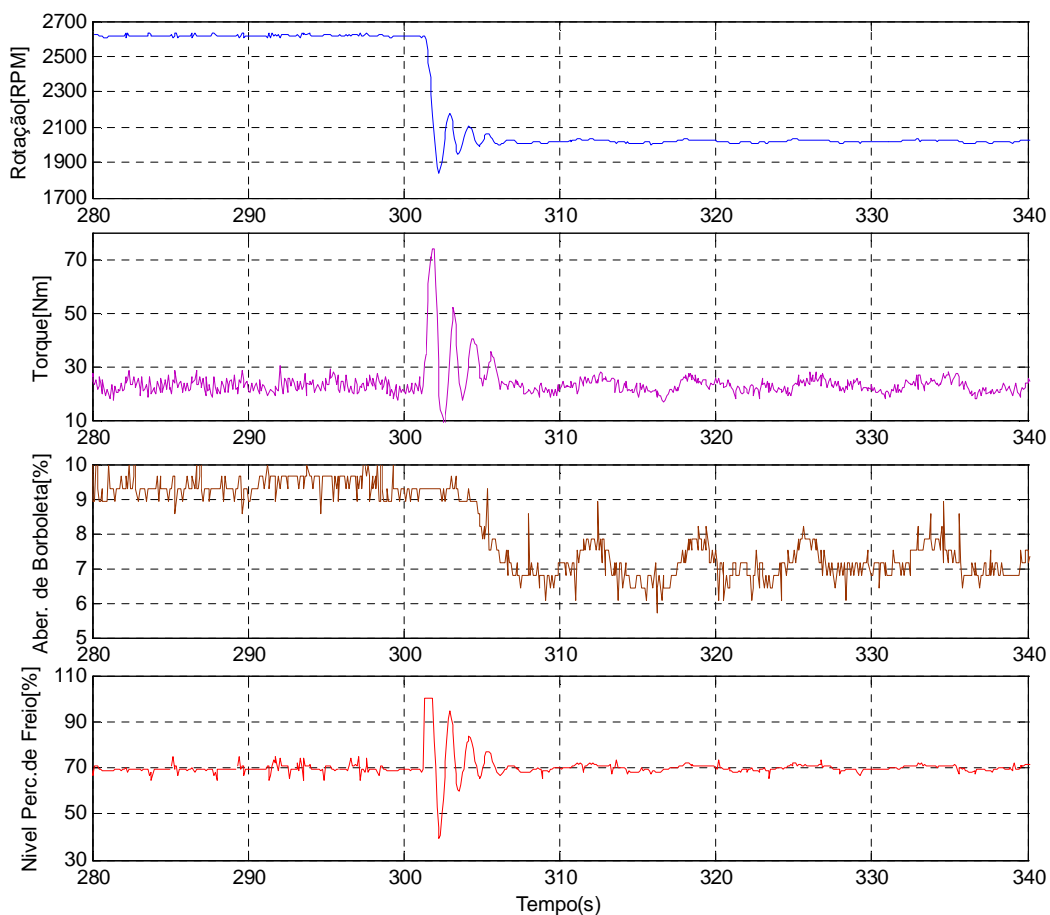


Figura 6.7: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio.

### 6.1.2 Condição do Controlador Mantendo a Rotação Fixa e Variando o Torque.

Na Fig. 6.8, apresenta-se a situação onde a rotação desejada é mantida constante e o torque desejado é alterado, ou seja, em um primeiro momento a rotação e o torque desejados são respectivamente, 2300 RPM (240,86 rad/s) e 30,01 N.m e, após 120s do início do teste, apenas o torque desejado será alterado para 18,86 N.m. Durante este período transitório de torque, a rotação deve permanecer constante próxima ao valor desejado, ou seja, o controlador de rotação deverá realizar as compensações necessárias de maneira a manter a rotação aproximadamente em 2300 RPM (240,86 rad/s). Estas compensações feitas através da diminuição do nível do percentual de freio. Já, o controlador de torque atua de maneira a diminuir o percentual de abertura de borboleta, diminuindo assim o torque. As duas ações conjuntas fazem com que o torque seja alterado, sem interferir na rotação.

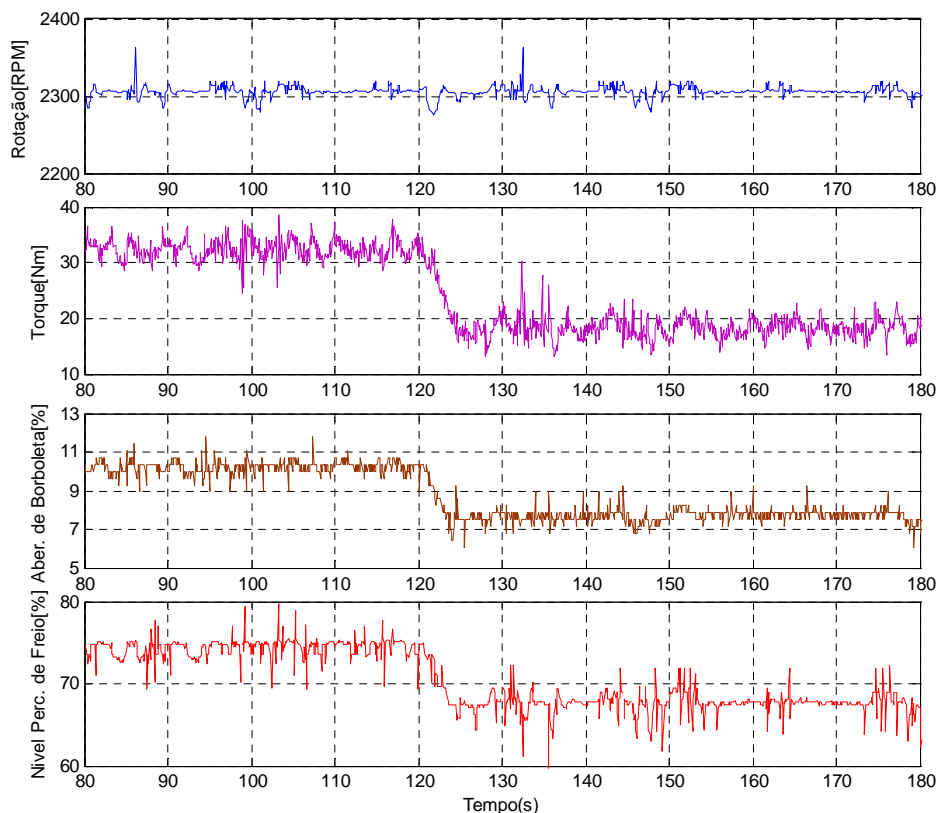


Figura 6.8: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio

### 6.1.3 Condição do Controlador Variando Torque e Rotação Desejados.

Na Fig. 6.9, apresenta-se outra fase do teste, onde a rotação e torque desejados também são alterados, ou seja, em um primeiro momento a rotação e o torque desejados são, respectivamente, 3000 RPM (314,16 rad/s) e 18,86 N.m. Após certo tempo de operação, a rotação e o torque desejados são alterados para 3200 RPM (335,1 rad/s) e 28,29 N.m (essa alteração ocorre após 480s do início do teste). Durante a operação, o controlador de torque atua aumentando o percentual de abertura da borboleta (assim buscando aumentar o torque para 28,29 N.m) e o controlador de rotação começa a aumentar o nível percentual de freio para manter a rotação fixa em 3200 RPM (335,1 rad/s).

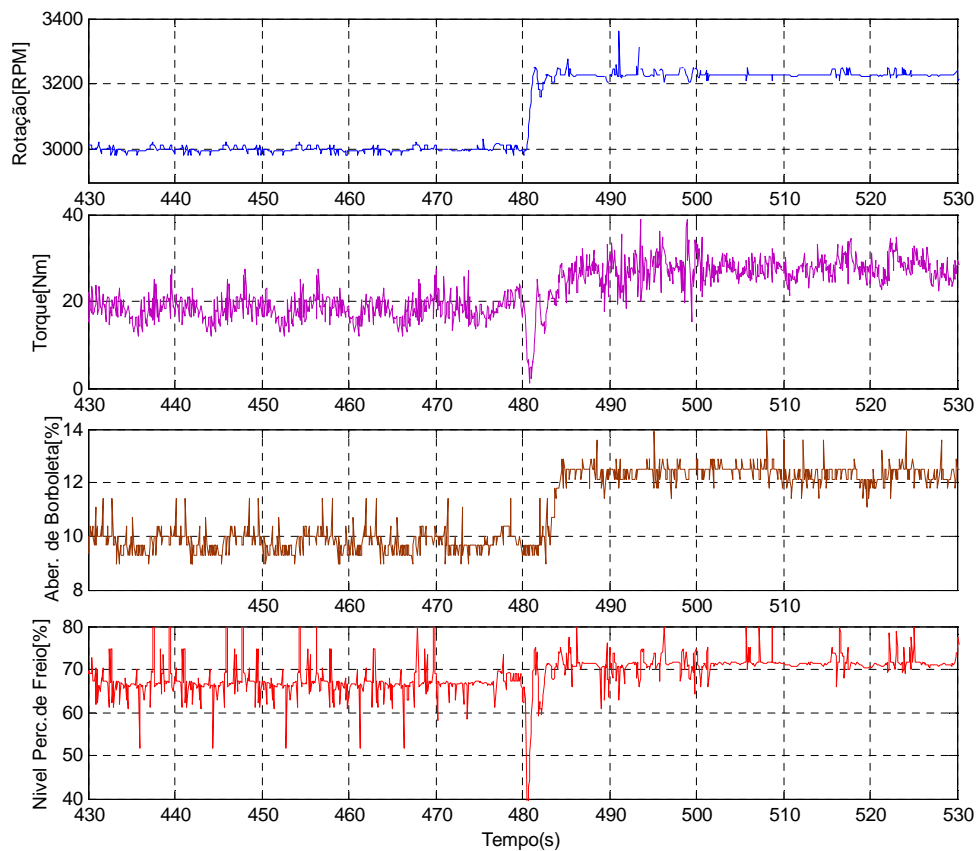


Figura 6.9: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio



#### 6.1.4 Condição do Controlador Variando Torque e Rotação Desejados a Partir da Condição Inicial do Motor.

No instante inicial têm-se a borboleta fechada (percentual de abertura zero) e a leitura da célula de carga aproximadamente zero, ou seja, torque nulo. Partindo-se então desta condição inicial (1900 RPM (198,96 rad/s) e torque nulo) para os valores de rotação e torque desejados (2300 RPM (240,86 rad/s) e 33,01 N.m), o processo de controle é iniciado (após 60s do início do teste). Neste momento o controlador de torque aciona o motor de passo, o qual altera o percentual de abertura de borboleta, fazendo com que eleve o valor de rotação. Ela se elevará até atingir o valor de rotação desejado de 2300 RPM (240,86 rad/s), neste momento o controlador de rotação entrará em funcionamento fazendo com que este valor não seja ultrapassado. Neste segundo momento, o controlador de rotação atua sobre o dinamômetro, freando o sistema. A frenagem resulta na aplicação de um torque que é transmitido pelo braço de alavanca à célula de carga. Assim, a medição da força sobre a mesma permite o cálculo do torque frenante. O percentual de abertura da borboleta será incrementado pelo controlador de torque até atingir o valor de desejado. Na Fig. 6.10 estão apresentados os gráficos de rotação, torque, abertura percentual de borboleta e nível percentual de freio no momento do teste em que ocorre a condição descrita. É importante salientar que, se o valor de torque desejado especificado for nulo, o processo de controle não terá início, pois, não existindo um torque desejado, o percentual de abertura de borboleta não será alterado, não elevando então rotação. Assim, não ocorre a necessidade do controlador de rotação entrar em funcionamento. Além disso, sem frear, nenhum torque de reação é produzido.

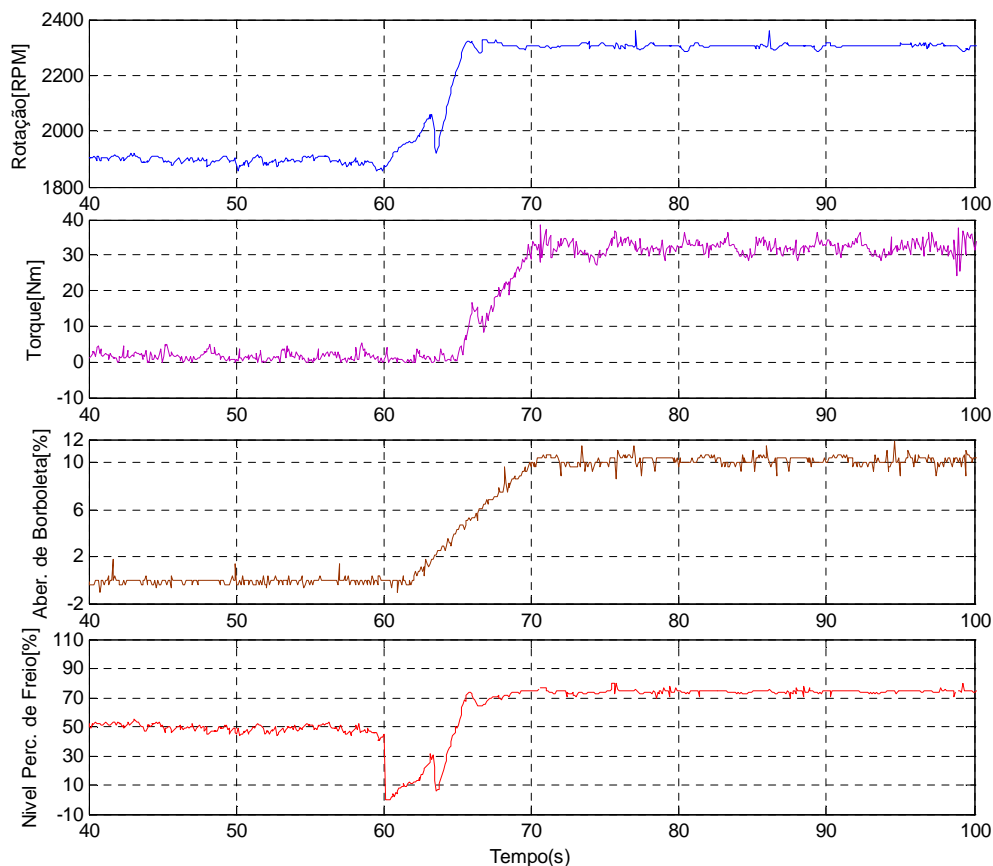


Figura 6.10: Resposta no tempo de rotação, torque, abertura de borboleta e nível percentual de freio

## 6.2 Resultados Experimentais de Teste de Amaciamento de Motores - Motor GM 151S

Este teste foi realizado com o objetivo de observar o desempenho dos controladores aplicados em outro tipo de motor. O Motor utilizado foi um GM151S de quatro cilindros,  $2509 \text{ cm}^3$  e potência bruta de  $72,07 \text{ kW}$  a  $4800 \text{ RPM}$  ( $502,65 \text{ rad/s}$ ), onde na condição inicial (marcha-lenta) a rotação é de aproximadamente  $1100 \text{ RPM}$  ( $115,19 \text{ rad/s}$ ).

Na Tabela 6.2 pode-se observar que, para cada intervalo de tempo do teste, se dispõe de valores de rotação e torque desejados a serem seguidos pelos controladores.

Os valores de rotação e torque desejados para o teste do tipo amaciamento de motores (vide Tabela 6.2) no sistema Motor-Dinamômetro GM151S foram em grande parte os mesmos valores de rotação e torque utilizado no teste de amaciamento de motores realizado no motor Fiat 1.6/16V .

Tabela 6.2: Dados para teste reduzido de amaciamento de motor

<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Torque [N.m]</b>	<b>Tempo de Estágio [s]</b>	<b>Intervalo de Tempo [s]</b>
1100	0	60	0 - 60
2300	33,01	60	60 - 120
2300	18,86	60	120 - 180
1100	0	60	180 - 240
2600	23,57	60	240 - 300
2000	23,57	60	300 - 360
1100	0	60	360 - 420
3000	18,86	60	420 - 480
3200	28,29	60	480 - 540
1100	0	60	540 - 600
1700	37,72	60	600 - 660
3500	14,14	60	660 - 720
1100	0	60	720 - 780

Nas figuras 6.11 e 6.12, estão apresentados os resultados experimentais da rotação e torque do sistema Motor-Dinamômetro GM151S sendo controlado seguindo os valores desejados da Tabela 6.2.

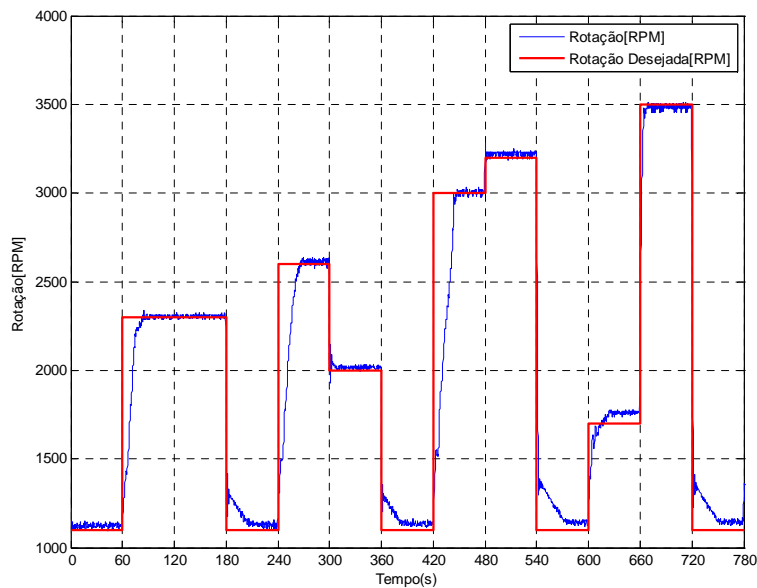


Figura 6.11: Resposta no tempo da rotação - teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – GM151S.

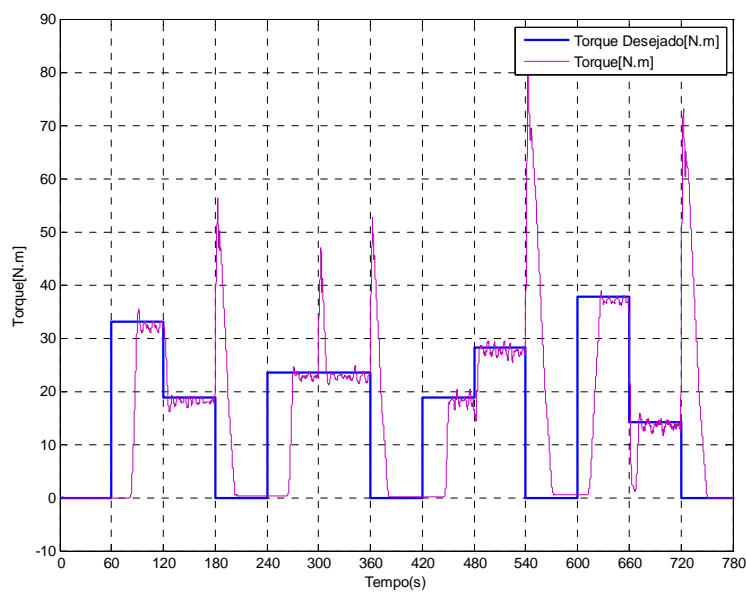


Figura 6.12: Resposta no tempo do torque - teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – GM151S.

Os resultados experimentais de potência, percentual de abertura da borboleta e nível percentual de freio do teste do tipo amaciamento de motores realizado no sistema Motor-Dinamômetro GM151S estão apresentados na Fig. 6.13.

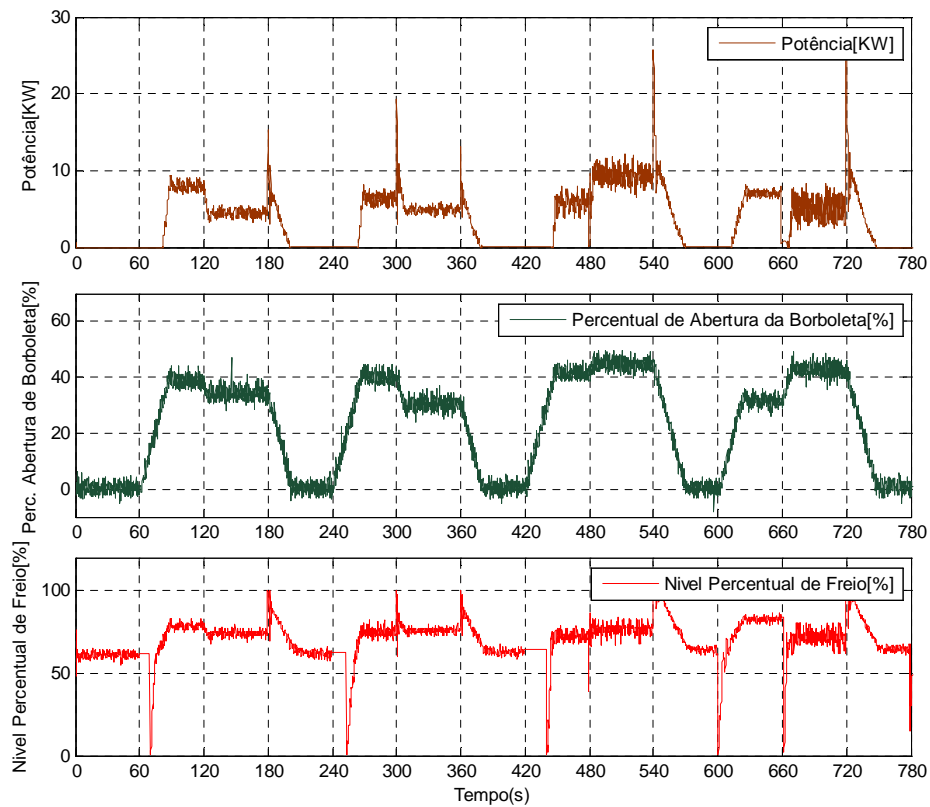


Figura 6.13: Resposta no tempo da potência, percentual de abertura da borboleta e nível percentual de freio - teste do tipo amaciamento de motores no sistema de controle experimental – GM151S.

Através da comparação dos resultados experimentais de rotação e torque respectivamente apresentados nas figuras 6.11 e 6.12 com os valores da Tabela 6.2, pode-se concluir que os resultados alcançados pelo sistema de controle atuando no teste realizado no motor GM151S são satisfatórios, pois os valores de torque e rotação se mantiveram próximos dos valores desejados.

### 6.3 Resultados Experimentais de Teste de Consumo de Combustíveis

Nesse teste, níveis percentuais de abertura de borboleta são pré-definidos. Assim, não é utilizado como realimentação o sinal emitido pela célula de carga. Desta forma não se controla o torque. É utilizado como realimentação o sinal emitido pelo sensor de posição da borboleta (TPS – Throttle Position Sensor) para seguir os valores desejados do percentual de abertura da borboleta. O motor utilizado para a realização desse teste foi o Fiat 1.6/16V.

Com este teste é possível demonstrar a flexibilidade do sistema proposto neste trabalho, pois com pequenas alterações nas configurações dos controladores diferentes tipos de testes podem ser realizados.

Na Fig. 6.14 é apresentado o diagrama em blocos do controlador do percentual de abertura da borboleta, onde se tem como entrada a referência do valor desejado para o a percentual de abertura de borboleta e como saída o valor do percentual de abertura de borboleta medido, que é subtraído do valor desejado, originando o sinal do desvio. Este sinal serve como base para o controlador proporcional tomar a decisão de qual será o sinal de controle que deverá ser aplicado ao motor de passo para atuar na borboleta do acelerador.

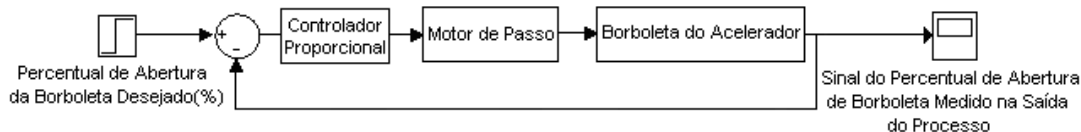


Figura 6.14: Diagrama em blocos para o controle do percentual de abertura de borboleta.

Para a realização dos testes experimentais do sistema de controle implementado foram aplicadas em suas entradas valores desejados de rotação e percentual de abertura da borboleta conforme a Tabela 6.3, com o objetivo de simular um teste reduzido do tipo consumo de combustíveis. A redução se fez necessária para que não houvesse um desgaste e nem causasse danos ao motor.

Na Tabela 6.3 pode-se observar que, para cada intervalo de tempo do teste, dispõem-se de valores desejados de rotação e percentual de abertura da borboleta a serem seguidos pelos controladores. Os intervalos do teste que se deseja um percentual de abertura da

borboleta nulo (aproximadamente zero) consistem nos pontos em que o sistema Motor-Dinamômetro Fiat 1.6/16V é levado a sua condição inicial (marcha – lenta) isso para haver um intervalo de “descanso do motor”.

Tabela 6.3: Dados para teste reduzido de consumo de combustíveis.

<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Percentual de Abertura da Borboleta [%]</b>	<b>Tempo de Estágio [s]</b>	<b>Intervalo de Tempo [s]</b>
1800	0	60	0 - 60
2000	25	60	60 - 120
2000	50	60	120 - 180
2000	75	60	180 - 240
2000	100	60	240 - 300
1800	0	60	300 - 360
2500	25	60	360 - 420
2500	50	60	420 - 480
2500	75	60	480 - 540
2500	100	60	540 - 600
1800	0	60	600 - 660
2500	25	60	660 - 720
3000	50	60	720 - 780
3000	75	60	780 - 840
3000	100	60	840 - 900
1800	0	60	900 - 960

Nas figuras 6.15 e 6.16, pode-se observar o comportamento da rotação e torque do sistema Motor-Dinamômetro Fiat 1.6/16V sendo controlado seguindo os valores desejados apresentados na segunda a Tabela 6.3.

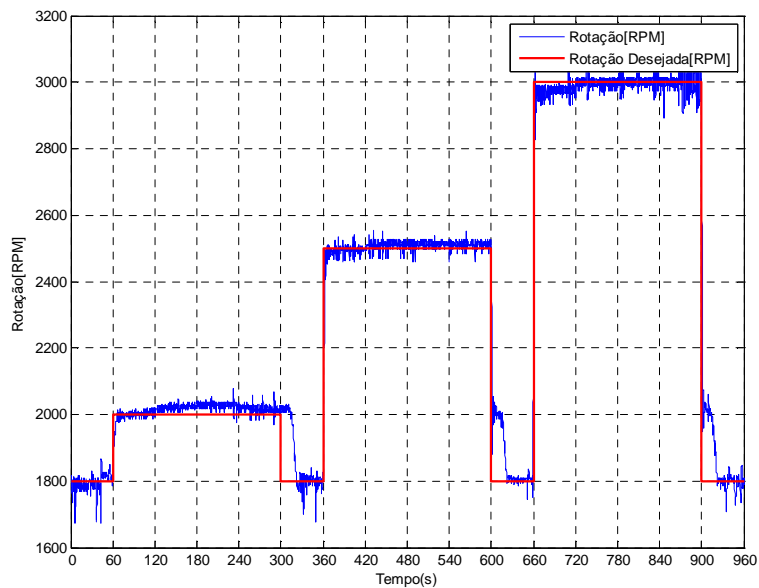


Figura 6.15: Resposta no tempo da rotação - teste do tipo consumo de combustíveis no sistema de controle experimental – Fiat 1.6/16V.

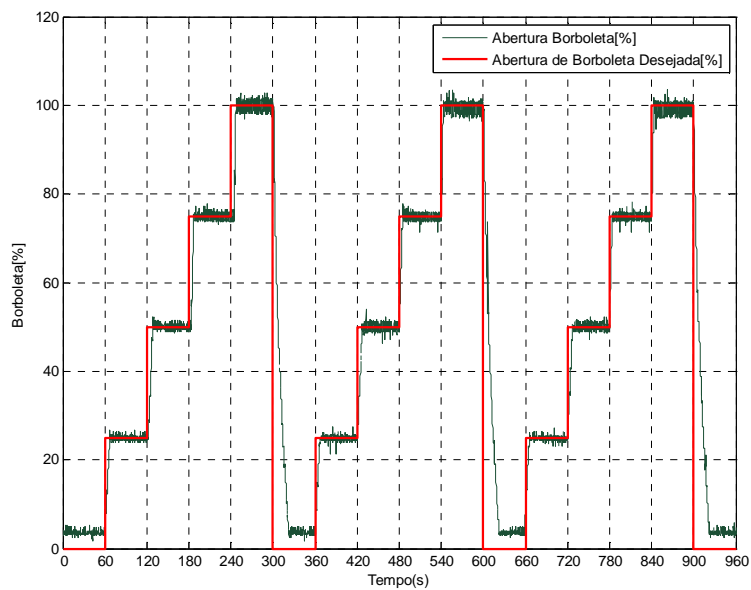


Figura 6.16 Resposta no tempo do percentual de abertura da borboleta - teste do tipo consumo de combustíveis no sistema de controle experimental – Fiat 1.6/16V.



Os resultados experimentais de torque, potência, nível percentual de freio e nível de combustível do reservatório do teste do tipo consumo de combustíveis realizado no sistema Motor-Dinamômetro Fiat 1.6/16V estão apresentados na Fig. 6.17.

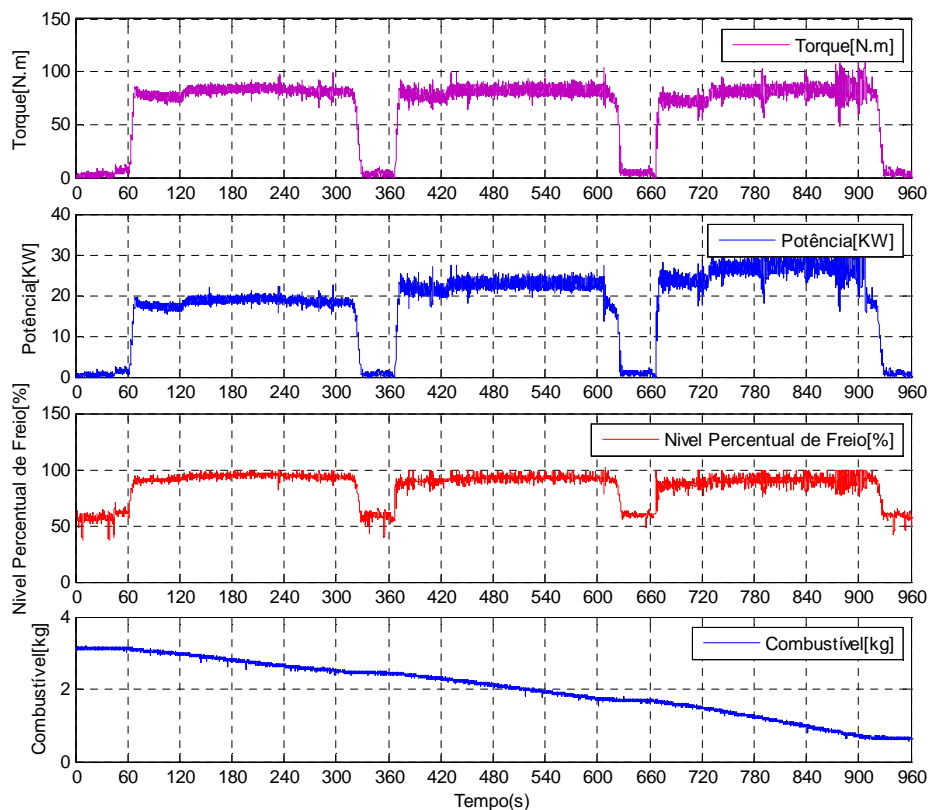


Figura 6.17: Resposta no tempo do torque, potência, nível percentual de freio e nível de combustível do reservatório- teste do tipo consumo de combustíveis no sistema de controle experimental – Fiat 1.6/16V.

Através da comparação dos resultados experimentais de rotação e percentual de abertura de borboleta, respectivamente apresentados nas figuras 6.15 e 6.16, com os valores da Tabela 6.3, pode-se observar que os resultados alcançados pelo sistema de controle atuando no teste realizado no motor Fiat 1.6/16V são satisfatórios, pois os valores de rotação e percentual de abertura de borboleta se mantiveram próximos dos valores desejados.

Através do resultado experimental de torque obtido no teste do tipo consumo de combustíveis, observa-se que para as variações de 25%, 50%, 75% e 100% do percentual de abertura de borboleta em uma mesma rotação, o torque se manteve aproximadamente na mesma faixa de valores. Logo, pode-se afirmar que o mesmo não se mostrou proporcional ao percentual de abertura de borboleta.

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho trata da automação de um dinamômetro de teste de motores de combustão interna. Assim, além do levantamento bibliográfico dos temas afins, foram estudados e descritos alguns dos principais testes realizados em motores de combustão interna e as principais técnicas de controle e instrumentação que estão sendo desenvolvidas por pesquisadores sobre o tema de controle de dinamômetro para testes de motores de combustão interna.

Através da identificação das características de funcionamento do dinamômetro (Seção 4.1), pôde-se observar que apenas a partir de aproximadamente 50% de nível percentual de freio a placa condicionadora da intensidade de corrente elétrica ligada ao dinamômetro inicia o envio de intensidade de corrente suficiente para apresentar uma ação efetiva de frenagem. Isso pode ser confirmado através dos resultados experimentais apresentados, pois no momento do teste em que o dinamômetro está realmente atuando (freando), os níveis percentuais de freio mantêm-se sempre acima de 50%.

No presente trabalho obteve-se sucesso na implementação experimental do sistema proposto para o controle do sistema Motor-Dinamômetro. Ressalta-se ainda que grande parte dos componentes e equipamentos utilizados para a realização dos testes dos motores de combustão interna e para o sensoriamento do sistema foram desenvolvidos no âmbito do presente trabalho. Além disso, o condicionamento dos sinais, a calibração do sistema de medição e o desenvolvimento da interface gráfica do microcontrolador com um microcomputador foram realizados com sucesso.

O controlador proporcional (P) projetado para o controle de torque não necessitou de simulações para ajustá-lo devido ao fato de o motor apresentar uma dinâmica (relativamente) lenta. Este fato também contribuiu para que a convergência do torque para o valor de desejado não ocasionasse perturbações significativas na rotação.

Para o controle da rotação foi necessário projetar um controlador proporcional, integral, derivativo (PID). Os ganho deste controlador (respectivamente,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ ), foram ajustados via simulações e sua aplicação no controle do sistema real mostrou-se bastante

eficiente, validando tanto a proposta de uso de tal controlador, como da metodologia de ajuste dos ganhos via simulação.

Foram realizados testes experimentais para determinação da eficiência do sistema de controle de torque e rotação. A validação dos controladores foi realizada através da verificação da convergência da rotação e do torque para seus valores de referência desejados. Assim, apesar da presença de ruídos e vibrações, o sistema de controle apresentou um comportamento satisfatório, aproximando suficientemente as respostas de rotação e torque dos valores desejados.

No presente trabalho, pôde-se constatar também a melhora quanto ao tempo de convergência do torque e da rotação para os valores desejados. Comparando com o método tradicional (no qual a abertura da borboleta é realizada através da variação manual da posição de uma alavanca e o ajuste da intensidade da corrente elétrica aplicada ao dinamômetro é feita através do ajuste manual de um potenciômetro), o sistema automatizado proposto forneceu uma redução média de aproximada 83% (de 90 segundos para 15 segundos) do tempo de acomodação.

Uma conclusão importante sobre o comportamento do sistema, obtida a partir da comparação dos resultados experimentais de torque, é que o mesmo não é proporcional ao percentual de abertura de borboleta, como foi comprovado no teste do tipo consumo de combustíveis (Seção 6.3). Isto implica em uma mudança na resolução do torque ao longo da faixa de atuação do freio, onde no início do percentual de abertura da borboleta temos uma menor resolução e, esta vai diminuindo exponencialmente à medida que este percentual de abertura é incrementado. Aproximadamente a partir de 30% até 100% o torque se manteve praticamente constante.

Conclui-se que o trabalho atingiu as metas propostas de desenvolver um sistema de controle de torque e rotação para testes de motores testados em bancada dinamométrica.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aprofundamento da modelagem e do controle do sistema.
- redução dos ruídos (elétricos, eletromagnéticos, vibrações etc.) da bancada.
- melhora da interface gráfica em Labview, desenvolvendo uma nova versão que permita atuar mais amigavelmente sobre o microcontrolador permitindo dispor de opções adicionais, como, por exemplo, iniciar o processo de controle, ajustar os valores de rotação, torque e ajustar o tempo de duração dos testes via interface gráfica.
- desenvolvimento de um sistema de proteção da operação que deverá monitorar as temperaturas, pressão de óleo e rotação do motor de combustão interna e dinamômetro. Assim, quando for necessário, o sistema será levado à condição inicial do motor (marcha - lenta) ou até mesmo ser desligado.
- substituição do motor de passo por um motor de corrente contínua (por exemplo), tornando a dinâmica do atuador da borboleta mais rápida.
- implementação de um sistema que possa evitar aumentos excessivos de torque e rotação.
- testes de outros tipos motores de combustão interna.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfa Instrumentos Disponível em: <[www.alfainstrumentos.com.br](http://www.alfainstrumentos.com.br)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Atmel Corporation. Disponível em: <<http://www.atmel.com>>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Bosh. Disponível em: <[www.bosh.com](http://www.bosh.com)>. Acesso em: 20 abr. 2009

Cruz M. M. F. e Duarte S. L., 2006, Projeto de implementação de um Sistema de Controle Pid para o Banco de Ensaio de Motores do Laboratório de Energia e Ambiente, Universidade de Brasília.

Eletromotive. Disponível em: <[www.electromotive-inc.com](http://www.electromotive-inc.com) >. Acesso em: 20 abr. 2009.

Fairchild Disponível em: < [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Flexar Disponível em: < [www.flexar.com.br](http://www.flexar.com.br)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Giacosa, D., 1986, “Motores Endotermicos”, 3a edição, Editorial Científico-Médica, Barcelona.

ICEL. Disponível em: <[www.icel-manaus.com.br](http://www.icel-manaus.com.br)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Pereira J. C., 1999, Disponível em <<http://www.joseclaudio.eng.br/dinos1.html>>. Acesso em: 10 jul. 2008.

Linpo Disponível em: < <http://www.linpo.com/LinpoTechnology.htm> >. Acesso em: 20 abr. 2009.

Magneti Marelli. Disponível em: < [www.magnetimarelli.com.br](http://www.magnetimarelli.com.br)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

MATLAB Disponível em: < [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)> Acesso em: 20 abr. 2009

Minipa. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br>>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Moulton N. L, 2007, Performance Measurment And Smulation Of A Small Internal Combustion Engine, University of Maryland.

National Instruments Disponível em: <[www.ni.com](http://www.ni.com)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

National Semiconductur Disponível em: <[www.national.com](http://www.national.com)>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Ogata K, 2000, Engenharia de Controle Moderno, Editora Pearson Rio de Janeiro.

Ramalho M, 2006, “Porgramação Básica de Labview” Disponível em: [http://www.dem.ist.utl.pt/~m\\_ei/PEB.pdf](http://www.dem.ist.utl.pt/~m_ei/PEB.pdf), Acesso em: 2 abr. 2009.

Rohenkohl P, 2004, “Dinâmica dos Testes de Motores, seus Componentes, Controles e Validação” Campo Limpo SP.

Roos C. e Montijo A. A., 2005, Projeto de Implementação de um Sistema de Controle PID para o Banco de Ensaio de Motores do LEA usando Arquiteturas Reconfiguráveis, Universidade de Brasília.

Simulink Disponível em: < [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) > Acesso em: 20 abr. 2009.

SLO-SYN Disponível em: <<http://www.superiorelectric.com/slo-syn-seco.htm>>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Souza R. D, 2005, Balança Curie e Correntes de Foucault, UNICAMP SP.

Texas Instruments. Disponível em: <<http://www.ti.com>>. Acesso em: 20 abr. 2009.

Trielli M. A., 2007, Emissões Atmosféricas, EPUSP.