

SÉRGIO MALTA MASSUDA

**USO DE ACELERÔMETRO MEMS PARA
AFERIR O DESEMPENHO DE AUTOMÓVEIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do Centro Universitário de Brasília, como exigência parcial para conclusão do curso de Engenharia de Computação, sob orientação do Professor Thiago de Miranda Leão Toribio.

**Brasília – Distrito Federal
Novembro/2007**

A todos que me apoiaram, incentivaram, colaboraram, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, com minha gratidão.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo mostrar uma aplicação de um acelerômetro *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) para medir o desempenho de automóveis. Os parâmetros adotados para a análise do desempenho são: tempo gasto para sair do repouso e atingir uma velocidade de 100km/h, tempo gasto para sair do repouso e percorrer uma distância de 402m e potência útil do automóvel. Para tanto, são utilizados conceitos físicos de cinemática e dinâmica.

A implementação consiste em projetar e montar um protótipo que utiliza um acelerômetro MEMS para obter a aceleração instantânea do veículo e programar um microcontrolador para controle do equipamento. São apresentados como resultados do trabalho o próprio equipamento e o programa escrito para o mesmo.

Palavras-chaves: acelerômetro, MEMS, desempenho, automóvel, aceleração, velocidade, distância, potência.

ABSTRACT

This dissertation's objective is to demonstrate an application of a *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) accelerometer to measure automobiles performance. The adopted parameters for the performance analysis are: time spent to leave rest and reach a speed of 100km/h, time spent to leave rest and cover a distance of 402m and true power of the automobile. For in such a way, physical concepts of kinematics and dynamics are used.

The implementation consists of designing and assembling a prototype that uses an accelerometer MEMS to get the instantaneous acceleration of the vehicle and programming a microcontroller for control of the equipment. The equipment and program are presented as results of the project.

Key-words: accelerometer, MEMS, performance, automobile, acceleration, velocity, distance, power.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. ANÁLISE FÍSICA	18
2.1. Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV).....	18
2.1.1. <i>Aceleração</i>	19
2.1.2. <i>Velocidade</i>	20
2.1.3. <i>Distância</i>	22
2.2. Segunda Lei de Newton.....	23
2.3. Potência	24
2.4. Lei de Hooke.....	26
3. ACELERÔMETRO MEMS.....	28
3.1. Tecnologia MEMS.....	29
3.2. Funcionamento	30
4. VISÃO GERAL DO PROJETO.....	35
4.1. Aquisição de dados.....	35
4.1.1. <i>Acelerômetro</i>	36
4.1.2. <i>Fonte de relógio</i>	38
4.2. Processamento e controle	39
4.2.1. <i>Microcontrolador</i>	39
4.3. Interface com o usuário	42
4.3.1. <i>Tela de LCD</i>	42
4.3.2. <i>Botão de interrupção</i>	43
5. IMPLEMENTAÇÃO	44
5.1. Hardware	44
5.1.1. <i>Acelerômetro</i>	45
5.1.2. <i>Microcontrolador</i>	46
5.1.2.1. Seleção da fonte de relógio	47
5.1.2.2. Conversão A/D	49
5.1.3. <i>Circuito de alimentação</i>	50
5.2. Software.....	51
5.2.1. <i>Funcionalidades implementadas</i>	52

5.2.1.1. Tempo gasto para sair do repouso e atingir 100km/h.....	52
5.2.1.2. Tempo gasto para sair do repouso e percorrer 402m.....	53
5.2.1.3. Potência útil do automóvel.....	54
5.2.2. <i>Configuração do microcontrolador</i>	55
5.2.2.1. Interrupções.....	55
5.2.2.2. Contagem do tempo	56
5.2.2.3. Conversão A/D	60
5.3. Operação do protótipo	63
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
6.1. Testes preliminares.....	67
6.2. Teste do protótipo	70
6.2.1. <i>Tempo gasto para sair do repouso e atingir 100km/h</i>	73
6.2.2. <i>Tempo gasto para sair do repouso e percorrer 402m</i>	75
6.2.3. <i>Potência útil máxima</i>	78
6.2.3.1. Resultados dos testes.....	78
6.2.3.2. Análise dos resultados.....	80
7. CONCLUSÃO	85
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO 1: CÓDIGO FONTE PARA TESTE DO ACELERÔMETRO	89
ANEXO 2: CÓDIGO FONTE PARA TESTE DOS ROTINAS DE CÁLCULO	91
ANEXO 3: CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA	93
ANEXO 4: GRÁFICO DINAMÔMETRO DE ROLO AUTOMÓVEL 1	98
ANEXO 5: FOTOGRAFIAS DO PROTÓTIPO	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CRONÔMETRO DE FOTOCÉLULA.....	15
FIGURA 2: SISTEMA PARA ENSAIOS VEICULARES.....	15
FIGURA 3: DINAMÔMETRO DE BANCADA.....	16
FIGURA 4: DINAMÔMETRO DE ROLO.....	17
FIGURA 5: GRÁFICO ACELERAÇÃO PELO TEMPO.....	21
FIGURA 6: GRÁFICO VELOCIDADE PELO TEMPO.....	22
FIGURA 7: LEI DE HOOKE.....	26
FIGURA 8: ACELERÔMETRO MEMS.....	28
FIGURA 9: ÁCARO EM CIMA DE UM DISPOSITIVO MEMS.....	29
FIGURA 10: ACELERÔMETRO EM ESCALA DE 100 MM.....	30
FIGURA 11: SISTEMA DE MOLAS DUPLAS.....	31
FIGURA 12: TOPOLOGIA DO PROJETO.....	35
FIGURA 13: DIAGRAMA DE BLOCO ADXL203E.....	36
FIGURA 14: ACELERAÇÃO ESTÁTICA.....	38
FIGURA 15: MICROCONTROLADOR ATMEGA8.....	40
FIGURA 16: DIAGRAMA DE BLOCO DA TELA DE LCD.....	42
FIGURA 17: KIT DE DESENVOLVIMENTO.....	44
FIGURA 18: CIRCUITO DO ACELERÔMETRO ADXL203E.....	46
FIGURA 19: CONFIGURAÇÃO DA FONTE DE RELÓGIO.....	48
FIGURA 20: CIRCUITO DE LIGAÇÃO DO CRISTAL EXTERNO.....	49
FIGURA 21: CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO.....	51
FIGURA 22: FLUXOGRAMA DO TEMPO DE 0 A 100KM/H.....	53
FIGURA 23: FLUXOGRAMA DO TEMPO NOS 402M.....	53
FIGURA 24: FLUXOGRAMA DA POTÊNCIA ÚTIL.....	54
FIGURA 25: MENU DE SELEÇÃO DE OPÇÕES.....	64
FIGURA 26: TELA DE SELEÇÃO DO PESO.....	64
FIGURA 27: TELA DE CALIBRAGEM DO SISTEMA.....	65
FIGURA 28: SISTEMA PRONTO PARA MEDIR.....	65
FIGURA 29: INÍCIO DA MEDIÇÃO DO TEMPO.....	65
FIGURA 30: RESULTADO DA MEDIÇÃO DE TEMPO.....	66

FIGURA 31: INÍCIO DA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ÚTIL.	66
FIGURA 32: RESULTADO DA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ÚTIL.	66
FIGURA 33: GRÁFICO DAS AMOSTRAS DA CONTAGEM DE 30s.....	69
FIGURA 34: GRÁFICO DAS AMOSTRAS DA CONTAGEM DE 120s.....	69
FIGURA 35: GRÁFICO DA MÉDIA DO TEMPO DE 0-100KM/H DO AUTOMÓVEL 1.	73
FIGURA 36: GRÁFICO DA MÉDIA TRUNCADA DO TEMPO DE 0-100KM/H DO AUTOMÓVEL 1. ..	74
FIGURA 37: GRÁFICO DA MÉDIA DO TEMPO DE 0-100KM/H AUTOMÓVEL 2.	74
FIGURA 38: GRÁFICO DA MÉDIA TRUNCADA DO TEMPO DE 0-100KM/H AUTOMÓVEL 2.....	75
FIGURA 39: GRÁFICO DA MÉDIA DO TEMPO NOS 402M DO AUTOMÓVEL 1.	76
FIGURA 40: GRÁFICO DA MÉDIA TRUNCADA DO TEMPO NOS 402M DO AUTOMÓVEL 1.	76
FIGURA 41: GRÁFICO DA MÉDIA DO TEMPO NOS 402M DO AUTOMÓVEL 2.	77
FIGURA 42: GRÁFICO DA MÉDIA TRUNCADA DO TEMPO NOS 402M DO AUTOMÓVEL 2.	77
FIGURA 43: GRÁFICO DA MÉDIA DA POTÊNCIA ÚTIL MÁXIMA DO AUTOMÓVEL 1.	79
FIGURA 44: GRÁFICO DA MÉDIA TRUNCADA DA POTÊNCIA ÚTIL MÁXIMA DO AUTOMÓVEL 1. .	79
FIGURA 45: GRÁFICO DA MÉDIA DA POTÊNCIA ÚTIL MÁXIMA DO AUTOMÓVEL 2.	80
FIGURA 46: GRÁFICO DA MÉDIA TRUNCADA DA POTÊNCIA ÚTIL MÁXIMA DO AUTOMÓVEL 2. .	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE SAÍDA E A ACELERAÇÃO.	37
TABELA 2 - CONFIGURAÇÃO DO ACELERÔMETRO.	45
TABELA 3 - SELEÇÃO DA FONTE DE RELÓGIO.	47
TABELA 4 - CONVERSÃO A/D.	50
TABELA 5 - OPÇÕES DE CONFIGURAÇÃO DO REGISTRADOR MCUCR.	56
TABELA 6 - BITS DE CONFIGURAÇÃO DO REGISTRADOR GICR.	56
TABELA 7 - BITS DE CONFIGURAÇÃO DO REGISTRADOR TCCR1A.	57
TABELA 8 - BITS DE CONFIGURAÇÃO DO REGISTRADOR TCCR1B.	58
TABELA 9 - OPÇÕES DE MODO DE OPERAÇÃO DO REGISTRADOR TCCR1B.	58
TABELA 10 - FONTE DE RELÓGIO DO TEMPORIZADOR.	59
TABELA 11 - BITS DE CONFIGURAÇÃO DO REGISTRADOR ADMUX.	60
TABELA 12 - OPÇÕES DE REFERÊNCIAS PARA O CONVERSOR A/D.	60
TABELA 13 - OPÇÕES DE CANAIS DE CONVERSÃO A/D.	61
TABELA 14 - BITS DE CONFIGURAÇÃO DO REGISTRADOR ADCSRA.	61
TABELA 15 - OPÇÕES DE <i>PRESCALER</i> DO CONVERSOR A/D.	62
TABELA 16 - TEMPO MEDIDO COM O CRONÔMETRO.	68
TABELA 17 - TEMPO MEDIDO COM O CRONÔMETRO.	69
TABELA 18 – DADOS DOS AUTOMÓVEIS.	71
TABELA 19 - TEMPO DE 0 – 100KM/H DO AUTOMÓVEL 1.	73
TABELA 20 - TEMPO DE 0 – 100KM/H AUTOMÓVEL 2.	74
TABELA 21 - TEMPO NOS 402M DO AUTOMÓVEL 1.	75
TABELA 22 - TEMPO NOS 402M DO AUTOMÓVEL 2.	76
TABELA 23 - POTÊNCIA ÚTIL MÁXIMA DO AUTOMÓVEL 1.	78
TABELA 24 - POTÊNCIA ÚTIL MÁXIMA DO AUTOMÓVEL 2.	79

LISTA DE SIGLAS

MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems*

NHRA – *Nacional Hot Rod Association*

CBA – Confederação Brasileira de Automobilismo

LCD – *Liquid Crystal Display*

MRUV – Movimento Retilíneo Uniformemente Variado

SI – Sistema Internacional de Unidades

GPS – *Global Positioning System*

RISC – *Reduced Instruction Set Computer*

INT0 – *Interrup 0*

MCUCR – *Microcontroller Control Unit Register*

GICR – *General Interrupt Control Register*

CTC – *Clear on Timer Compare*

LISTA DE SÍMBOLOS

m – metro

km/h – quilômetro por hora

g – aceleração da gravidade

m/s² – metro por segundo ao quadrado

m/s – metro por segundo

N – Newton

W – watt

cv – cavalo-vapor

α – proporcional a

μm – micrômetro

mm – milímetro

V – volts

μA – microampere

Hz – Hertz

MHz – megahertz

MIPS – milhões de instruções por segundo

bits – dígito binário

Kbytes – kilobytes

μF – microfarad

pF – picofarad

μs – microsegundo

ms – milissegundo

KHz – quilohertz

Kg – quilograma

m² – metro quadrado

hp – *horse power*

rpm – rotações por minuto

rph – rotações por hora

°C – graus Celsius

hPa – hectopascal

ρ – densidade do ar

kg/m³ – quilograma por metro cúbico

1. INTRODUÇÃO

O projeto consiste em um sistema composto por um *hardware* e um *software* utilizado para medir o desempenho de um automóvel. Desempenho de automóveis é um assunto que desperta o interesse de profissionais do ramo automobilístico como pilotos e preparadores de carros de competições, engenheiros automotivos e jornalistas de meios de comunicação especializados. Os dados de desempenho são ferramentas importantes para ajudar no desenvolvimento de veículos, fornecendo parâmetros de comparação para diferentes acertos de um mesmo carro ou para avaliar o desempenho de um carro em relação a outro.

A motivação deste trabalho é desenvolver um protótipo acadêmico que vai servir de base para um produto comercial de baixo custo (abaixo de R\$500,00), portátil (menos de 1kg), de fácil instalação (menos de 1 minuto) e que integre diversas funcionalidades em um único aparelho. O seu uso é voltado principalmente para modalidade do automobilismo *Drag Racing*, ou Arrancada, como ficou conhecida no Brasil. As competições de Arrancada tiveram seu início nos Estados Unidos na década de 50 com a NHRA (*Nacional Hot Rod Association*), associação que controla a categoria neste país e reúne mais de 35.000 competidores. No Brasil a Arrancada teve sua primeira expressão nos anos 80 sendo disputadas algumas provas no Autódromo de Interlagos em São Paulo, mas somente em 2002, com a homologação da categoria como uma modalidade do automobilismo pela a CBA (Confederação Brasileira de Automobilismo), o esporte passou a ter um campeonato

nacional de Arrancada, envolvendo dezoito Estados divididos em cinco campeonatos regionais (FORÇA LIVRE MOTORSPORT, 2007).

Para a análise de desempenho podem ser utilizados inúmeros parâmetros como tempo de aceleração, distância e tempo de frenagem, aceleração lateral, potência, consumo, dentre outros. Neste trabalho são adotados os seguintes parâmetros: o tempo gasto para sair do repouso e percorrer uma distância de 402m, distância referente ao padrão estabelecido pelos Estados Unidos de $\frac{1}{4}$ de milha utilizado nas competições de Arrancada; o tempo gasto para sair do repouso e atingir uma velocidade de 100km/h, padrão muito utilizado por fabricantes de automóveis e meios de comunicação especializados em veículos; e a potência útil, que seria a potência que efetivamente está sendo aproveitada para movimentar o automóvel, desconsiderando-se toda a potência dissipada devido a inércia do sistema de transmissão do veículo, ao atrito dos pneus com o solo e ao arrasto aerodinâmico.

Os equipamentos disponíveis no mercado para medição desses parâmetros são, em sua maioria, específicos e não concentram todas as funcionalidades em um único aparelho, fazendo-se necessária a aquisição de vários equipamentos elevando-se os custos. A seguir são apresentadas as principais características de alguns destes equipamentos.

Para a medição do tempo nas competições de Arrancada são utilizados cronômetros que utilizam sensores de fotocélulas. A sua instalação necessita que dois sensores sejam posicionados no início da marcação, marco zero, e outros dois sensores a 402m de distância. Para tanto, é necessário primeiro medir essa distância para posicionar os sensores, além da necessidade de vários metros de

cabos para ligar os sensores ao cronômetro. Na figura abaixo é mostrado um esquema de montagem de um cronômetro desse tipo (TAG HEUER, 2007).

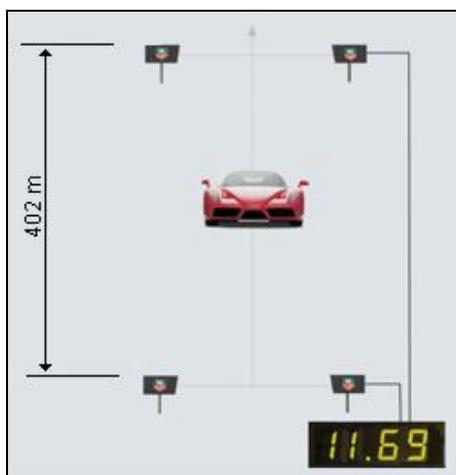


Figura 1: Cronômetro de fotocélula.

Os equipamentos para ensaios veiculares são muito utilizados pelos fabricantes de automóveis e pela mídia especializada para medir a velocidade, distância de frenagem, dentre outros parâmetros. A sua instalação é externa ao veículo e depende de um sistema de fixação dos sensores óticos que devem ser ajustado para cada carro, conforme ilustração abaixo, demandando certo tempo para sua correta instalação e calibração (CORRSYS-DATRON, 2007).



Figura 2: Sistema para ensaios veiculares.

A potência medida pelos fabricantes de automóveis é medida com um dinamômetro de bancada (figura 3), em que é necessário o motor estar fora do veículo e sem o seu sistema de transmissão, o volante do motor é ligado diretamente ao dinamômetro. Essa medida de potência desconsidera todas as forças resistentes ao deslocamento e não reflete as condições de uso do motor montado no automóvel. Para sua instalação é necessária uma sala exclusiva para acomodar todo o sistema e prender o dinamômetro ao chão. Também são necessários suportes específicos para fixação de cada motor (FROUDE HOFMANN, 2007).

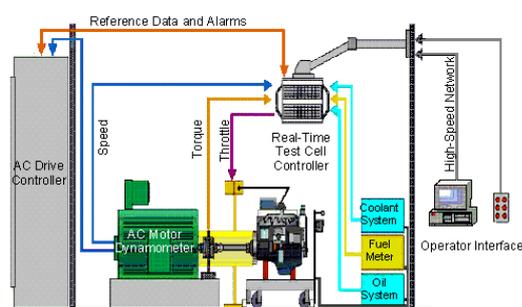


Figura 3: Dinamômetro de bancada.

Outro tipo de dinamômetro muito utilizado é o dinamômetro de chassis ou dinamômetro de rolo. Neste tipo de dinamômetro o motor está montado no veículo com todo o sistema de transmissão, mas não considera a perda de potência devido ao arraste aerodinâmico. Ele geralmente é instalado em um buraco no chão, ficando somente parte do rolo para fora (figura 4). O rolo utilizado nesse tipo de dinamômetro geralmente pesa mais de três toneladas (FROUDE HOFMANN, 2007).

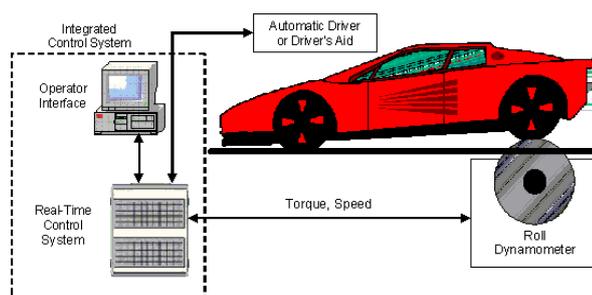


Figura 4: Dinamômetro de rolo.

A principal característica de implementação do projeto é o uso de um acelerômetro MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) para fornecer os dados de aceleração instantânea do automóvel. Esses dados são coletados por um microcontrolador e os parâmetros de desempenho são exibidos em uma tela de LCD (*Liquid Crystal Display*).

A monografia está estruturada da seguinte maneira. No capítulo 2 são tratados os aspectos físicos e discutidos os conceitos de cinemática e dinâmica utilizados para calcular a velocidade do veículo, distância percorrida e potência útil, assim como uma abordagem da Lei de Hooke utilizada no funcionamento do acelerômetro. Posteriormente, no capítulo 3, é feita uma breve explicação sobre a tecnologia MEMS e mostrados os princípios do funcionamento de um acelerômetro MEMS. O capítulo 4 trata da visão geral do projeto, descrevendo os principais microcomponentes utilizados e suas funções. No capítulo 5 é mostrada a implementação do *hardware* e do *software*, discutindo todos os aspectos necessários para o funcionamento do protótipo. O capítulo 6 analisa os resultados obtidos, descrevendo as etapas para validação dos dados. Por fim, no capítulo 7 é apresentada a conclusão do trabalho, abordando os objetivos definidos na introdução, assim como as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento e propostas para desenvolvimentos futuros.

2. ANÁLISE FÍSICA

As variáveis aceleração, tempo e massa são utilizadas para a implementação do protótipo a que se propõe este trabalho e desempenham papéis importantes nos cálculos dos parâmetros de desempenho definidos.

Este capítulo apresenta a base física necessária para o desenvolvimento do trabalho definindo alguns conceitos físicos de cinemática e dinâmica, utilizados no desenvolvimento do *software* do protótipo.

2.1. Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV)

O movimento retilíneo chama-se uniformemente variado quando a aceleração instantânea é constante e a sua trajetória descreve uma linha reta. Sendo a aceleração instantânea constante, esta faz variar a velocidade do objeto. Se a velocidade aumenta com o tempo, o movimento é dito uniformemente acelerado e caso a velocidade diminua com o tempo, o movimento é uniformemente retardado (NUSSENZVEIG, 2002).

Não é intuitivo enxergar o movimento descrito por um automóvel como sendo uniformemente variado já que a sua aceleração geralmente não é constante

durante o seu deslocamento. Entretanto, se for considerado um intervalo de tempo pequeno, é possível considerar a aceleração como sendo constante. Desta maneira, um intervalo de tempo grande é dividido em sucessivas medições com intervalos de tempo menores e em cada desses intervalos o movimento pode ser considerada um MRUV.

2.1.1. Aceleração

A aceleração é o conceito mais importante para o desenvolvimento deste projeto, uma vez que é utilizado no cálculo da velocidade atingida pelo automóvel, distância percorrida e potência útil, componentes dos parâmetros definidos de análise do desempenho.

A noção do conceito de aceleração é intuitiva e muito utilizada no dia a dia. Um exemplo disso é a aceleração de um automóvel: é intuitivo analisar que quando um automóvel entra em movimento e aumenta a sua velocidade, isto é um efeito da aceleração. Assim, a aceleração pode ser definida como uma medida da rapidez de variação da velocidade com o passar do tempo.

Seja a variação de velocidade Δv em um intervalo de tempo $[t, t_0]$, pode-se definir a aceleração média por:

$$\bar{a} \equiv \frac{v(t) - v(t_0)}{t - t_0} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Considerando sempre que o instante de tempo final é maior que o instante de tempo inicial, observa-se uma aceleração média positiva quando a velocidade aumenta no intervalo de tempo e negativa quando a velocidade diminui. Se $v > 0$, v cresce ou decresce conforme $|v|$ cresça ou decresça, mas se $v < 0$, v cresce quando $|v|$ decresce. Voltando ao exemplo do automóvel, tem-se em marcha à frente uma aceleração negativa quando o automóvel está freando, já em marcha à ré frear corresponde a uma aceleração positiva.

A aceleração medida pelo acelerômetro MEMS é expressa pela aceleração que a força da gravidade da Terra exerce em um corpo ao nível do mar (g). No SI (Sistema Internacional de Unidades) a aceleração é expressa por m/s^2 (metros por segundo ao quadrado). Para conversão de unidades tem-se que 1g equivale a $9,80665 \text{ m/s}^2$ (ANALOG DEVICES, 2007).

2.1.2. Velocidade

A velocidade é utilizada no *software* como critério de parada para se medir o tempo gasto ao sair do repouso e atingir uma velocidade de 100km/h e também é utilizada no cálculo da distância.

A determinação da função da velocidade de um MRUV pode ser feita calculando-se a área sob o gráfico da aceleração em um intervalo de tempo $[t_0, t]$, em que t_0 é o instante inicial:

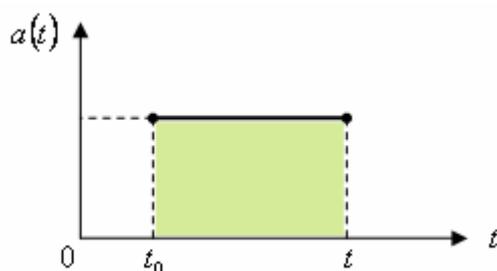


Figura 5: Gráfico aceleração pelo tempo.

$$v(t) - v(t_0) = \int_{t_0}^t a(t') dt' = a(t - t_0) \quad (2.2)$$

Dado que $v(t_0) = v_0$ e $(t - t_0) = \Delta t$, a função da velocidade pode ser escrita como:

$$v(t) = v_0 + a\Delta t \quad (2.3)$$

A unidade de velocidade no SI é m/s (metro por segundo), mas para o projeto será utilizada a unidade km/h (quilômetro por hora), pois esta unidade é mais usual na medição de velocidade de automóveis. Para conversão de unidades tem-se que 1m/s é equivalente a 3,6km/h.

2.1.3. Distância

A distância é utilizada no *software* como critério de parada para medir o tempo gasto ao sair do repouso e percorrer uma distância de 402m.

A partir da função da velocidade pode-se determinar a função horária dos espaços calculando-se a área sob o gráfico da função velocidade entre dois instantes de tempo $[t_0, t]$:

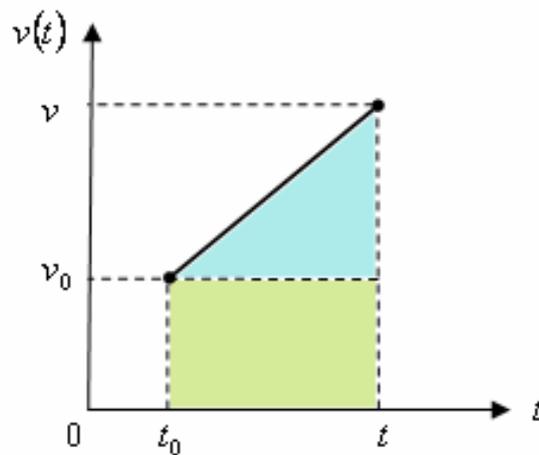


Figura 6: Gráfico velocidade pelo tempo.

$$x(t) - x(t_0) = \int_{t_0}^t v(t') dt' = \int_{t_0}^t (v_0 + a(t' - t_0)) dt' = v_0(t - t_0) + \frac{1}{2} a(t - t_0)^2 \quad (2.4)$$

Analogamente define-se $x(t_0) = x_0$ como a posição inicial e $(t - t_0) = \Delta t$.

Chega-se então à função horária do movimento retilíneo uniformemente variável:

$$x(t) = x_0 + v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (2.5)$$

A unidade de distância no SI e adotada para o projeto é o metro (m).

2.2. Segunda Lei de Newton

A abordagem deste conceito é importante para a definição de potência, vista a seguir, e para entender do funcionamento do acelerômetro MEMS que será tratado no próximo capítulo.

A Segunda Lei de Newton diz que quando uma força resultante externa atua sobre um corpo a sua velocidade em relação a um referencial inercial varia, ou seja, existe uma aceleração do corpo causada pela ação de forças. A aceleração possui a mesma direção e o mesmo sentido da força resultante e o vetor força resultante é igual ao produto da massa do corpo pelo vetor aceleração do corpo (YOUNG; FREEMAN, 2003). Ela pode ser expressa matematicamente como:

$$\vec{F}_R = m\vec{a} \quad (2.6)$$

A Segunda Lei de Newton trata dos casos em que a resultante das forças que atuam em um corpo não é nula. Se a resultante das forças atuantes sobre um corpo não é nula, ele sofrerá a ação de uma aceleração inversamente proporcional à sua massa. Pode-se concluir que toda vez em que sobre um corpo atuar uma resultante de forças não-nula, este corpo ficará sujeito à ação de uma aceleração. Esta aceleração será maior quando um corpo tiver uma massa menor e menor se o corpo possuir uma massa menor.

Qualquer variação de velocidade de um corpo em relação a um referencial inercial, ou seja, qualquer aceleração deve estar associada à ação de forças.

A unidade de força no SI é o Newton (N).

2.3. Potência

O conceito de potência está diretamente relacionado com o parâmetro de análise do desempenho potência útil do automóvel.

A definição de potência está relacionada com a taxa temporal com que uma força resultante realiza um trabalho. Em outras palavras, é o trabalho ΔW realizado dentro de um intervalo de tempo Δt (YOUNG; FREEMAN, 2003). Pode-se definir potência média como sendo:

$$\bar{P} \equiv \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Sendo trabalho definido como $\Delta W \equiv F\Delta s$ e a velocidade média $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, a potência média pode ser calculada por:

$$\bar{P} = F\bar{v} \quad (2.8)$$

A potência instantânea é o limite da potência média quando $\Delta t \rightarrow 0$, conseqüentemente:

$$P = Fv \quad (2.9)$$

A potência aqui descrita é a potência útil do automóvel, a potência que efetivamente é transformada em trabalho. Todas as forças resistentes ao deslocamento não precisam ser consideradas, uma vez que a aceleração medida pelo acelerômetro é proveniente da resultante das forças que fazem com que o automóvel movimente-se.

A unidade de potência no SI é o watt (W), mas para o projeto será utilizada a unidade cavalo-vapor (cv), pois esta unidade é mais usual na medição de potência de automóveis. Para conversão de unidades temos que 1cv é equivalente a 735,49875W.

2.4. Lei de Hooke

Este conceito é apresentado para entender o funcionamento do acelerômetro MEMS, que será tratado no próximo capítulo.

A Lei de Hooke diz que a força associada a uma mola ideal é proporcional a sua deformação. Para melhor entender o significado desse enunciado, seja um sistema mecânico constituído de um corpo de prova e uma mola ideal:

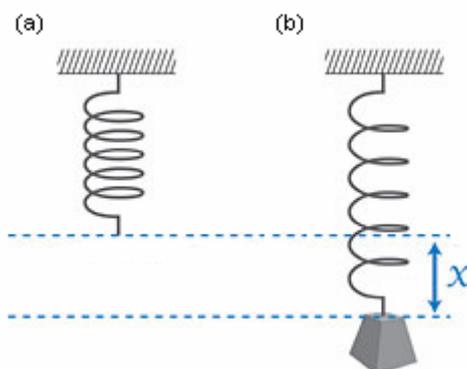


Figura 7: Lei de Hooke.

Na figura 7(a) é mostrada uma situação de equilíbrio em que a mola está presa a um ponto fixo e em repouso. Adicionando um corpo de massa " m ", figura 3(b), preso na outra extremidade da mola observa-se uma deformação da mola. Esta deformação é devida à atração gravitacional da Terra, que gera uma força puxando o sistema massa-mola para baixo. Para se opor a esta força gravitacional existe a ação de uma força restauradora. Esta força é proveniente da constante

elástica da mola “ k ”, que tende a deslocar o sistema para a posição de equilíbrio (YOUNG; FREEMAN, 2003). A força restauradora é dada por:

$$\vec{F}_e = -k\vec{x} \quad (2.10)$$

A força restauradora é proporcional ao deslocamento “ x ” da mola ou seja, quanto maior for o deslocamento da mola maior vai ser a força elástica atuando sobre o sistema massa-mola.

No acelerômetro MEMS a mola sofre apenas pequenas deformações e dentro dessas condições pode-se considerar a mola real do acelerômetro como sendo uma mola ideal.

3. ACELERÔMETRO MEMS



Figura 8: Acelerômetro MEMS.

Os acelerômetros MEMS vêm sendo produzidos há mais de 15 anos pela empresa Analog Devices. Primeiramente foram utilizados pela indústria automotiva na fabricação de *airbags*, oferecendo uma solução altamente integrada de sensores pequenos e robustos em um único chip, tornando os *airbags* menores, mais baratos e mais eficientes. Entretanto, o seu uso não é restrito a fabricação de *airbags*. Existem acelerômetros de baixa aceleração, entre 1g e 20g, ou de alta aceleração, entre 20g e 100g, com um, dois ou três eixos para as mais diversas aplicações (ANALOG DEVICES, 2007), dentre as quais se destacam as seguintes:

- Medição inercial de velocidade e posição. Exemplos: sistemas de posicionamento global veiculares, GPS (*Global Positioning Systems*), e controles de videogames sensíveis ao movimento do usuário como o console Wii da Nintendo;
- Medição de vibração e choque. Exemplos: sensores de abalos sísmicos, detecção de choques em discos rígidos de equipamentos portáteis e *airbags*;

- Medição da gravidade para determinação de orientação. Exemplos: celulares como o iPhone da Apple e sistemas de orientação de robôs.

3.1. Tecnologia MEMS

A tecnologia MEMS é a integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores e dispositivos eletrônicos em micromáquinas extremamente pequenas que geralmente variam de um $1\mu\text{m}$ até um 1mm de tamanho (MEMS AND NANOTECHNOLOGY CLEARINGHOUSE, 2007). Na figura 9 é mostrada a proporção do tamanho das micromáquinas em relação a um ácaro.

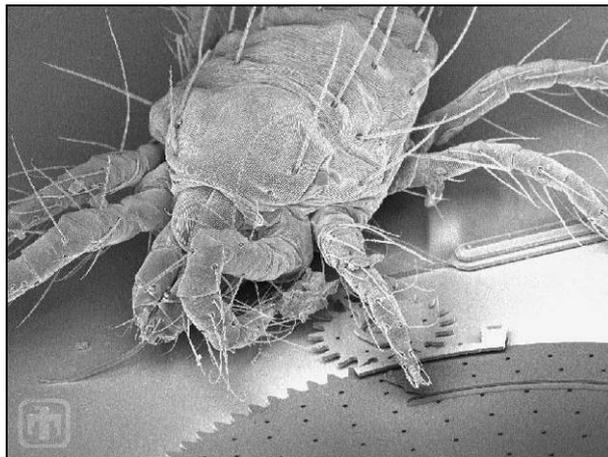


Figura 9: Ácaro em cima de um dispositivo MEMS.

O material mais utilizado para produção das micromáquinas é o silício, pois em sua forma de cristal simples apresenta pouca histerese quando flexionado e

praticamente nenhuma dissipação de energia. Também é um material altamente receptivo a movimentos repetitivos, sofrendo pouca fadiga e suportando bilhões de ciclos sem quebrar (ANALOG DEVICES, 2007).

A fabricação de micromáquinas pode ser feita por processos de subtração de material, em que substâncias químicas reagem com o substrato para dar a forma desejada, ou adição, em que camadas são adicionadas sucessivamente com diferentes combinações de materiais.

3.2. Funcionamento

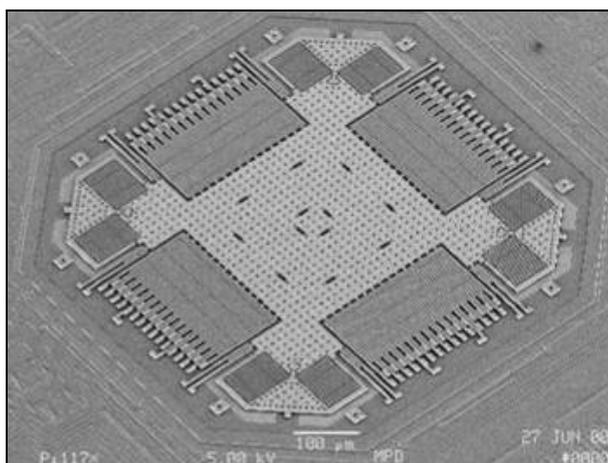


Figura 10: Acelerômetro em escala de 100 μm .

O funcionamento de um acelerômetro MEMS é baseado em um sistema massa-mola e obedece à Lei de Hooke (seção 2.3). Também é utilizado o conceito

da Segunda Lei de Newton (seção 2.2) para descrever a força agindo sobre a massa em aceleração.

O corpo de massa é uma estrutura de silício e seu movimento é controlado por molas de polisilício. Na construção do sistema massa-mola pode-se controlar a constante de elasticidade da mola “ k ” e a massa “ m ” do corpo de prova. Reduzir a constante da mola parece ser uma maneira fácil para aumentar a sensibilidade do corpo, mas a frequência de ressonância do corpo é proporcional a essa constante e o acelerômetro deve operar em frequências abaixo da frequência de ressonância. Além disso, constantes de mola altas fazem com que o acelerômetro seja mais resistente a choques. Portanto, é necessário manter o valor da constante da mola o mais alto possível para dar maior robustez ao sistema e utilizar molas duplas em cada canto do corpo de prova (figura 11) para minimizar a interferência da aceleração de um eixo em outro. Essa configuração de molas foi testada com acelerações de mais de 250g por mais de 7×10^{10} ciclos de repetição sem apresentar qualquer falha (ANALOG DEVICES, 2007).

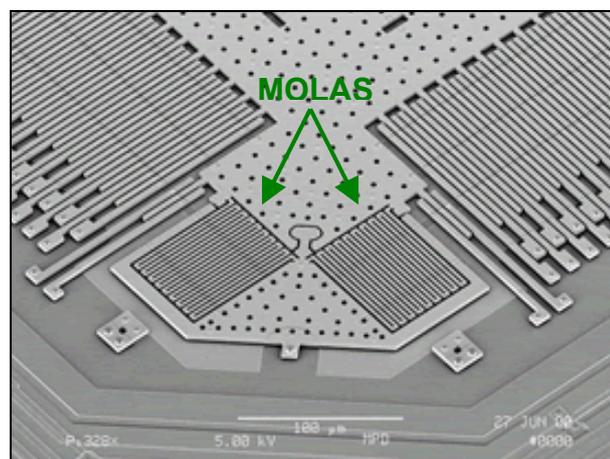


Figura 11: Sistema de molas duplas.

Quando o sistema é exposto a uma aceleração ou desaceleração, pela Segunda Lei de Newton, existe uma força resultante igual à massa multiplicada pela aceleração. Essa força faz com que o corpo de massa comprima ou expanda o sistema de molas. Relacionando-se os dois princípios pode-se calcular o módulo da aceleração:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_e \quad (3.1)$$

$$ma = kx \quad (3.2)$$

$$a = \frac{kx}{m} \quad (3.3)$$

No sistema proposto os valores da constante de elasticidade “ k ” da mola e a massa “ m ” do corpo de prova são constantes. Desta forma, pode-se inferir que a aceleração é diretamente proporcional (\propto) ao deslocamento “ x ”:

$$a \propto x \quad (3.4)$$

O corpo de prova é formado de diversos prolongamentos em forma de dedos que podem ser visualizados nas laterais da figura 11. Esses prolongamentos que constituem o sistema para medir o deslocamento do corpo de prova são as placas paralelas de capacitores. Como cada capacitor individual é muito pequeno e gera pouca capacitância, são utilizados diversos capacitores ao longo de todo o corpo de prova.

Capacitores são componentes formados por dois condutores elétricos (as placas) separados por um material isolante (dielétrico). A capacitância de um capacitor plano de placas paralelas é proporcional a permissividade do dielétrico e a área da superfície das placas e inversamente proporcional a distância entre as placas (MALVINO, 1995).

$$C = \frac{\epsilon A}{x} \quad (3.5)$$

Analogamente ao sistema massa-mola, a permissividade do dielétrico “ ϵ ” e a área da superfície das placas “ A ” têm valores constantes. Desta forma, pode-se inferir que:

$$C \propto \frac{1}{x} \quad (3.6)$$

A capacitância também pode ser definida como sendo proporcional à carga elétrica armazenada nas placas do capacitor “ q ” e inversamente proporcional a diferença de potencial entre as placas ou tensão elétrica “ V ”:

$$C = \frac{q}{V} \quad (3.7)$$

Desta forma, a partir da relação de proporcionalidade (3.6) e da equação (3.7) tem-se que:

$$V \propto x \quad (3.8)$$

Portanto, da relação das equações (3.4) e (3.6) observa-se que o fator comum entre elas é o deslocamento “ x ”. Desta forma, conclui-se que:

$$a \propto V \quad (3.9)$$

Conforme será melhor abordado no próximo capítulo, o acelerômetro MEMS tem como saída um sinal analógico, que é uma tensão em volts (V), proporcional à aceleração medida.

A partir das equações (3.3), (3.5) pode-se achar a equação para o deslocamento “ x ” medido em função da variação da capacitância, equação (3.10), que por sua vez é utilizada junto com a equação (3.7) para o cálculo da aceleração, equação (3.11).

$$x = \frac{\varepsilon AV}{q} \quad (3.10)$$

$$a = V \left(\frac{k\varepsilon A}{qm} \right) \quad (3.11)$$

4. VISÃO GERAL DO PROJETO

Este capítulo trata da descrição geral do projeto e sua divisão em três etapas de funcionamento conforme topologia apresentada abaixo:

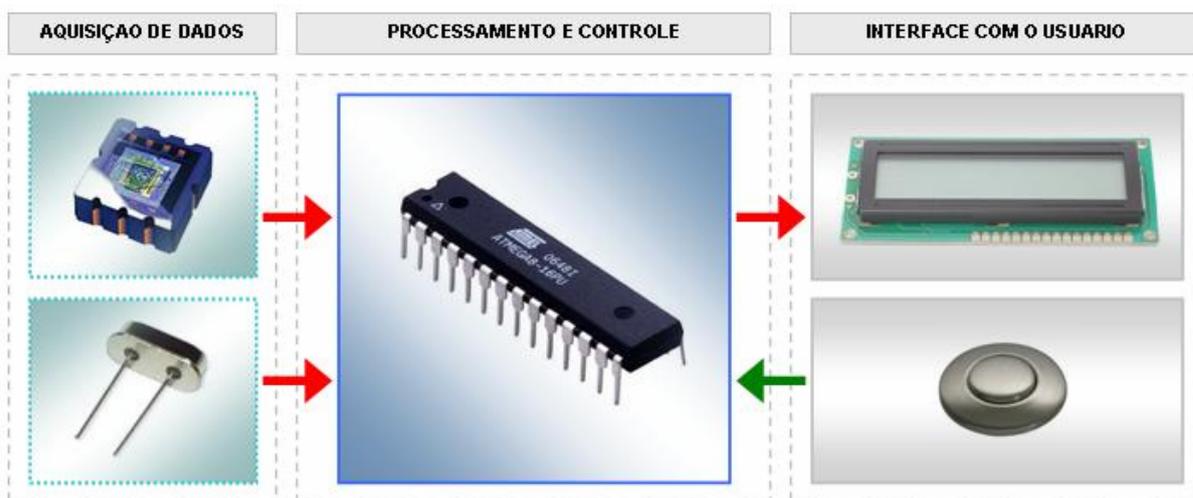


Figura 12: Topologia do projeto.

4.1. Aquisição de dados

Um acelerômetro é utilizado para aquisição da aceleração dinâmica de um automóvel e uma fonte de relógio externa é utilizada para controlar a velocidade de execução do programa no microcontrolador.

4.1.1. Acelerômetro

Para medir a aceleração foi escolhido um acelerômetro MEMS modelo ADXL203E fabricado pela Analog Devices. Este acelerômetro é capaz de medir aceleração positiva e negativa em dois eixos (eixo X e eixo Y), medindo tanto aceleração estática (como a aceleração da gravidade), quanto aceleração dinâmica (como a aceleração do automóvel).

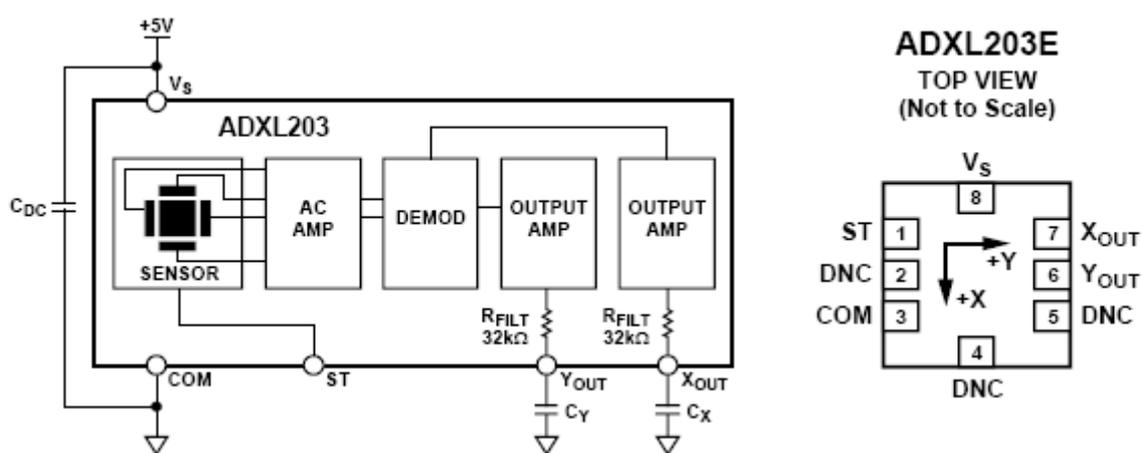


Figura 13: Diagrama de bloco ADXL203E.

A seguir são destacadas as principais características do acelerômetro ADXL203E:

- Medição da aceleração em dois eixos;
- Faixa de operação de -1,7g até +1,7g;
- Baixo consumo de energia. Consome somente 700μA a 5V;
- Resolução de 1×10^{-3} g a 60Hz;

- Sensibilidade de 1g para cada 1V;
- Alta resistência a impactos de até 3.500g;
- Tamanho reduzido com dimensões de 5mm × 5mm × 2mm.

Este modelo de acelerômetro tem como saída um sinal analógico com escala proporcional a aceleração da gravidade e uma aceleração de 0g equivale uma tensão de 2,5V. Como a sua sensibilidade é de 1g para cada 1V pode-se relacionar a tensão de saída com a aceleração da seguinte maneira:

Tabela 1 - Relação entre a tensão de saída e a aceleração.

Tensão	Aceleração
0,8V	-1,7g
1,5V	-1g
2,5V	0g
3,5V	+1g
4,2V	+1,7g

O acelerômetro deve ser posicionado na horizontal para que capte a aceleração dinâmica. Para tanto, a força da gravidade é utilizada na calibração do sistema. Com o carro parado a única aceleração medida é a aceleração estática, se o acelerômetro estiver nivelado na posição horizontal deverá marcar uma aceleração de 0g, caso contrário será marcado um valor de aceleração proporcional à inclinação do mesmo conforme mostrado na figura abaixo:

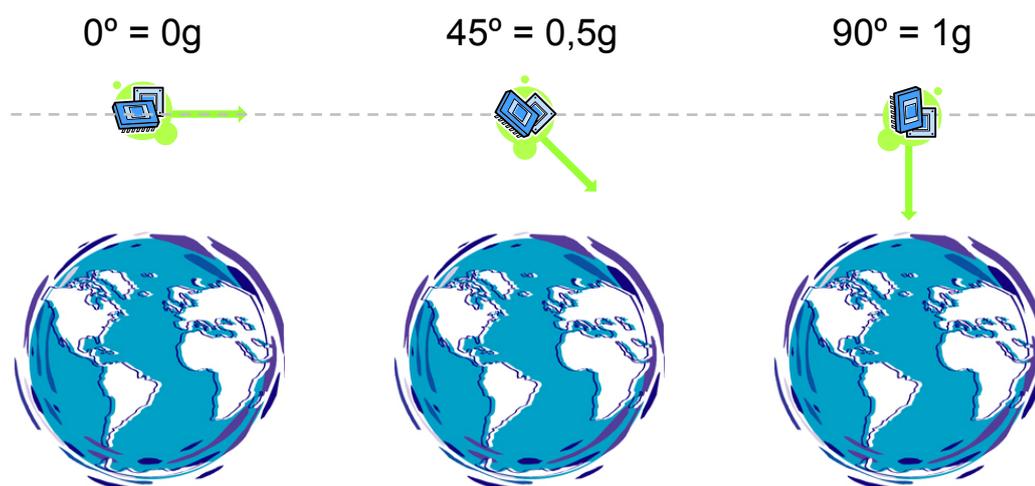


Figura 14: Aceleração estática.

4.1.2. Fonte de relógio

O relógio define quando um microcontrolador vai processar uma instrução. Quanto mais rápido for a frequência do relógio, mais rápido será o processamento do microcontrolador, pois este poderá processar mais instruções por segundo.

O microcontrolador ATMEGA8-16PU (abordado mais a frente) possui um circuito oscilador RC interno, que é um circuito em resistor e capacitor que gera frequências padrões de 1MHz, 2MHz, 4MHz ou 8MHz a uma tensão de 5V e a uma temperatura de 25°C. Por se tratar de um circuito eletrônico, o circuito RC interno sofre variação em sua frequência de relógio quando a tensão ou temperatura variam além de sua precisão ser somente da ordem de 3% da frequência nominal (ATMEL, 2007). Outra deficiência do circuito RC interno é que a velocidade de processamento do microcontrolador fica limitada a no máximo 8 milhões de instruções por segundo

(MIPS). Com uma fonte de relógio externa o microcontrolador pode trabalhar a uma velocidade de até 16 MIPS.

No projeto é utilizado um cristal externo de 16MHz como fonte de relógio. A variação de frequência devido a uma variação de tensão ou temperatura no cristal é desprezível e sua precisão é da ordem de 0,05% da frequência nominal (ATMEL, 2007).

4.2. Processamento e controle

Para controle de todo o sistema é utilizado um microcontrolador responsável pela interação entre os dispositivos de aquisição de dados e a interface com o usuário. O microcontrolador também é responsável pelo processamento dos dados de acordo com o *software* escrito para ele.

4.2.1. Microcontrolador

O microcontrolador utilizado no projeto é o modelo ATMEGA8-16PU. Esse microcontrolador pertence à família AVR de 8bits do fabricante Atmel e destaca-se

pela sua alta performance, flexibilidade, baixo consumo de energia e baixo custo (ATMEL, 2007).

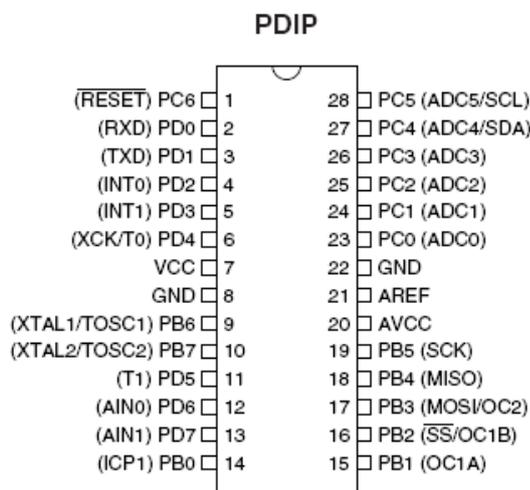


Figura 15: Microcontrolador ATMEGA8.

O ATMEGA8 tem um núcleo RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) que executa uma instrução por ciclo de relógio devido à conexão direta de seus 32 registradores de uso geral com a unidade lógica aritmética. Além disso, o microcontrolador AVR possui 130 instruções, uma grande variedade de instruções que beneficiam a programação de alto nível como a linguagem C (considerada de alto nível em relação a linguagem Assembly). Esse benefício também é verificado na conversão do código em C para Assembly retornando um código mais compacto fazendo com que o mínimo de instruções e ciclos de relógio sejam necessários para executar uma determinada tarefa, dessa forma aumentando a sua eficiência e reduzindo significativamente o consumo de energia (BORGES et al, 2006).

A sua estrutura flexível faz com que a necessidade de componentes externos se torne bastante reduzida integrando em um único dispositivo:

- Trinta e dois registradores de uso geral;
- Memória flash de 8Kbytes;
- Memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) de 512bytes;
- Memória SRAM (*Static Random Access Memory*) de 1Kbyte;
- Seis canais de conversão A/D (Analogico/Digital) com 10bits de precisão;
- Três canais PWM (*Pulse Width-Modulation*);
- Contador em tempo real com oscilador separado;
- *Watchdog timer* programável com oscilador separado;
- Dois *timer/counters* com *prescaler* separado, modo de comparação;
- Um *timer/counters* com *prescaler* separado, modo de comparação e modo de captura.

Os microcontroladores AVR possuem uma estrutura de máquina interna do tipo Harvard, em que existem barramentos internos separados para dados e instruções, permitindo que enquanto uma instrução esteja sendo executada, outra já esteja sendo buscada na memória do programa para execução no próximo ciclo de relógio.

4.3. Interface com o usuário

A interface com o usuário é feita por meio de uma tela de LCD para mostrar a execução do programa e com um botão de interrupção para enviar comandos ao microcontrolador.

4.3.1. Tela de LCD

A tela de LCD utilizada é baseada no controlador modelo HD44780A00 da Hitachi. Este LCD possui uma comunicação paralela e mostra duas linhas com dezesseis caracteres cada (HITACHI, 1999).

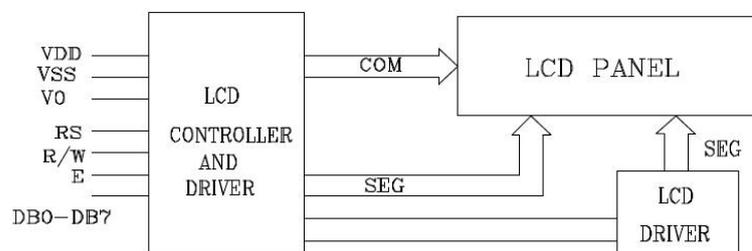


Figura 16: Diagrama de bloco da tela de LCD.

4.3.2. *Botão de interrupção*

Um botão é utilizado para disparar interrupções externas, enviando os comandos do usuário ao microcontrolador.

5. IMPLEMENTAÇÃO

A implementação deste trabalho engloba a disciplina engenharia eletrônica aplicada no projeto e montagem de um protótipo (*hardware*) e a disciplina ciência da computação aplicada na programação de um microcontrolador (*software*) para controle do equipamento utilizando a linguagem de programação C.

5.1. Hardware

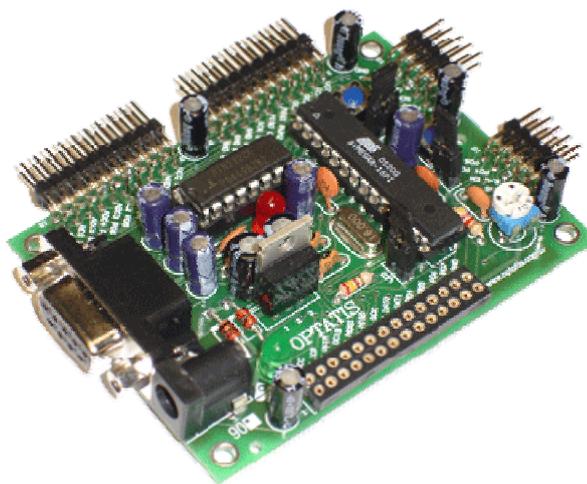


Figura 17: Kit de desenvolvimento.

O protótipo foi desenvolvido com o auxílio de um kit para desenvolvimento modelo OP_KMAVR103 do fabricante Optatis (figura 17). Esta placa oferece

conexão via porta paralela com um computador para leitura e gravação de microcontroladores AVR, além de oferecer um botão para disparo de interrupções externas, um cristal externo de 16MHz e circuito para estabilização da tensão em 5V. Todos os pinos do microcontrolador estão ligados a terminais de conexão rápida, tornando mais fácil a realização dos testes na fase de desenvolvimento do protótipo (OPTATIS, 2007).

5.1.1. Acelerômetro

Para o funcionamento do acelerômetro ADXL203E é necessária a adição de um capacitor em cada uma das saídas de seus dois eixos. Esse capacitor tem a função de um filtro passa baixa, regulando o nível de ruído e definindo a frequência de amostragem, conforme a tabela abaixo:

Tabela 2 - Configuração do acelerômetro.

Frequência (Hz)	Capacitor (μ F)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

Para o projeto foi adicionado um capacitor de $0,1\mu$ F, desta forma delimitando a frequência a uma largura de banda de 50Hz. A taxa de amostragem de 50

medições por segundo foi selecionada por fornecer leituras rápidas o suficiente da aceleração do veículo sem comprometer a resolução do acelerômetro devido a ruídos, mantendo-se em $1 \times 10^{-3} \text{g}$ (ANALOG DEVICES, 2007). Abaixo é mostrado o circuito do acelerômetro:

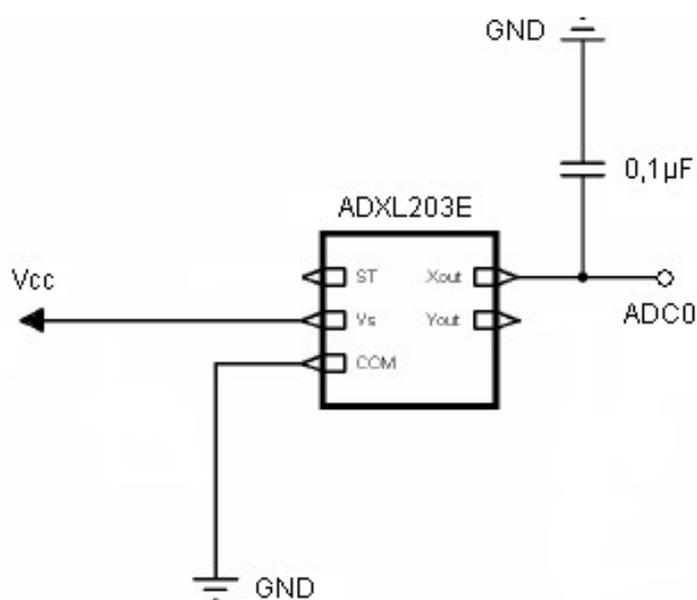


Figura 18: Circuito do acelerômetro ADXL203E.

5.1.2. Microcontrolador

O microcontrolador ATMEGA8 possui algumas de suas configurações de *hardware* que não podem ser alteradas pelo *software* e devem ser definidas diretamente pela alteração de registros de configuração. São registros de proteção de código e dados (*Lock Bit Byte*), fusíveis de configuração (*Fuse High Byte* e *Fuse*

Low Byte), bytes de assinatura do dispositivo e byte de calibração do oscilador interno. Destes registros, um dos mais usados é o *Fuse Low Byte*, pois determina principalmente a principal fonte de relógio da CPU (ATMEL, 2007).

5.1.2.1. Seleção da fonte de relógio

O registro responsável pela configuração da fonte de relógio é o registro *Fuse Low Byte*. Para a sua configuração é necessário inserir os bits de identificação de cada tipo de fonte, conforme tabela abaixo:

Tabela 3 - Seleção da fonte de relógio.

OPÇÕES DE RELÓGIO DO DISPOSITIVO	CKSEL3..0
Cristal Externo/Ressonador Cerâmico	1111 – 1010
Cristal Externo de Baixa Frequência	1001
Oscilador RC Externo	1000 – 0101
Oscilador RC Interno Calibrado	0100 – 0001
Relógio Externo	0000

A alteração desse registro é feita com o auxílio do programa AVRDUde selecionando a opção para escrita do registro com o número hexadecimal 0xEF, referente ao bit 1111. Com esta configuração o microcontrolador passa a utilizar o cristal externo como fonte de relógio.

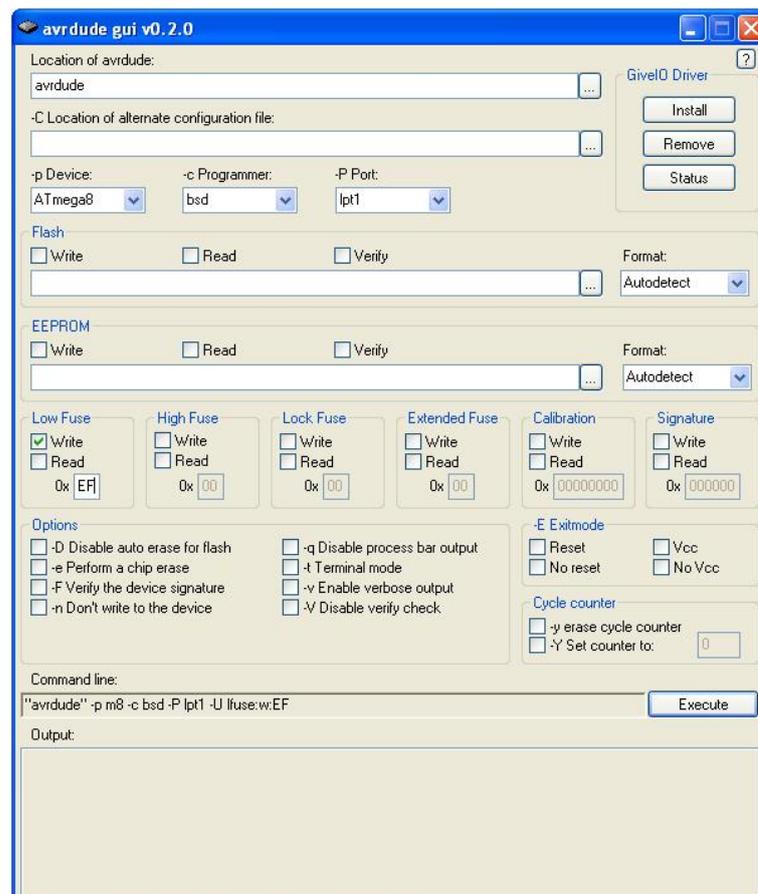


Figura 19: Configuração da fonte de relógio.

A conexão do cristal externo é feita ligando-se cada um dos dois pinos do cristal aos pinos XTAL1 e XTAL2 do microcontrolador (figura 20). Para redução da interferência eletromagnética é implementado um filtro de ruído com dois capacitores iguais de 22pF, conforme especificação do fabricante (ATMEL, 2007).

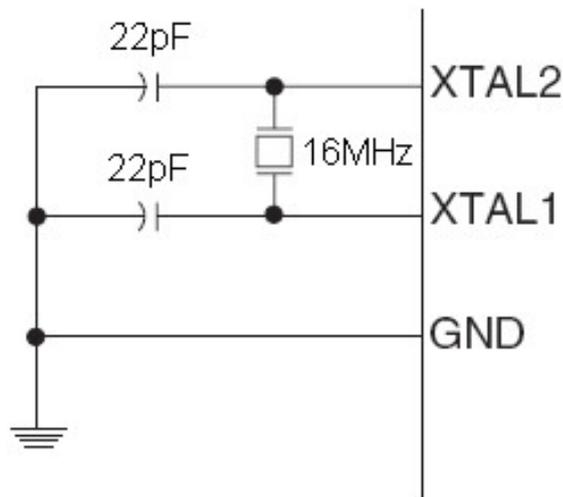


Figura 20: Circuito de ligação do cristal externo.

5.1.2.2. Conversão A/D

Como o sinal emitido pelo acelerômetro ADXL203E é uma variação de tensão de 0V até 5V, ou seja, é um sinal de natureza analógica, para que este sinal possa ser compreendido pelo microcontrolador é necessária a sua conversão para seus correspondentes digitais. Para tanto, é necessária a utilização de um conversor analógico/digital, ou conversor A/D.

O ATMEGA8 possui seis diferentes canais de conversão A/D com resolução de 10bits e um circuito *sample and hold* para garantir a tensão de entrada no conversor esteja em um nível constante durante a conversão, além de promover certo nível de proteção contra picos de tensão fora das especificações de trabalho (ATMEL, 2007).

O conversor A/D converte uma tensão de entrada para um valor digital de 10bits por meio de sucessivas aproximações (ATMEL, 2007). O valor mínimo representa uma tensão de 0V, ou GND, e o valor máximo representa a tensão configurada como referência do conversor, no caso 5V. A referência do conversor é configurada conectando uma fonte externa de tensão no pino AREF do microcontrolador. Como o sinal do acelerômetro varia de 0V a 5V, é ligada uma tensão de 5V no pino AREF.

Uma resolução de 10bits significa que o conversor possui 1.024 ($10\text{bits} = 2^{10} = 1024$) subdivisões para fazer a aproximação do equivalente binário. Para exemplificar o seu funcionamento são apresentados alguns valores analógicos e seus equivalentes binários na tabela abaixo.

Tabela 4 - Conversão A/D.

TENSÃO	SUBDIVISÃO	BINÁRIO
0V	0	0
2,5V	511	111111111
5V	1023	1111111111

5.1.3. Circuito de alimentação

A alimentação do protótipo é feita por uma bateria de 9V. Entretanto, os componentes como o microcontrolador, acelerômetro e display de LCD precisam de uma fonte com tensão de 5V. Para fornecer uma fonte com a tensão correta é

utilizado um circuito (figura 21) com um regulador de tensão padrão 7805. Este regulador de tensão funciona em conjunto com dois capacitores, um $0,33\mu\text{F}$ na entrada e outro de $0,1\mu\text{F}$ na saída conforme recomendação do fabricante. A tensão de entrada pode ser de 7V até 25V e a saída sempre retorna uma tensão de 5V (TEXAS INSTRUMENTS, 2003).

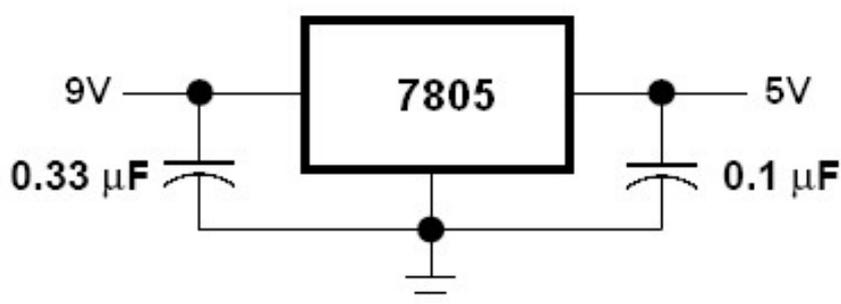


Figura 21: Circuito de alimentação.

5.2. Software

Na programação do microcontrolador ATMEGA8 foi utilizado o pacote de programas WinAVR versão 20070525. Este pacote possui todas as ferramentas necessárias para desenvolvimento em microcontroladores AVR, como compilador para a linguagem de programação C que converte o programa para a linguagem de programação de baixo nível Assembly, e também possui ferramenta para gravação e leitura do microcontrolador.

5.2.1. Funcionalidades implementadas

O funcionamento do protótipo baseia-se em somente três variáveis que são o tempo, a aceleração e a massa. O tempo é registrado pelo microcontrolador ATMEGA8 com o sinal proveniente do cristal de 16MHz, a aceleração é fornecida pelo acelerômetro ADXL203E e a massa é fornecida pelo próprio usuário ao sistema. A combinação dessas variáveis possibilita o cálculo dos parâmetros de desempenho da seguinte maneira:

5.2.1.1. Tempo gasto para sair do repouso e atingir 100km/h

Para este parâmetro são necessárias as variáveis aceleração e tempo utilizadas para o cálculo da velocidade, definida em (2.2).

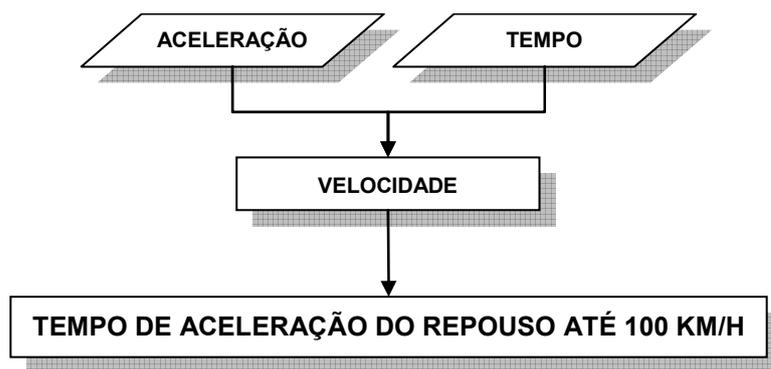


Figura 22: Fluxograma do tempo de 0 a 100km/h.

5.2.1.2. Tempo gasto para sair do repouso e percorrer 402m

Neste parâmetro são necessárias as variáveis aceleração e tempo utilizadas para o cálculo da velocidade. Com a velocidade, aceleração e o tempo calcula-se a distância percorrida, definida em (2.3).

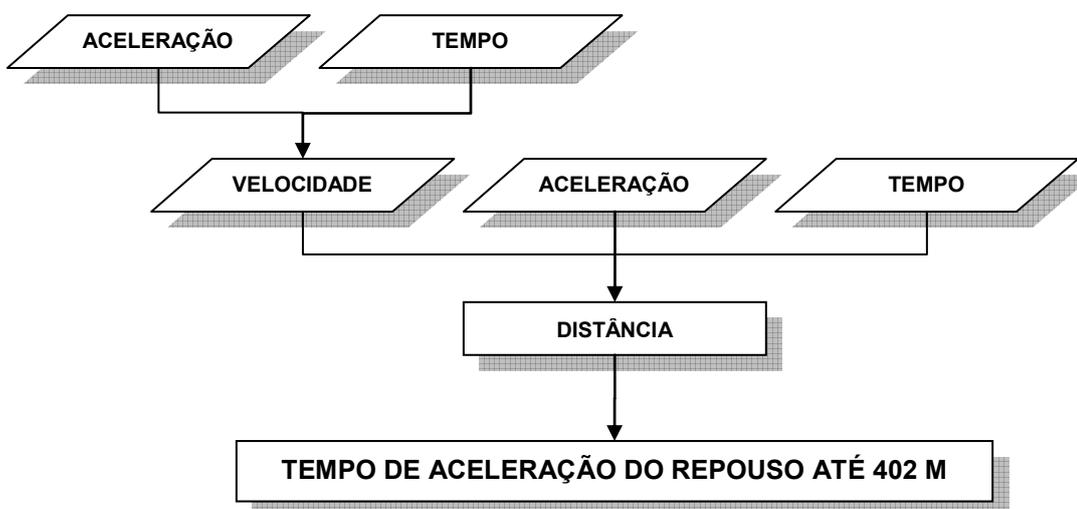


Figura 23: Fluxograma do tempo nos 402m.

5.2.1.3. Potência útil do automóvel

Novamente as variáveis aceleração e tempo são utilizadas para o cálculo da velocidade. A aceleração e massa do veículo são utilizadas para o cálculo da força. E com a velocidade e força pode-se calcular a potência útil, definida em (2.5).

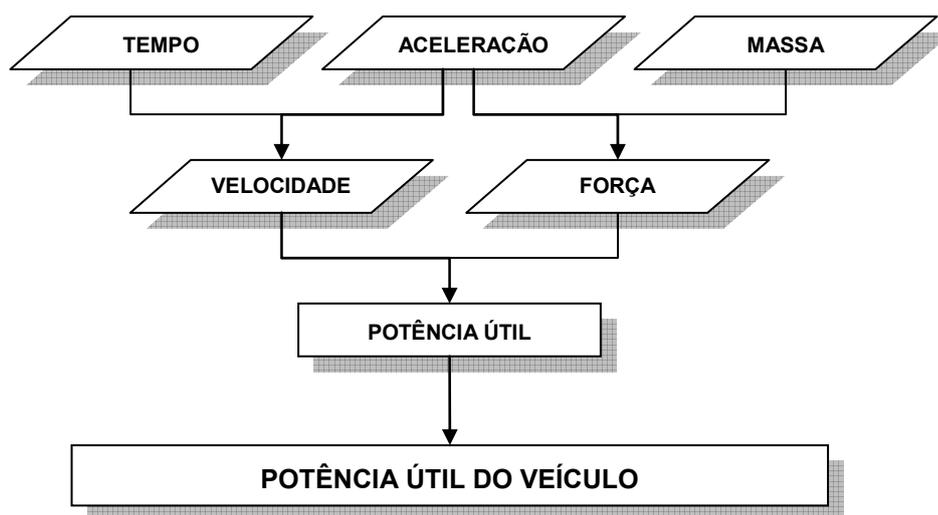


Figura 24: Fluxograma da potência útil.

5.2.2. Configuração do microcontrolador

5.2.2.1. Interrupções

Interrupções podem ser definidas como sendo desvios condicionais efetuados pelo programa em função da ocorrência de um fenômeno prioritário em um determinado instante. (BORGES et al, 2006).

Para o funcionamento da interrupção externa é necessário configurar a forma com que essa interrupção deve ser reconhecida. Na tabela 5 são mostradas as opções de configuração da interrupção INT0 (*Interrupt 0*), podendo ser acionadas quando ocorrer transição de subida ou de descida do sinal ou mesmo quando ele se mantém em nível baixo. O registrador MCUCR (*Microcontroller Control Unit Control Register*) é o responsável pela configuração do modo de ativação das interrupções e o registrador GICR (*General Interrupt Control Register*) é responsável pela habilitação da interrupção externa (tabela 6). Além da configuração de GICR é necessário o comando sei() para habilitar globalmente o uso de interrupções no microcontrolador (ATMEL, 2007).

Tabela 5 - Opções de configuração do registrador MCUCR.

ISC01	ISC00	Descrição
0	0	O nível baixo do INT0 gera a interrupção
0	1	Qualquer mudança lógica no INT0 gera a interrupção
1	0	A borda de descida do INT0 gera a interrupção
1	1	A borda de subida do INT0 gera a interrupção

Tabela 6 - Bits de configuração do registrador GICR.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	INT1	INT0	-	-	-	-	IVSEL	IVCE	GICR
Read/Write	R/W	R/W	R	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

No protótipo é utilizada a interrupção externa INT0 configurada para gerar uma interrupção com qualquer mudança lógica. Desta forma, os registradores GICR e MCUCR devem ser configurados por *software* com as seguintes linhas de comando:

```
GICR |= _BV(6);
MCUCR = 0x00;
MCUCR |= _BV(ISC01) | _BV(ISC00);
sei();
```

5.2.2.2. Contagem do tempo

O microcontrolador ATMEGA8 incorpora uma função especial de temporização chamada CTC (Clear on Timer Compare). O modo de operação CTC faz a comparação em hardware do valor de tempo atual com o valor desejado e

quando esse valor é alcançado é gravada uma *flag* em um registrador de status e então zerado o valor de tempo. Como se trata de uma implementação de *hardware*, o trabalho de programação torna-se muito mais simples, ainda mais quando o valor do temporizador é zerado automaticamente pelo sistema, o trabalho de programação é restrito a checar e apagar o registrador de *status* (ATMEL, 2007).

O registrador OCR1A é utilizado para manipular a resolução do contador. No modo CTC o contador é zerado quando o valor do contador (TCNT1) é igual ao valor programado no registrador OCR1A, que define o valor de topo do comparador, conseqüentemente também a sua resolução.

Para configuração do temporizador é necessário definir os bits de configuração dos registradores TCCR1A (tabela 7) e TCCR1B (tabela 8).

Tabela 7 - Bits de configuração do registrador TCCR1A.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10	TCCR1A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	W	W	R/W	R/W	

Tabela 8 - Bits de configuração do registrador TCCR1B.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

A configuração do registrador TCCR1A deve ser feita para o modo de operação normal da porta, estando todos os bits e configuração desse registrador desligados para o modo CTC.

Na tabela 9 estão os modos de operação do registrador TCCR1B, e para operação no modo CTC deve-se habilitar o bit WGM12. Também no mesmo registrador é definida a fonte de relógio para o temporizador (tabela 10). Para selecionar a fonte de relógio do sistema (relógio de 16MHz externo utilizado nesta aplicação) com o uso de um *prescaler* 8, deve-se habilitar o bit CS11.

Tabela 9 - Opções de modo de operação do registrador TCCR1B.

WGM13	WGM12	WGM11	WGM10	Modo de Operação Temporizador/Contador	Topo
0	0	0	0	Normal	0xFFFF
0	0	0	1	PWM, correção de fase, 8bits	0x00FF
0	0	1	0	PWM, correção de fase, 9bits	0x01FF
0	0	1	1	PWM, correção de fase, 10bits	0x03FF
0	1	0	0	CTC	OCR1A
0	1	0	1	PWM rápido, 8bits	0x00FF
0	1	1	0	PWM rápido, 9bits	0x01FF
0	1	1	1	PWM rápido, 10bits	0x03FF
1	0	0	0	PWM, correção de fase e frequência	ICR1
1	0	0	1	PWM, correção de fase e frequência	OCR1A
1	0	1	0	PWM, correção de fase	ICR1
1	0	1	1	PWM, correção de fase	OCR1A
1	1	0	0	CTC	ICR1
1	1	0	1	(reservado)	-
1	1	1	0	PWM rápido	ICR1
1	1	1	1	PWM rápido	OCR1A

Tabela 10 - Fonte de relógio do temporizador.

CS12	CS11	CS10	Descrição
0	0	0	Sem fonte de relógio. (Temporizador/Contador parado)
0	0	1	Relógio/1 (Sem <i>prescaler</i>)
0	1	0	Relógio/8 (<i>prescaler</i>)
0	1	1	Relógio/64 (<i>prescaler</i>)
1	0	0	Relógio/256 (<i>prescaler</i>)
1	0	1	Relógio/1024 (<i>prescaler</i>)
1	1	0	Fonte de relógio externo no pino T1. Borda de descida
1	1	1	Fonte de relógio externo no pino T1. Borda de subida

Com uma fonte de relógio de 16MHz e um *prescaler* 8 tem-se que a frequência é igual a: $f = 16MHz/8 = 2MHz$.

A uma frequência de 2MHz tem-se que: $T = 1/2000000 = 0,5\mu s$. Como o tempo definido para a medição de aceleração no projeto é de 10ms (desta forma permitindo uma precisão de duas casas decimais para o tempo) é necessário configurar o registro OCR1A para contar 20.000 vezes. A seguir é mostrado o código fonte para o funcionamento do contador:

```
TCCR1A = 0x00;
TCCR1B = _BV(WGM12) | _BV(CS11);
OCR1A = 19999;
```

5.2.2.3. Conversão A/D

Para a conversão do sinal analógico do acelerômetro é preciso primeiro preparar o canal de conversão A/D configurando os bits do registrador ADMUX (tabela 11).

Tabela 11 - Bits de configuração do registrador ADMUX.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	REFS1	REFS0	ADLAR	–	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	ADMUX
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Na configuração de sua referência de conversão são utilizados os bits REFS1 e REFS0 (tabela 12) e para a opção de uma referência ligada ao pino AREF é preciso configurar esses bits como zero.

Tabela 12 - Opções de referências para o conversor A/D.

REFS1	REFS0	Seleção da Tensão de Referência
0	0	AREF, tensão de referência interna desligada
0	1	AVcc com capacitor externo no pino AREF
1	0	(reservado)
1	1	Tensão de referência interna de 2,56V com capacitor no pino AREF

O bit ADLAR afeta a apresentação do resultado da conversão A/D, pois o resultado da conversão é gravado em dois registradores de 8 bits cada (ADCL e ADCH). Para que a conversão seja de 10 bits é necessário que o bit ADLAR seja zero, fazendo com o que o resultado seja ajustado pela direita, ou seja, são utilizados os 8 bits do registrador ADCL e mais 2 bits do registrador ADCH. Nesse

modo a seqüência de leitura começa pelo registrador ADCL, travando a atualização dos registradores de resultado, e depois se lê o registrador ADCH, liberando novamente a atualização dos mesmos.

Para a seleção do canal de conversão A/D são configurados os bits MUX3, MUX2, MUX1 e MUX0 (tabela 13). O canal utilizado para ligação do sinal analógico do acelerômetro é o canal AD0. Portanto, a configuração destes bits deve ser feita com zeros (ATMEL, 2007).

Tabela 13 - Opções de canais de conversão A/D.

MUX3..0	Entrada do Conversor A/D
0000	ADC0
0001	ADC1
0010	ADC2
0011	ADC3
0100	ADC4
0101	ADC5
0110	ADC6
0111	ADC7

Após a preparação do canal A/D é necessário configurar o registrador de controle e status (ADCSRA) escrevendo os seus bits de configuração (tabela 14).

Tabela 14 - Bits de configuração do registrador ADCSRA.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADFR	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

O bit ADEN define se o conversor A/D está ligado ou desligado, sendo que o bit habilitado significa que ele está ligado. A habilitação do bit ADSC também é

necessária para começar cada conversão quando no modo de conversão simples (bit ADFR desligado).

A combinação dos bits ADPS2, ADPS1 e ADPS0 selecionam a opção de *prescaler* para o conversor A/D (tabela 15). Devido a sua implementação o circuito de aproximação sucessiva precisa de uma frequência de relógio entre 50KHz e 200KHz para ter uma resolução de 10bits. Um *prescaler* de 128 vai reduzir a frequência do relógio de 16MHz para 125KHz, ficando dentro da faixa especificada pelo fabricante (ATMEL, 2007). Para tanto, todos os três bits devem ser habilitados.

Tabela 15 - Opções de *prescaler* do conversor A/D.

ADPS2..0	Fator de Divisão
000	2
001	2
010	4
011	8
100	16
101	32
110	64
111	128

A seguir é mostrado o código fonte para o funcionamento do conversor A/D:

```
unsigned int resultado_ADC(unsigned int resultado) {
    ADMUX=0x00;
    ADCSRA=_BV(ADEN) | _BV(ADSC) | _BV(ADPS2) | _BV(ADPS1) | _BV(ADPS0);
    while (_BV(ADSC) & _BV(ADSC));
    ADCSRA=0;
    resultado=ADCL;
    resultado+=((ADCH&0x03)<<8);
    return(resultado);
}
```

O conversor A/D funciona com aproximações sucessivas com 10bits de resolução. Isto quer dizer que existem 1024 subdivisões para representar o

equivalente binário do sinal analógico. O valor mínimo representa o terra (0V) e o valor máximo representa o valor de referência (5V). Portanto, 0V é equivalente a um valor ADC 0 e 5V é equivalente a um valor ADC de 1024.

Para a conversão do valor ADC em aceleração “g” foi implementada uma rotina para calcular a equação da reta, fórmula (5.1), em que o limite superior é o resultado ADC de 721 medido quando o acelerômetro está a 90° (1g) em relação ao horizonte e o limite inferior é o resultado ADC de 303 medido quando o acelerômetro está a -90° (-1g) em relação ao horizonte.

$$y = ax + b \quad (5.1)$$

5.3. Operação do protótipo

Quando o protótipo é ligado aparece uma tela com um menu de seleção (figura 25), em que deve ser selecionada a opção desejada entre as opções: tempo de 0 a 100km/h, tempo nos 402m e potência útil. O menu alterna automaticamente entre as três opções a cada 2s e o usuário deve apertar o botão quando aparecer a opção desejada.



Figura 25: Menu de seleção de opções.

Caso a opção selecionada tenha sido a potência útil, a tela seguinte será para inserir o peso (figura 26). Para o peso devem ser considerados o peso em ordem de marcha do veículo (com todos os fluidos) e o peso de todos os ocupantes do veículo. Para selecionar o peso deve-se inclinar o acelerômetro para frente ou para trás, isto fará com que a aceleração estática medida aumente ou diminua o peso. Quando marcar o peso correto deve-se voltar o acelerômetro a posição horizontal e apertar o botão de seleção.



Figura 26: Tela de seleção do peso.

Em qualquer uma das opções selecionadas irá aparecer uma tela para calibração do sistema (figura 27). A calibragem é feita com o automóvel parado e utilizando a aceleração estática como referência. O acelerômetro deve ser fixado ao pára-brisa por meio de uma ventosa articulada e mudando a posição da articulação deve-se procurar uma aceleração de 0g, indicando que o acelerômetro encontra-se

na posição horizontal. Somente quando a aceleração marcada for igual a 0g e o usuário apertar o botão de seleção será mostrado o próximo passo.



Figura 27: Tela de calibragem do sistema.

Uma vez calibrado será mostrada uma tela (figura 28) informando que o sistema está pronto para começar a medição.



Figura 28: Sistema pronto para medir.

No caso das opções de medição de tempo deve-se arrancar com o veículo, atingindo-se uma aceleração superior a 0,25g inicia-se a medição e mostra-se o tempo e a velocidade ou a distância naquele instante (figura 29), e continuar acelerando até que se atinja 100km/h ou 402m, dependendo da opção selecionada. Quando os critérios de parada são atingidos, é mostrado o tempo na tela (figura 30).



Figura 29: Início da medição do tempo.



Figura 30: Resultado da medição de tempo.

Quando a opção selecionada for a potência útil, deve-se primeiro imprimir somente uma aceleração não mais que a necessária para colocar o veículo em movimento, a potência útil instantânea é mostrada durante a medição (figura 31). A medição pode ser realizada em qualquer marcha, mas em marchas mais altas as velocidades envolvidas são maiores e, conseqüentemente, a potência dissipada pelo arrasto aerodinâmico também será maior. Após engatar marcha desejada, deve-se imprimir a aceleração máxima do veículo até um pouco antes da rotação de corte da injeção. Para parar a medição deve-se frear o veículo, desaceleração de 0,35g é o critério de parada, mostrando a potência máxima atingida na tela (figura 32).



Figura 31: Início da medição de potência útil.



Figura 32: Resultado da medição de potência útil.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados está dividida em duas etapas. A primeira foi a realização dos testes preliminares para atestar o correto funcionamento de todos os componentes do protótipo. A segunda etapa diz respeito aos testes em condições reais de uso do protótipo e todas as suas funcionalidades implementadas.

6.1. Testes preliminares

Após a montagem do protótipo, o primeiro passo foi testar o funcionamento do acelerômetro. Foi escrito um *software* com a rotina de conversão A/D (ANEXO 1) para mostrar a aceleração em g (aceleração da gravidade) na tela. O teste foi realizado manipulando-se o acelerômetro manualmente para variar a sua posição. Com o acelerômetro na posição horizontal a aceleração medida era de 0g, e a medida que sua posição era alterada o valor da aceleração também mudava, atingindo o valor de 1g a uma posição de 90° e -1g a -90° (conforme já mostrado na figura 14), sempre em relação à posição horizontal. Portanto, os valores medidos estavam coerentes com a especificação do acelerômetro ADXL203E e a aceleração estática foi medida de forma correta.

Posteriormente, foi escrito outro *software* para testar as rotinas de cálculo da velocidade, distância e tempo (ANEXO 2). Novamente os testes foram conduzidos utilizando-se a aceleração estática e variando a posição do acelerômetro manualmente. O teste do tempo foi feito contando-se 30 segundos e comparando a contagem com o auxílio de um cronômetro. Foram feitas cinco medições de tempo (tabela 16) com uma média de tempo de 30,20s e desvio padrão, que é um indicativo de dispersão dos valores amostrados em relação à média (MEYER, 2000), igual a 0,13s. A pequena diferença apresentada é atribuída às marcações manuais feitas com o cronômetro, sendo que o tempo de reflexo humano é tipicamente da ordem de 0,1s. Para atestar que o erro medido é humano foi feita nova amostragem com contagem até 120 segundos (tabela 17), a fim de identificar qualquer propagação de erro caso fosse decorrente da implementação do protótipo. A média de tempo foi de 120,18s com desvio padrão de 0,11s, atestando que se trata de erro humano.

Tabela 16 - Tempo medido com o cronômetro.

AMOSTRA	TEMPO MEDIDO
1	30,23s
2	30,08s
3	30,14s
4	30,45s
5	30,12s

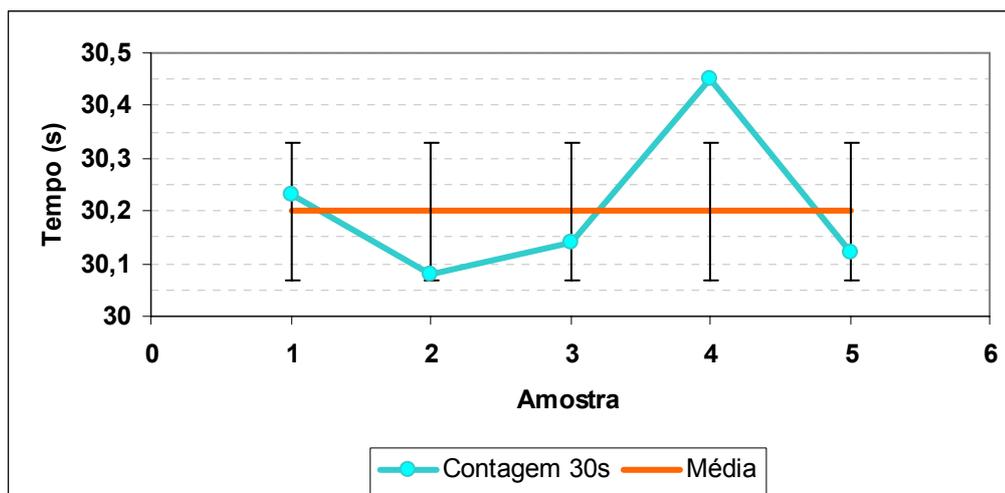


Figura 33: Gráfico das amostras da contagem de 30s.

Tabela 17 - Tempo medido com o cronômetro.

AMOSTRA	TEMPO MEDIDO
1	120,04s
2	120,37s
3	120,20s
4	120,13s
5	120,18s

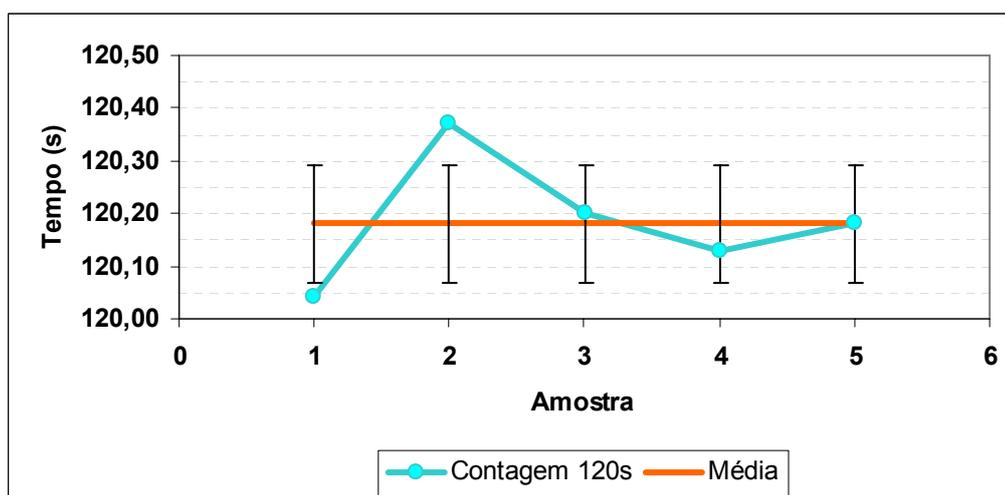


Figura 34: Gráfico das amostras da contagem de 120s.

Para o teste da velocidade e distância foram feitas simulações com o acelerômetro na posição horizontal. Nesta situação a aceleração marcada foi de 0g

e não foi medida qualquer velocidade ou distância. Imprimindo uma aceleração positiva a velocidade começa a aumentar e também a distância percorrida. Voltando o acelerômetro para a posição horizontal a velocidade estabilizava, mantendo o seu valor e a distância continuava aumentando. Imprimindo uma aceleração negativa, a velocidade começava a diminuir e a distância continua aumentando, porém cada vez mais lentamente. Quando a velocidade atingia o valor zero, a distância estabilizava e mantinha o seu valor, até que uma velocidade negativa começava a ser marcada, fazendo com que a distância começasse a reduzir. A fim de atestar os calculados de velocidade e distância, foram realizados testes em um automóvel comparando-se os valores calculados pelo protótipo e os valores do velocímetro e hodômetro parcial, verificando-se que os dois marcavam valores próximos.

6.2. Teste do protótipo

Concluídos os testes preliminares e aferindo o bom desempenho do acelerômetro e das rotinas para os cálculos de velocidade e distância, foram realizados testes em situações reais de uso dentro de um automóvel com a versão final do software (ANEXO 3).

Para a realização dos testes foram utilizados dois automóveis com os dados abaixo informados pelo fabricante (FORD, 2001):

Tabela 18 – Dados dos automóveis.

	AUTOMÓVEL 1	AUTOMÓVEL 2
MARCA/MODELO	FORD FOCUS HATCH	FORD FOCUS HATCH
MOTORIZAÇÃO	2.0L 16V	1.8L 16V
POTÊNCIA DECLARADA	130cv a 5.500rpm	115cv a 5.500rpm
PESO EM ORDEM DE MARCHA	1.156kg	1.129kg
PNEUS	205/50R15	185/60R14
CIRCUNFERÊNCIA DOS PNEUS	1905,38mm	1814,58mm
ÁREA FRONTAL	2,11m ²	2,11m ²
COEFICIENTE DE ARRASTO AERODINÂMICO	0,34	0,34
RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO:		
1ª Marcha	3,42:1	3,58:1
2ª Marcha	2,14:1	1,93:1
3ª Marcha	1,45:1	1,28:1
4ª Marcha	1,03:1	0,95:1
5ª Marcha	0,77:1	0,76:1
Diferencial	4,06:1	4,06:1

O automóvel 1 foi aferido em um dinamômetro de rolo (ANEXO 4) medindo 124,1cv (122,4hp) com a segunda marcha engatada, lembrando que esta potência considera somente a potência dissipada pela inércia do sistema de transmissão. Para padronização os testes foram realizados utilizando-se também a segunda marcha.

Nas medidas de potência útil também foi considerado o peso do condutor, 90kg . Desta maneira, para o automóvel 1 o peso total foi de 1.246kg e 1.219kg para o automóvel 2.

Nas medidas de tempo foram estabelecidos alguns parâmetros para padronização dos testes e redução da influência do condutor nos resultados. Todas as largadas foram realizadas a uma rotação de 2.500rpm soltando-se o pedal da embreagem de uma só vez e levando-se a rotação do motor até 6.500rpm para as trocas de marchas.

Em todos os testes foi definida uma amostragem com cinco medidas cada. O resultado final é a média aritmética das amostras para minimizar a influência de

fatores de difícil controle como tração durante a arrancada, tempo gasto nas trocas de marchas, dentre outros, na variação do resultado de um teste para o outro. Também foi utilizada a média truncada a fim de melhorar os resultados estatísticos dos testes, descartando-se o menor e o maior valor das amostras para o cálculo da média aritmética.

Os testes foram realizados a uma temperatura de 21°C, 68% de umidade relativa do ar e a uma pressão atmosférica de 885,8hPa (INMET, 2007). A densidade do ar úmido pode ser calculada pela fórmula abaixo (PICARD, 2002):

$$\rho = \frac{0,34848p - 0,009(hr)^{0,061t}}{273,15 + t} \quad (6.1)$$

Em que “ p ” é a pressão atmosférica, “ hr ” a umidade relativa do ar e “ t ” a temperatura ambiente. Desta forma:

$$\rho = \frac{0,34848.885,9 - 0,009(68)^{0,061.21}}{273,15 + 21} = \frac{308,718 - 2,003}{294,15} = 1,043 \text{ kg} / \text{m}^3$$

6.2.1. Tempo gasto para sair do repouso e atingir 100km/h

A média dos tempos para o Automóvel 1 foi de 9,63s com 0,18s de desvio padrão e a média truncada foi de 9,62s com 0,11s de desvio padrão. Esse valor é próximo do tempo declarado pelo fabricante de 9,8s. Seguem os dados das amostras:

Tabela 19 - Tempo de 0 – 100km/h do Automóvel 1.

AMOSTRA	TEMPO MEDIDO
1	9,50s
2	9,89s
3	9,41s
4	9,58s
5	9,77s

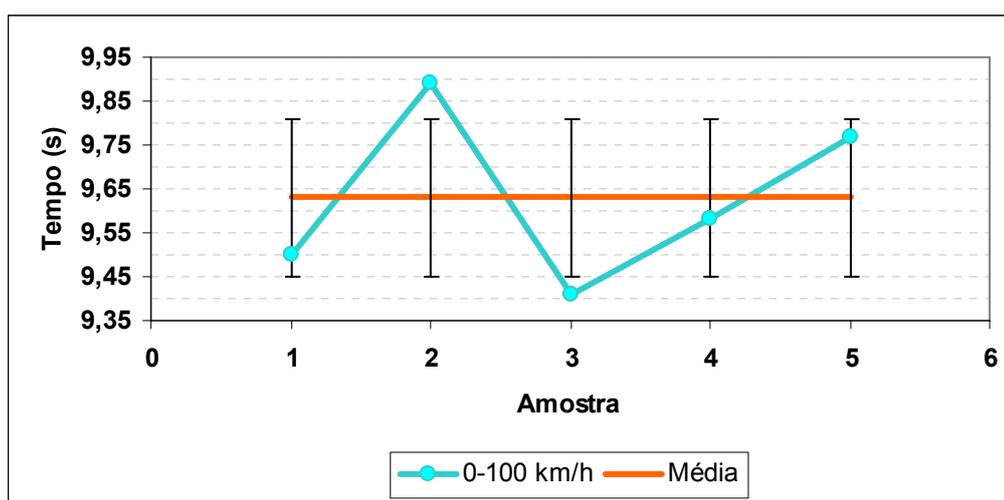


Figura 35: Gráfico da média do tempo de 0-100km/h do Automóvel 1.

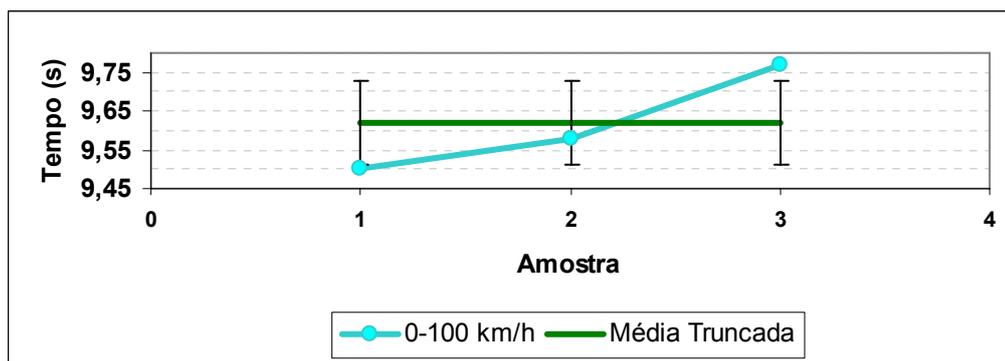


Figura 36: Gráfico da média truncada do tempo de 0-100km/h do Automóvel 1.

Para o Automóvel 2, a média dos tempos foi de 10,68s com 0,13s de desvio padrão a média truncada foi de 10,71s com 0,05s de desvio padrão. Esse valor também fica próximo do tempo declarado pelo fabricante de 10,4s. Seguem os dados das amostras:

Tabela 20 - Tempo de 0 – 100km/h Automóvel 2.

AMOSTRA	TEMPO MEDIDO
1	10,81s
2	10,72s
3	10,44s
4	10,65s
5	10,77s

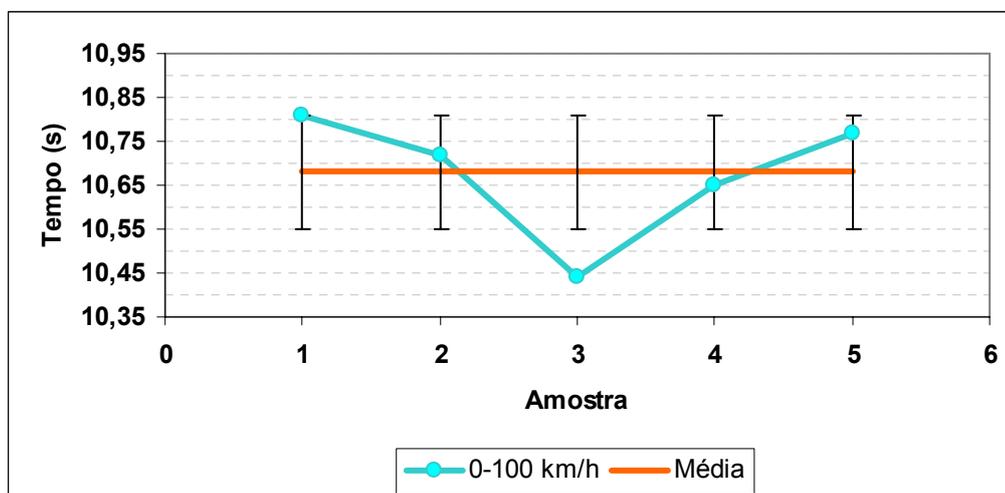


Figura 37: Gráfico da média do tempo de 0-100km/h Automóvel 2.

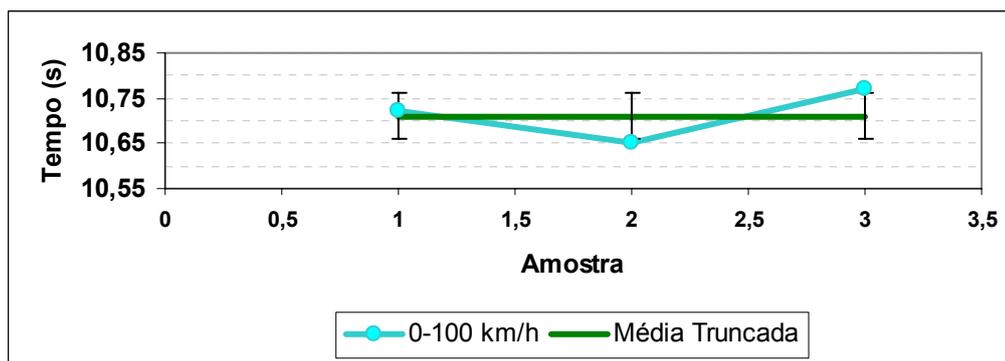


Figura 38: Gráfico da média truncada do tempo de 0-100km/h Automóvel 2.

As amostras da medição desse parâmetro foram coerentes em ambos os automóveis, apresentando baixo desvio padrão e valor próximo da média.

6.2.2. Tempo gasto para sair do repouso e percorrer 402m

A média dos tempos do Automóvel 1 foi de 17,59s com 0,22s de desvio padrão e a média truncada foi de 17,55s com 0,10s de desvio padrão. Seguem os dados das amostras:

Tabela 21 - Tempo nos 402m do Automóvel 1.

AMOSTRA	TEMPO MEDIDO
1	17,32s
2	17,69s
3	17,97s
4	17,46s
5	17,51s

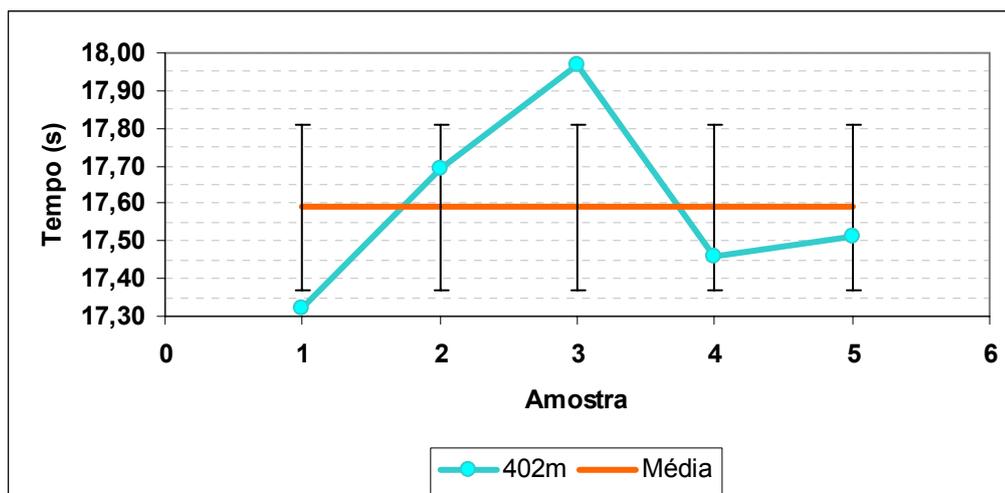


Figura 39: Gráfico da média do tempo nos 402m do Automóvel 1.

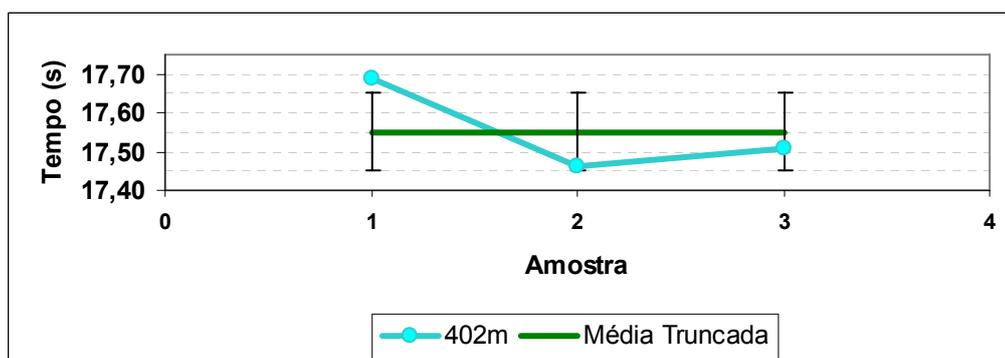


Figura 40: Gráfico da média truncada do tempo nos 402m do Automóvel 1.

Para o Automóvel 2, a média dos tempos foi de 18,33s com 0,16s de desvio padrão e a média truncada foi de 18,34s com 0,11s de desvio padrão. Seguem os dados das amostras:

Tabela 22 - Tempo nos 402m do Automóvel 2.

AMOSTRA	TEMPO MEDIDO
1	18,11s
2	18,20s
3	18,46s
4	18,53s
5	18,37s

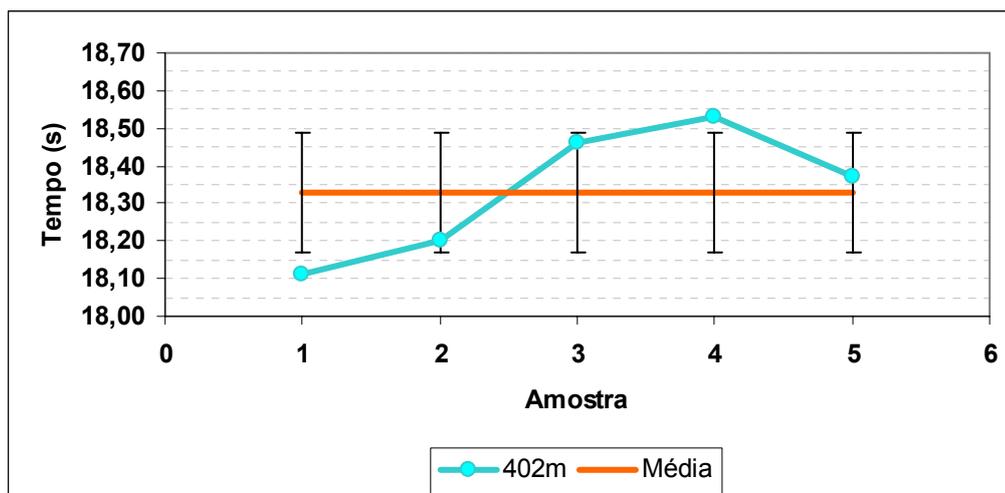


Figura 41: Gráfico da média do tempo nos 402m do Automóvel 2.

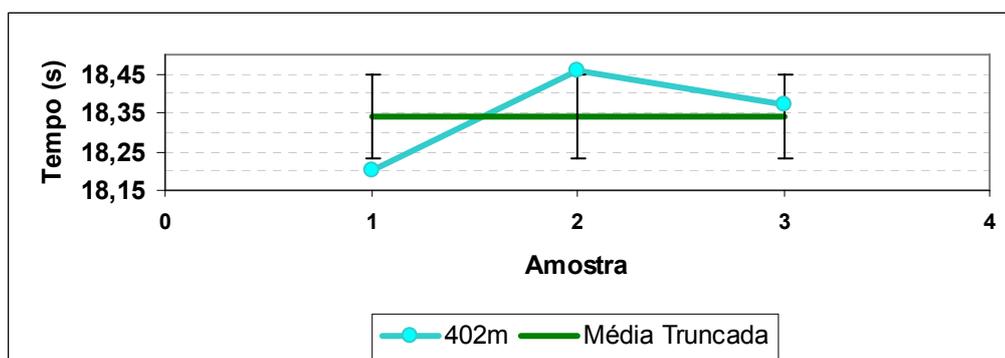


Figura 42: Gráfico da média truncada do tempo nos 402m do Automóvel 2.

Neste parâmetro também se pode observar o baixo desvio padrão e uma coerência entre os resultados, sendo os tempos do Automóvel 1 menores que do que os obtidos pelo Automóvel 2, devido a maior potência e relações de transmissão mais curtas do Automóvel 1.

6.2.3. Potência útil máxima

Para a potência útil máxima serão apresentados os resultados dos testes e posteriormente será feita uma análise dos resultados.

6.2.3.1. Resultados dos testes

A média de potência útil máxima do Automóvel 1 foi de 112,0cv com 6,2cv de desvio padrão e média truncada de 112,0cv com 3,2cv de desvio padrão.

Seguem os dados das amostras:

Tabela 23 - Potência útil máxima do Automóvel 1.

AMOSTRA	POTÊNCIA
1	120,9cv
2	111,7cv
3	116,1cv
4	108,3cv
5	103,0cv

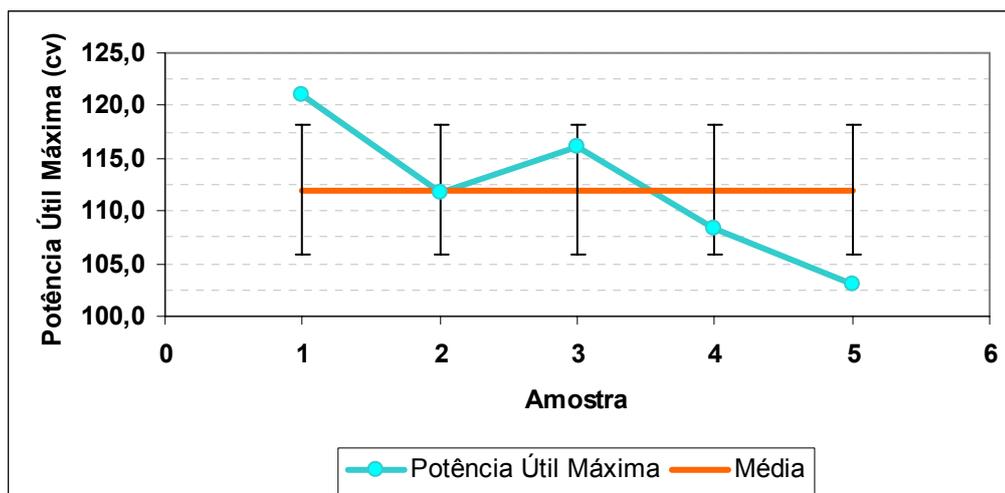


Figura 43: Gráfico da média da potência útil máxima do Automóvel 1.

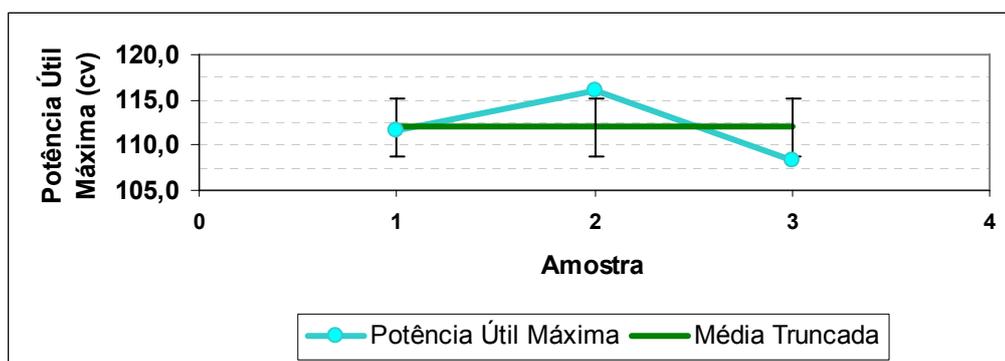


Figura 44: Gráfico da média truncada da potência útil máxima do Automóvel 1.

Para o Automóvel 2, a média de potência útil máxima foi de 95,2cv com 4,1cv de desvio padrão e média truncada foi de 94,4cv com 2,1cv de desvio padrão. Seguem os dados das amostras:

Tabela 24 - Potência útil máxima do Automóvel 2.

AMOSTRA	POTÊNCIA
1	91,9cv
2	97,0cv
3	94,2cv
4	90,5cv
5	102,1cv

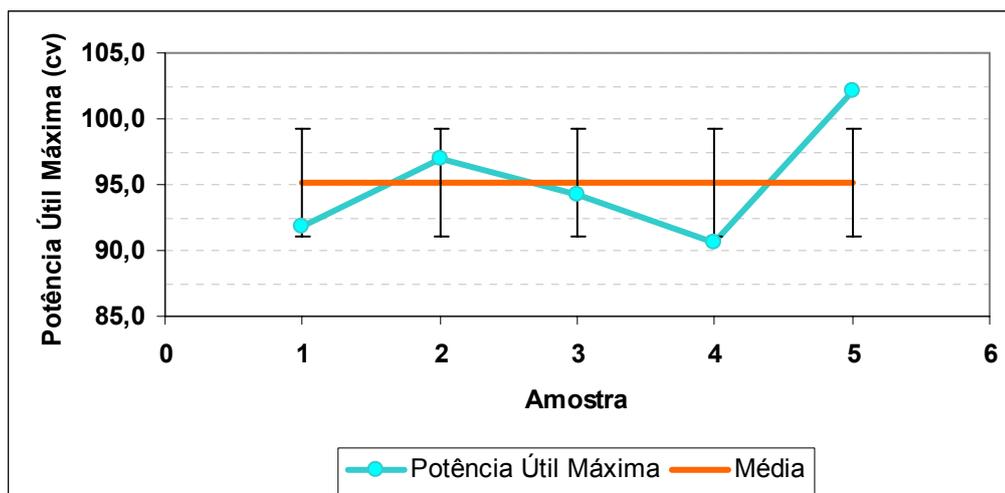


Figura 45: Gráfico da média da potência útil máxima do Automóvel 2.

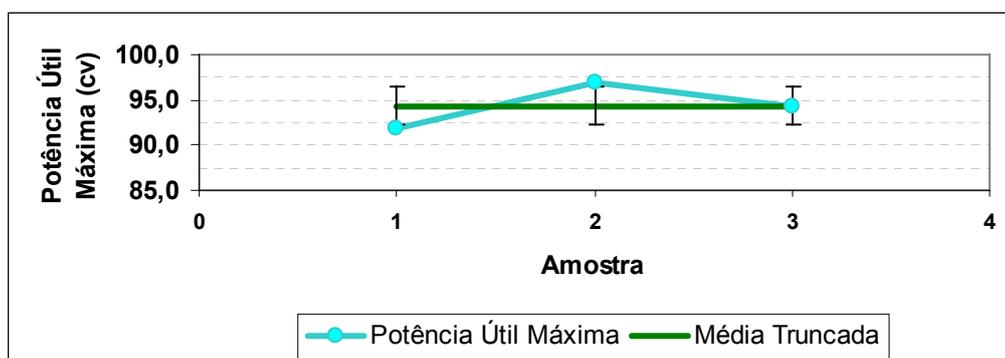


Figura 46: Gráfico da média truncada da potência útil máxima do Automóvel 2.

6.2.3.2. Análise dos resultados

A potência útil de um automóvel considera a potência dissipada em função das forças resistentes ao deslocamento, essas forças são a resistência ao rolamento dos pneus, o arrasto aerodinâmico e a inércia do sistema de transmissão (GILLESPIE, 1992).

A inércia do sistema de transmissão é responsável pela dissipação de 15% (média dos sistemas de transmissão manuais) da potência do veículo (WONG, 2001). Como a potência na roda do Automóvel 1 é de 124,1cv (ANEXO 4), infere-se que a sua potência no motor seja 142,7cv e a potência dissipada pelo sistema de transmissão igual a 18,6cv. Ressalta-se que a potência declarada pelo fabricante de 130cv é uma média da potência de alguns motores produzidos, podendo existir motores com potências maiores ou menores que o declarado (WONG, 2001). Já para o Automóvel 2 a potência declarada no motor é de 115cv, aplicando-se uma perda de 15%, a potência na roda é de 97,8cv e a potência dissipada pelo sistema de transmissão igual a 17,2cv.

A força resistente ao rolamento é diretamente proporcional ao coeficiente de resistência ao rolamento, " C_{RR} ", cujo valor é de 0,013 (WONG, 2001), a massa do conjunto (peso do automóvel e ocupantes), " m ", e a aceleração da gravidade, " g ", cujo valor no SI é de $9,8065\text{m/s}^2$ (WONG,2001).

$$F_{RR} = c_{RR}.m.g \quad (6.3)$$

A força resistente ao rolamento no Automóvel 1 é igual a:

$$F_{RR} = 0,013.1246.9,8065 = 158,84\text{N}$$

A força resistente ao rolamento no Automóvel 2 é igual a:

$$F_{RR} = 0,013.1219.9,8065 = 155,40\text{N}$$

Para o cálculo da força de arrasto aerodinâmico deve-se antes calcular a velocidade em que foi medida a potência útil máxima. Isto pode ser feito conhecendo-se circunferência do pneu, “ C_t ”, a velocidade do motor, “ V_e ”, a relação da marcha em que se encontra o veículo, “ Gr_t ”, e a relação do diferencial, “ Gr_d ” (WONG, 2001).

$$v_c = \frac{c_t \cdot v_e}{gr_t \cdot gr_d} \quad (6.2)$$

Para o Automóvel 1 a circunferência dos pneus é igual a 1905,38mm ou 0,00190538km, a rotação de potência máxima do motor é 5.295rpm (ANEXO 4) ou 317700rph, a relação da segunda marcha é 2,14 e a relação do diferencial é 4,06. Desta forma, a velocidade do veículo quando ele atinge a potência útil máxima é igual a:

$$v_c = \frac{c_t \cdot v_e}{gr_t \cdot gr_d} = \frac{0,00190538.317700}{2,14.4,06} = 69,67\text{km/h} = 19,35\text{m/s}$$

Para o Automóvel 2 a circunferência dos pneus é igual a 1814,58mm ou 0,00181458km, a rotação de potência máxima do motor é 5.500rpm ou 330000rph, a relação da segunda marcha é 1,93 e a relação do diferencial é 4,06. Desta forma, a velocidade do veículo quando ele atinge a potência útil máxima é igual a:

$$v_c = \frac{c_t \cdot v_e}{g r_t \cdot g r_d} = \frac{0,00181458 \cdot 330000}{1,93 \cdot 4,06} = 76,42 \text{ km/h} = 21,23 \text{ m/s}$$

A força de arrasto aerodinâmico é diretamente proporcional a densidade do ar úmido, “ ρ ”, ao coeficiente de arrasto aerodinâmico, “ C_D ”, a área frontal do veículo, “ A ”, e a velocidade do veículo (GILLESPIE, 1992).

$$F_{AA} = \frac{\rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2}{2} \quad (6.4)$$

A força de arrasto aerodinâmico no Automóvel 1 é igual a:

$$F_{AA} = \frac{1,043 \cdot 0,34 \cdot 2,11 \cdot 19,35^2}{2} = 140,08 \text{ N}$$

A força de arrasto aerodinâmico no Automóvel 2 é igual a:

$$F_{AA} = \frac{1,043 \cdot 0,34 \cdot 2,11 \cdot 21,23^2}{2} = 168,62 \text{ N}$$

A potência dissipada pela força de resistência ao rolamento e pela força de arrasto aerodinâmico pode ser calculada pela fórmula (2.9). Desta forma, para o Automóvel 1 a potência dissipada é:

$$P_D = (158,84 + 140,08) \cdot 19,35 = 5784,1\text{W} = 7,9\text{cv}$$

Para o Automóvel 2 a potência dissipada é:

$$P_D = (155,40 + 168,62) \cdot 21,23 = 6878,9\text{W} = 9,4\text{cv}$$

Considerando-se a potência na roda medida no dinamômetro de rolo do Automóvel 1 de 124,1cv e a potência dissipada calculada de 7,9cv, chega-se a uma potência útil de 116,2cv. Este valor é próximo do valor de potência útil máxima medida pelo protótipo de 112,0cv, apresentando uma variação entre os valores de 3,75%. Já para o Automóvel 2, a potência na roda teórica é 97,8cv e a potência dissipada calculada é 9,4cv, obtendo-se uma potência útil de 88,4cv. Como o valor medido pelo protótipo foi de 94,4cv a variação entre os valores é de 6,79%. Esta variação maior medida no Automóvel 2 pode ser devido a potência declarada pelo fabricante ser menor que a potência do veículo testado.

7. CONCLUSÃO

A aferição dos parâmetros de tempo e potência útil obteve bons resultados, comprovando que é possível a utilização de um acelerômetro MEMS para medir o desempenho de um automóvel. O protótipo desenvolvido (ANEXO 5) é compacto e pesa menos de 1kg, facilitando o seu transporte, além de demandar um tempo inferior a 1 minuto para que seja instalado e calibrado em qualquer automóvel. O custo para montagem do protótipo foi de R\$447,17, podendo ser reduzido com a sua produção em série.

Durante o desenvolvimento do projeto foram encontradas diversas dificuldades, atrasando o cronograma de desenvolvimento estabelecido. Na parte de *hardware*, o maior problema foi a manipulação do acelerômetro ADL203E, que, devido a seu tamanho reduzido, complicou a soldagem de seus contatos e fazer uma placa para o seu circuito. O desenvolvimento do *software* foi o que apresentou a maior quantidade de dificuldades, começando pela configuração inicial do microcontrolador ATMEGA8, sendo necessário um maior aprofundamento sobre o uso de interrupção, de contagem de tempo e de conversão A/D com este microcontrolador.

Como continuidade ao desenvolvimento deste projeto podem ser implementadas melhorias para aumentar ainda mais a precisão e confiabilidade das medições com a implementação de filtros, tanto de *hardware* e *software*, para minimizar o efeito das irregularidades do terreno e mudanças de marcha na leitura do acelerômetro. Também é possível implementar outros parâmetros de

desempenho como o tempo necessário para frear o veículo até a sua completa parada ou o tempo de retomada de velocidade. Também pode ser implementado um sistema para medir a inclinação de veículos *off-road* baseando o seu funcionamento na medição da aceleração estática ao invés da aceleração dinâmica. Outra funcionalidade útil é uma interface de comunicação com um computador pessoal, para que possam ser coletados os dados dos testes para posteriores análises gráficas. Esta análise mais detalhada permite verificar o ponto ideal para trocar as marchas, o tempo perdido em cada troca de marcha, o escalonamento das marchas, uma análise da curva de potência como um todo e não só a potência máxima, dentre outras vantagens.

Outras implementações podem ser feitas com um acelerômetro de três eixos para analisar o comportamento dinâmico do automóvel em um circuito. Pode-se analisar o efeito de guinada (rotação ao redor do eixo z) possibilitando aferir se o veículo está com tendência de sobre-esterço ou sub-esterço; o efeito de rolagem (rotação ao redor do eixo x), possibilitando a análise da tendência de deslizamento lateral do veículo; e o efeito de arfagem (rotação ao redor do eixo y), possibilitando a análise de frenagens e retomadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANALOG DEVICES. iMEMS Accelerometers. Disponível em: <<http://www.analog.com>>. Acesso em: 11 de agosto de 2007.

ANALOG DEVICES. Datasheet ADXL203. Disponível em: <http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXL103_203.pdf>. Acesso em: 11 de agosto de 2007.

ATMEL. Products. Microcontrollers. Disponível em: <<http://www.atmel.com>>. Acesso em: 05 de agosto de 2007.

ATMEL. Datasheet Atmega8. Disponível em: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf>. Acesso em: 05 de agosto de 2007.

BORGES, G. A.; BO, A. P. L.; MARTINS, A. S.; COTTA, L. C.; FERNANDES, M.; FREITAS, G.; BECKMANN, E. Desenvolvimento com microcontroladores Atmel AVR. Disponível em: <<http://www.ene.unb.br/~gaborges/recursos/notas/nt.avr.pdf>>. Acesso em 23 de julho de 2007.

CORRSYS-DATRON. Data acquisition & software. Disponível em: <<http://www.corrsys-datron.com/>>. Acesso em 08 de novembro de 2007.

FORÇA LIVRE MOTORSPORT. Arrancada. Apresentação. Disponível em: <<http://www.forcalivre.com.br/>>. Acesso em: 12 de novembro de 2007.

FORD. Focus: Manual do Proprietário. 2001.

FROUDE HOFMANN. Products. Disponível em: <<http://www.froudehofmann.com/>>. Acesso em 09 de novembro de 2007.

GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, 1992.

INMET. Previsão do Tempo. Municípios. Brasília. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 24 de novembro de 2007.

MALVINO, Albert P. *Eletrônica: Volume I*. São Paulo: Makron Books, 1995.

MEMS AND NANOTECHNOLOGY CLEARINGHOUSE. What is MEMS?. Disponível em: <<http://www.memsnet.org/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2007.

MEYER, Paul. *Probabilidade: Aplicações a Estatística*. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. *Curso de Física Básica: Mecânica*. São Paulo: Edgar Blücher, 2002.

PICARD, A.; FANG, H. *Three methods of determining the density of moist air during mass comparisons*. Volume 39. Paris: Bureau International des Poids et Mesures, 2002.

RIBAS, Renato P. *Microssistemas Integrados (MEMS)*. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap14.pdf>>. Acesso em: 11 de agosto de 2007.

HITACHI. Datasheet HD44780. Disponível em: <<http://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>>. Acesso em: 23 de outubro de 2007.

TAG HEUER. Timing. Disponível em: <<http://www.tagheuer-timing.com/>>. Acesso em: 08 de novembro de 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet LM78xx. Disponível em: <<http://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>>. Acesso em: 15 de setembro de 2007.

YOUND, Hugh D.; FREEMAN, Roger A. *Sears e Zemansky's: Física 1 - Mecânica*. 10ª edição. São Paulo: Addison Wesley, 2003.

WONG, J. W. *Theory of Ground Vehicles*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

ANEXO 1: CÓDIGO FONTE PARA TESTE DO ACELERÔMETRO.

```

//*****\\
//
//          TESTE DO ACELERÔMETRO E CONVERSÃO A/D
//
//*****\\

#include <avr/interrupt.h>
#include "lcd.h"
#include "delay.h"

unsigned int clinear=0,cangular=0;
volatile double acelbits=0,acelg=0;

void inicializa(void);

unsigned int resultado_ADC(unsigned int resultado) {
    ADMUX=0x00;
    ADCSRA=_BV(ADEN) | _BV(ADSC) | _BV(ADPS2) | _BV(ADPS1) | _BV(ADPS0);
    while (ADCSRA & _BV(ADSC));
    ADCSRA=0;
    resultado=ADCL;
    resultado+=((ADCH&0x03)<<8);
    return(resultado);
}

SIGNAL (SIG_OUTPUT_COMPARE1A) {
    acelbits=resultado_ADC(0);
    clinear=(718+306)/2;
    cangular=(718-306)/2;
    acelg=(acelbits-clinear)/cangular;
}

int main(void) {
    char t[5];
    int i=0;
    inicializa();
    for(;;) {
        lcd_init(LCD_DISP_ON);
        lcd_puts("Acelg: ");
        dtostrf(acelg,1,3,t);
        lcd_puts(t);
        lcd_puts(" g \nBits: ");
        dtostrf(acelbits,4,0,t);
        lcd_puts(t);
        lcd_puts(" \n");
        for(i=0;i<=100;i++) {
            _delay_ms(1);
        }
    }
}

void inicializa(void) {
    DDRD|=_BV(7);
    GICR|=_BV(6);
    MCUCR=0x00;
}

```

```
MCUCR|=_BV(ISC01)|_BV(ISC00);
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=_BV(WGM12)|_BV(CS11);
OCR1A=19999;
TIMSK|=_BV(OCIE1A);
sei();
}
```

ANEXO 2: CÓDIGO FONTE PARA TESTE DOS ROTINAS DE CÁLCULO.

```

//*****\\
//
//          TESTE DAS ROTINAS DE CÁLCULO E TEMPO          \\
//
//*****\\

#include <avr/interrupt.h>
#include "lcd.h"
#include "delay.h"

unsigned int clinear=0,cangular=0;
volatile double acelbits=0,acelg=0,tempo=0,vel=0,dist=0;

void inicializa(void);

unsigned int resultado_ADC(unsigned int resultado) {
    ADMUX=0x00;
    ADCSRA=_BV(ADEN) | _BV(ADSC) | _BV(ADPS2) | _BV(ADPS1) | _BV(ADPS0);
    while (ADCSRA & _BV(ADSC));
    ADCSRA=0;
    resultado=ADCL;
    resultado+=((ADCH&0x03)<<8);
    return(resultado);
}

SIGNAL (SIG_OUTPUT_COMPARE1A) {
    acelbits=resultado_ADC(0);
    clinear=(718+306)/2;
    cangular=(718-306)/2;
    acelg=(acelbits-clinear)/cangular;
    tempo=tempo+0.01;
    vel=3.6*acelg*9.80665*0.01+vel;
    dist=0.01*vel/3.6+dist;
}

int main(void) {
    int i=0;
    char t[5];
    inicializa();
    for(;;) {
        lcd_init(LCD_DISP_ON);
        lcd_puts("A:");
        dtostrf(acelg,1,2,t);
        lcd_puts(t);
        lcd_puts(" T:");
        dtostrf(tempo,3,2,t);
        lcd_puts(t);
        lcd_puts("\nV:");
        dtostrf(vel,3,1,t);
        lcd_puts(t);
        lcd_puts(" D:");
        dtostrf(dist,3,1,t);
        lcd_puts(t);
        lcd_puts("\n");
    }
}

```

```
        for(i=0;i<=200;i++) {
            _delay_ms(1);
        }
    }

void inicializa(void) {
    DDRD|=_BV(7);
    GICR|=_BV(6);
    MCUCR=0x00;
    MCUCR|=_BV(ISC01)|_BV(ISC00);
    TCCR1A=0x00;
    TCCR1B=_BV(WGM12)|_BV(CS11);
    OCR1A=19999;
    TIMSK|=_BV(OCIE1A);
    sei();
}
```

ANEXO 3: CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA.

```

//*****\\
//
//          PROGRAMA ACELEROM V1.1
//
//*****\\

#include <avr/interrupt.h>
#include "lcd.h"
#include "delay.h"

unsigned int opcao=0;
unsigned int clinear=0,cangular=0;
volatile int intexterna=0;
volatile double tempo=0,tempodist=0,tempovel=0;
volatile double acelbits,acelactual,acelg=0;
volatile double vel=0,dist=0;
volatile double massa=0,pot=0,potmax=0;

void inicializa(void);

// Habilitação do conversor A/D.
unsigned int resultado_ADC(unsigned int resultado) {
    ADMUX=0x00;
    ADCSRA=_BV(ADEN)|_BV(ADSC)|_BV(ADPS2)|_BV(ADPS1)|_BV(ADPS0);
    while (_BV(ADSC));
    ADCSRA=0;
    resultado=ADCL;
    resultado+=((ADCH&0x03)<<8);
    return(resultado);
}

// Interrupção Externa.
SIGNAL (SIG_INTERRUPT0) {
    intexterna=1;
}

SIGNAL (SIG_OUTPUT_COMPARE1A) {
    unsigned int i=0;
    acelbits=resultado_ADC(0); // Recebe o resultado A/D.
    clinear=(721+303)/2; // Coeficiente linear.
    cangular=(721-303)/2; // Coeficiente angular.
    if (acelbits<(clinear-6)) {
        acelactual=(acelbits-clinear)/cangular; // Equação da reta.
    }
    else if (acelbits>(clinear+6)) {
        acelactual=(acelbits-clinear)/cangular;
    }
    else {
        acelactual=0.0;
    }
    // Média da aceleração.
    for (i=0; i<20; i++) {
        acelg+=acelactual;
    }
}

```

```

    acelg=acelg/20.0;
    tempo=tempo+0.01; // Tempo padrão.
    if (((opcao==0) && (vel<100)) || (opcao!=0)) {
        vel=3.6*acelg*9.80665*0.01+vel; // Cálculo da velocidade.
        tempovel=tempo;
    }
    if (((opcao==1) && (dist<402)) || (opcao!=1)) {
        dist=0.01*vel/3.6+dist; // Cálculo da distância.
        tempodist=tempo;
    }
    if (opcao==2) {
        if (acelg>0) {
            // Cálculo da potência útil.
            pot+=acelg*9.80665*(massa-400)*vel/3.6/735.49875;
            potant=pot;
            // Média da potência útil.
            for (i=0; i<20; i++) {
                pot+=acelg*9.80665*(massa-400)*vel/3.6/735.49875;
            }
            pot=pot/20.0;
            // Potência útil máxima.
            if (potmax<pot) {
                potmax=pot;
            }
        }
    }
}

int main(void) {
    unsigned int i=0,inicio=0,calibrado=0;
    char string[5];
    lcd_init(LCD_DISP_ON);
    inicializa();
    lcd_puts(" ACELERON v1.00 \n PROJETO FINAL \n");
    for (i=0;i<2000;i++) {
        _delay_ms(1);
    }

    // Menu de seleção.
    lcd_puts(" SELECIONE A \n OPCAO DESEJADA \n");
    for (i=0;i<2000;i++) {
        _delay_ms(1);
    }
    while (intexterna==0) {
        switch (opcao) {
            case 0:
                lcd_puts(" TEMPO DE \n 0 a 100 km/h \n");
                break;
            case 1:
                lcd_puts(" TEMPO NOS \n 402 m (1/4 mile)\n");
                break;
            case 2:
                lcd_puts(" POTENCIA \n UTIL \n");
                break;
        }
        for (i=0;i<2000;i++) {
            _delay_ms(1);
        }
        if (intexterna==0) {
            opcao++;
            if (opcao==3) {

```

```

        opcao=0;
    }
}
intexterna=0;

// Rotina para inserir o peso.
if (opcao==2) {
    massa=1350;
    while (intexterna!=1) {
        if (acelg>0.3) {
            massa++;
        }
        else if (acelg<-0.3) {
            massa--;
        }
        if (acelg>0.6) {
            for (i=0;i<10;i++) {
                massa++;
            }
        }
        else if (acelg<-0.6) {
            for (i=0;i<10;i++) {
                massa--;
            }
        }
        if (acelg>0.9) {
            for (i=0;i<100;i++) {
                massa++;
            }
        }
        else if (acelg<-0.9) {
            for (i=0;i<100;i++) {
                massa--;
            }
        }
        if (massa<=0) {
            massa=0;
        }
        lcd_clrscr();
        lcd_puts("ENTRE COM O PESO\n      ");
        dtostrf(massa,4,0,string);
        lcd_puts(string);
        lcd_puts(" kg \n");
        for (i=0;i<500;i++) {
            _delay_ms(1);
        }
    }
}
intexterna=0;

// Rotina para calibragem.
while (calibrado!=1) {
    lcd_puts("CALIBRAR EM 0 g:\n      ");
    dtostrf(acelg,1,3,string);
    lcd_puts(string);
    lcd_puts(" g \n");
    for (i=0;i<100;i++) {
        _delay_ms(1);
    }
    if ((acelg*acelg<0.05) && intexterna==1) {

```

```

        calibrado=1;
    }
}
for (;;) {

    // Sistema pronto para começar a medir.
    while (inicio!=1) {
        lcd_puts("    - VAI! -    \n");
        if (acelg>=0.2) {
            inicio=1;
            intexterna=0;
            tempo=0;
            vel=0;
            dist=0;
            pot=0;
            potmax=0;
        }
    }

    // Início da medição.
    if (inicio==1) {
        switch (opcao) {
            case 0:
                if (vel<100) {
                    lcd_puts("TEMPO: ");
                    dtostrf(tempo,2,2,string);
                    lcd_puts(string);
                    lcd_puts(" s \n");
                    lcd_puts("VEL.: ");
                    dtostrf(vel,3,1,string);
                    lcd_puts(string);
                    lcd_puts(" km/h \n");
                    for (i=0;i<100;i++) {
                        _delay_ms(1);
                    }
                }
                else {
                    lcd_puts("    0 - 100 km/h \n");
                    dtostrf(tempovel,2,2,string);
                    lcd_puts(string);
                    lcd_puts(" s    \n");
                    break;
                }
                break;
            case 1:
                if (dist<402) {
                    lcd_puts("TEMPO: ");
                    dtostrf(tempo,2,2,string);
                    lcd_puts(string);
                    lcd_puts(" s \n");
                    lcd_puts("DIST.: ");
                    dtostrf(dist,3,1,string);
                    lcd_puts(string);
                    lcd_puts(" m \n");
                    for (i=0;i<100;i++) {
                        _delay_ms(1);
                    }
                }
                else {
                    lcd_puts("402 m (1/4 mile)\n");
                    dtostrf(tempodist,2,2,string);

```

```

        lcd_puts(string);
        lcd_puts(" s      \n");
        break;
    }
    break;
case 2:
    if (intexterna!=1) {
        lcd_puts("POT. INSTANTANEA\n      ");
        dtostrf(pot,3,1,string);
        lcd_puts(string);
        lcd_puts(" cv \n");
        for (i=0;i<100;i++) {
            _delay_ms(1);
        }
    }
    else {
        lcd_puts(" POTENCIA UTIL \n      ");
        dtostrf(potmax,3,1,string);
        lcd_puts(string);
        lcd_puts(" cv      \n");
        break;
    }
    break;
}
}
return 0;
}

// Configuração do temporizador e interrupção.
void inicializa(void) {
    DDRD|=_BV(7);
    GICR|=_BV(6);
    MCUCR=0x00;
    MCUCR|=_BV(ISC01)|_BV(ISC00);
    TCCR1A=0x00;
    TCCR1B=_BV(WGM12)|_BV(CS11);
    OCR1A=20000;
    TIMSK|=_BV(OCIE1A);
    sei();
}
}

```

ANEXO 4: GRÁFICO DINAMÔMETRO DE ROLO AUTOMÓVEL 1.



ANEXO 5: FOTOGRAFIAS DO PROTÓTIPO.

