

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA-POLO UFC**

WAGNER RIBEIRO LEVY

**ESTUDO DO PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DA DINÂMICA ATRAVÉS DA
MÁQUINA DE ATWOOD USANDO A PLATAFORMA ARDUINO**

FORTALEZA

2018

WAGNER RIBEIRO LEVY

ESTUDO DO PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DA DINÂMICA ATRAVÉS DA MÁQUINA
DE ATWOOD USANDO A PLATAFORMA ARDUINO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Nildo Loiola Dias

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L65e Levy, Wagner Ribeiro.

Estudo do princípio fundamental da dinâmica através da máquina de Atwood usando a plataforma Arduino / Wagner Ribeiro Levy. – 2018.

131 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Nildo Loiola Dias.

1. Ensino. 2. Dinâmica. 3. Máquina de Atwood. 4. Arduino. I. Título.

CDD 530.07

WAGNER RIBEIRO LEVY

ESTUDO DO PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DA DINÂMICA ATRAVÉS DA MÁQUINA
DE ATWOOD USANDO A PLATAFORMA ARDUINO

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado Nacional Profissional em Ensino
de Física - MNPEF, Departamento de
Física da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Ensino de Física.
Área de concentração: Ensino de Física.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias (Orientador)

Dep. de Física - UFC

Prof. Dr. Marcos Antônio Araújo Silva

Dep. de Física - UFC

Prof^a. Dr^a. Mylene Ribeiro Moura Miranda

UNILAB

AGRADECIMENTO

À Sociedade Brasileira de Física, pela participação ativa na implantação do MNPEF.

Ao Departamento de Física da UFC e ao prof. Dr. Carlos Alberto pela adesão ao programa e ao cuidadoso acompanhamento dispensado a cada mestrando.

À CAPES, pelo apoio financeiro a este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nildo Loiola Dias, pela contribuição significativa e essencial sem o qual esse trabalho não seria desenvolvido a contento.

Aos colegas de turma, com a troca de experiências enriquecedoras.

A minha amada esposa Rosângela Barbosa Luna Levy, pela paciência e compreensão necessárias por parte dos que estão próximos.

RESUMO

O estudo da Segunda Lei de Newton, da Dinâmica, associado ao experimento da Máquina de Atwood cria um ambiente onde a interação do aluno com dados científicos e teoria exerça influência significativa na apropriação de conceitos físicos apresentados em sala de aula. Os conceitos sobre o movimento estabelecidos há séculos e ensinados nas escolas de Ensino Médio constituem temas constantes de debates e reflexões no campo do Ensino, especificamente quando o assunto é Ciência. Pesquisadores defendem a importância do laboratório didático na construção de um ambiente favorável à aprendizagem por proporcionar a possibilidade de interação entre aluno, fenômeno físico, dados experimentais (que fazem parte da linguagem científica), teorias físicas, desenvolvimento matemático e assim por diante. As tecnologias eletrônicas-digitais presentes em *smartphones* e computadores, junto com as ferramentas de transferência de dados, constituem uma realidade que fatalmente seria inserida no processo de ensino. Desse modo, usando uma mesclagem entre a necessidade de se trabalhar concretamente conceitos físicos e a possibilidade de fazer isso por meio de experimentos reais, analisados com auxílio de tecnologias disponíveis e de fácil acesso, foi construída uma Máquina de Atwood de forma basicamente artesanal para aplicações em aulas sobre o Princípio Fundamental da Dinâmica usando a plataforma Arduino, módulo de comunicação *bluetooth*, celular e aplicativos. A ideia é que esse equipamento possa constituir uma ferramenta funcional e eficiente em alcançar esse objetivo. Ele mantém a simplicidade de construção e operação, porém os testes realizados mostraram considerável precisão em realizar medições de tempo. O equipamento foi submetido a várias simulações de uso tendo os seus resultados analisados, levando ao aprimoramento do seu funcionamento. O uso da Máquina de Atwood capaz de gerar dados científicos propicia uma participação dialógica ativa do aluno, permitindo que o mesmo possa interagir com o equipamento e dele extrair elementos que o levem a se apropriar da linguagem científica, fundamental para a compreensão das teorias físicas.

Palavras-chave: Ensino. Dinâmica. Máquina de Atwood. Arduino.

ABSTRACT

The study of Newton's Second Law of Dynamics associated with the Atwood Machine experiment creates an environment where student interaction with scientific data and theory exerts a significant influence on the appropriation of physical concepts presented in classrooms. The concepts of movement established centuries ago and taught in high schools are constant themes of debates and reflections in the field of Teaching, specifically when the subject is Science. Researchers defend the importance of the didactic laboratory in the construction of an environment conducive to learning by providing the possibility of interaction between student, physical phenomenon, experimental data (which are part of the scientific language), physical theories, mathematical development and so on. The electronic-digital technologies present in smartphones and computers, together with the tools of data transfer, constitute a reality that would fatally be inserted in the teaching process. Thus, using a mixture between the need to work concretely on physical concepts and the possibility of doing this through real experiments, analyzed with the aid of available and easily accessible technologies, an Atwood Machine was built in a basically handmade way for applications in classes on the Fundamental Principle of Dynamics using the Arduino platform, bluetooth communication module, mobile and applications. The idea is that this equipment can be a functional and efficient tool in achieving this goal. It maintains the simplicity of construction and operation, but the tests performed showed considerable precision in taking measurements of time. The equipment was submitted to several simulations of use and its results analyzed, leading to the improvement of its operation. The use of the Atwood Machine capable of generating scientific data allows an interactive participation of the student, allowing him to dialogue with the equipment and extract elements that take him/her to appropriate scientific language, fundamental to the understanding of physical theories.

Keywords: Teaching. Dynamics. Atwood Machine. Arduino.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivo	3
1.3	Metodologia	4
2	O ENSINO DE FÍSICA E O LABORATÓRIO DIDÁTICO ESCOLAR	6
3	O PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DA DINÂMICA E A MÁQUINA DE ATWOOD	9
3.1	Newton e o conceito de força	10
3.2	A Máquina de Atwood	11
3.3	Análise mecânica da Máquina de Atwood.....	14
4	CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE ATWOOD.....	21
4.1	Estrutura de sustentação.....	23
4.2	Roldana (Polia).....	26
4.3	Massas.....	29
4.4	Copo coletor	30
4.5	Sensor	32
4.5.1	Eletrônica do sensor	32
4.5.2	Posicionamento e fixação.....	36
4.6	Arduino e a placa de circuito.....	40
4.6.1	Modelo e especificações.....	40
4.6.2	Circuito elétrico e sua logística.....	43
4.6.2.1	Ligação sensor e Arduino	45
4.6.2.2	Ligação módulo relé e Arduino	46
4.6.2.3	Ligação módulo <i>bluetooth</i> e Arduino	47
4.6.2.4	O circuito completo em <i>breadboard</i>	51
4.6.3	Circuito em PCB (Placa de Circuito Impresso)	52
4.6.4	Programas do Arduino	58

4.6.4.1	<i>Software</i> de análise do sensor	59
4.6.4.2	<i>Software</i> principal e a transferência de dados via <i>bluetooth</i>	61
4.7	Testes, resultados e ajustes no equipamento	65
5	ATIVIDADES SUGERIDAS.....	76
5.1	Objetivo a ser atingido	76
5.2	Condições de aplicação.....	77
5.3	Sugestões de aplicações para o equipamento	78
5.3.1	Determinação da relação entre força resultante e aceleração	78
5.3.2	Comparar a aceleração do sistema obtida pela Cinemática com a aceleração do sistema obtida pela Dinâmica.....	81
5.3.3	Determinação da aceleração da gravidade	82
6	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A – PLANILHA DE MEDIDAS MOSTRANDO A RELAÇÃO FORÇA VERSUS ACELERAÇÃO	90
	APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL	91
	APÊNDICE C – PLACA DE CIRCUITO	124
	APÊNDICE D - PROGRAMAS.....	125
	APÊNDICE E – TABELAS COM RESULTADOS DE TESTES	128

1 INTRODUÇÃO

O dinamismo que caracteriza a sociedade gera discussões relevantes e contínuas na busca de uma compreensão da relação entre ensinar e aprender. A busca do “como fazer” tem induzido reflexões aprofundadas por pesquisadores durante séculos. A sociedade atual experimenta a tecnologia de forma muito mais intensa e interativa se comparada a poucas décadas, onde comunicação se limitava a poucas opções eletrônicas. A expansão da *internet*, do acesso à rede, dos dispositivos móveis conectados, das redes sociais, do acesso disponível em qualquer hora e lugar... tudo isso em paralelo à necessidade de se estabelecer a relação ensino-aprendizagem. Fica claro a impossibilidade de lutar contra a tecnologia mesmo porque não há justificativa para esse conflito. Usar o computador, o *smartphone*, a *internet*, a eletrônica e tantos outros recursos disponíveis dentro do contexto educacional faz parte de uma realidade cada vez mais presente nas metodologias de ensino atuais.

Claro que a tecnologia não irá resolver os problemas da educação, do ensino, da deficiência cognitiva, mas a sua inclusão pode ser vista como uma ferramenta, uma contribuição, que leve o aluno a interação, a percepção, a discussão, ao envolvimento com o conhecimento, ao despertar da curiosidade investigativa. As relações físicas estão sendo substituídas pelas relações virtuais, à distância. Nossos jovens estão inseridos em um contexto que incentiva ferozmente o uso das redes sociais e a troca do contato físico pelo virtual. Na escola os relacionamentos físicos e virtuais andam juntos. A escola tem o poder de apresentar ao jovem o valor das duas coisas e o equilíbrio entre elas. Nem a exclusão tecnológica nem a supervalorização dela: apenas uma dose equilibrada de cada uma. Desse modo, uma teoria ligada a um experimento físico tratado tecnologicamente constitui uma ferramenta valiosa no processo de aprendizagem. A possibilidade apresentada ao aluno de usar seu próprio celular para interagir com um equipamento durante um experimento e extrair resultados é tornado possível devido à tecnologia tornada acessível. Ao mesmo tempo, é possível contemplar, não de forma virtual, mas de forma real um acontecimento, um fenômeno físico, e interagir com ele. Muito embora a tecnologia permita que o fenômeno físico estudado possa ser simulado em ambientes virtuais, a realização do experimento

recria um ambiente de laboratório real. O mesmo ambiente investigativo que levou, séculos atrás, ao desenvolvimento teórico que hoje conhecemos e somos capazes de reproduzir. Um ambiente que, ainda hoje, tem sido o berço de desenvolvimento teórico e tecnológico. A tecnologia nos permite, com mais facilidade, estudar os mesmos fenômenos físicos que foram estudados por grandes físicos mergulhados em um contexto limitado em sentido tecnológico e poder chegar a resultados surpreendentes, comprovando teorias e dando consistência àquilo que se apresenta como fato científico.

1.1. Justificativa

Conceber a Física como uma disciplina simplesmente teórica não condiz com os fatos ligados ao seu desenvolvimento. Além da própria observação da natureza, o homem passou a procurar reproduzir aquilo que ele contemplava em um ambiente controlado – o laboratório. Fenômenos observados em laboratório foram objetos de estudo e pesquisa no desenvolvimento de teorias. Pelo seu histórico não parece sensato desvincular as considerações teóricas das atividades experimentais. Quando isso ocorre é percebido o surgimento de uma lacuna, um vazio carente de ser preenchido. A Física se torna algo desprovido de sentido, sem base, sem o “por quê”. Estabelecer esse modelo onde o laboratório é um componente do processo e não apenas um acessório é o desafio lançado a todos que vislumbram um ensino eficiente, envolvente, cativante. Obviamente existem muitos fatores que trabalham contra essas mudanças. Uma extensa lista poderia ser facilmente criada: Sobrecarga de trabalho, remuneração muitas vezes inadequada levando o docente a segunda atividade remunerada complementar, falta de estrutura no ambiente escolar com sucateamento da escola pública, desinteresse da escola privada em direcionar recursos consideráveis na montagem e manutenção de um laboratório, ausência de laboratórios de ciências e distribuição da carga horária do docente. Mesmo diante desse quadro existem ações que podem ser tomadas. Não é simples nem fácil. Por outro lado, uma atitude inerte não levará a mudanças. De acordo com os PCN's, um passo fundamental é “substituir a preocupação central com os conteúdos por uma identificação das competências que, se imagina, eles terão

necessidade de adquirir em seu processo de escolaridade média” (PCN+, 2006, p. 61). Entre essas competências está a necessidade de compreensão e interação com a teoria na solução de problemas, a interpretação de gráficos e a análise de dados. Em harmonia com essas metas, podemos dizer que a prática expositiva atrelada ao contato com o experimento, ao computador, ao smartphone e a qualquer outra tecnologia, pode constituir uma ferramenta valiosa no processo.

[...] ao longo dos anos dedicados ao ensino de Física temos acreditado, que grande parte da dificuldade encontrada por esses alunos quanto ao aprendizado de Física se dá pela ausência de laboratórios didáticos, que servem como instrumentos de verificação dos fenômenos físicos em complementaridade aos estudos teóricos realizados em sala de aula (Silva & Leal, 2017, p.2).

Usando como fundamentação a teoria piagetiana, Souza e Donangelo (2012) defendem que o construtivismo seja um modo de pensar mais adequado a realidade do Ensino de Física. Sustentam que o aluno seja protagonista na construção do conhecimento ao interagir com o objeto. O laboratório, visto por esse prisma, seria um momento no qual se permitiria essa interação dependendo, obviamente, de como as atividades são realizadas.

1.2. Objetivo

Diante do exposto em relação ao quadro geral do Ensino de Física no país é preciso repensar as metodologias aplicadas, os objetivos pretendidos e estabelecer metas a serem atingidas. Ferramentas que ofereçam suporte são bem-vindas. Este trabalho foi concebido pensando em apresentar uma ferramenta que possa auxiliar alunos e professores a tratar o conhecimento físico dentro de uma abordagem interativa, interessante, mostrando que a ciência pode, e deve ser, uma área de exploração acessível a todos. O equipamento descrito aqui foi pensado para ser de fácil construção, manuseio, manutenção, locomoção e acomodação dentro do que se pretende tendo em vista a sua aplicação. Um equipamento com relativo custo reduzido, comparado aos que são encontrados no mercado, tornando possível a sua reprodução de modo que o ambiente possa ser dotado de mais de um exemplar.

Infelizmente a maioria das escolas, principalmente públicas, não possuem o equipamento similar, se possuem costuma se resumir a uma unidade e, necessitando de manutenção, o conserto normalmente é realizado por pessoal treinado. Adiciona-se a isso a dificuldade imposta pelos trâmites legais para que o equipamento seja consertado. Através dessa ferramenta o aluno poderá obter dados para formação de argumentos que se relacionem com a Segunda Lei de Newton. A medida que os dados são obtidos o aluno poderá trabalhar a interpretação das informações recebidas do experimento interligando com as informações que já possui ou o que se pretende verificar.

1.3. Metodologia

Por meio de uma sequência lógica, a teoria física previamente apresentada deve ser o ponto de partida para uma investigação de cunho experimental. Para isso, é importante esboçar um planejamento onde os objetivos estejam bem delineados e os passos para alcançá-los estejam definidos. Evidentemente que cada docente, dependendo do contexto da aplicação do produto, poderá fazer ajustes. Na realidade, eles são necessários uma vez que as circunstâncias variam de uma forma bem peculiar a cada grupo. Não é recomendável uniformizar todas as situações aplicando o mesmíssimo tratamento. Em alguns casos é importante simplificar algumas coisas, em outros é possível que sejam excluídas, de modo que os objetivos sejam alcançados e haja fluidez na realização das atividades. Portanto, o que será apresentado neste trabalho deve ser encarado como uma sugestão de atividade. Levando em conta a teoria que se deseja verificar, delimita-se uma situação física onde as teorias que constituem o foco do estudo estejam presentes. Aplica-se a teoria na previsão do comportamento mecânico do sistema e extrai os possíveis resultados. A partir da reprodução da situação estudada teoricamente os dados podem ser coletados e analisados, comparando o resultado apresentado pelo experimento com aquilo que a teoria prevê e, desse modo, chegar a conclusões.

O próximo capítulo abre algumas considerações e reflexões pertinentes em relação ao Ensino de Física e o Laboratório Didático Escolar e, em seguida, o

capítulo 3 se direciona à mecânica da Máquina de Atwood. Será feita uma análise cinemática simples, baseada no nível de aprofundamento do conteúdo de Física peculiar ao Ensino Médio, juntamente com uma análise dinâmica. A ideia é concentrar esforços em colocar à prova a Segunda Lei de Newton – O princípio Fundamental da Dinâmica. O capítulo 4 apresenta sugestões de construção de uma Máquina de Atwood funcional, para ser usada em aulas tanto no laboratório como na própria sala de aula, e que possua características que tornem viável sua construção e uso. Particularidades importantes, opções de materiais e outras informações serão apresentadas visando otimizar o processo de construção do equipamento.

O capítulo 5 traz sugestões de como o equipamento pode ser usado. Mantendo o foco principal relacionado com a comprovação prática da Segunda Lei de Newton, algumas opções de atividades serão apresentadas dentro daquilo que o equipamento pode oferecer em termos de dados. Em três atividades propostas foram realizadas medições como testes para apresentar os resultados que podem ser obtidos. Os dados foram analisados e os resultados foram disponibilizados para consulta. No capítulo 6, final, são feitas algumas considerações sobre os resultados do trabalho.

2 O ENSINO DE FÍSICA E O LABORATÓRIO DIDÁTICO ESCOLAR

O processo de ensinar e aprender constitui um tema bastante antigo, mas ainda pertinente. Discussões sobre concepções relativas ao assunto se estendem por diversos eixos de pensamentos. Obviamente, não é possível delimitar um modo de ver o ensino e aprendizagem e afirmar categoricamente que aquele conceito expressa a verdadeira essência do que realmente são. Viggiano & Mattos (2009) fizeram um levantamento sobre visões, concepções e representações mentais de professores. Eles verificaram, após uma pesquisa direcionada a professores, o quanto ainda permanece presente a relação unívoca, onde o discente assume um papel completamente receptivo, absorvendo como uma esponja o conhecimento (cuja posse está com o professor) à medida que alguém lhe “passa” a informação. Curiosamente, verificou-se ainda que alguns professores tocam em expressões como “reflexão”, “discussão” e “construção”, termos que indicam um modo de pensar o ensino de forma diferente, dentro de uma visão dialógica (visão que se contrapõe a ideia de o aluno se posicionar apenas como receptor de informação, mas todos participam ativamente na construção do seu próprio conhecimento). Ainda outros, de acordo com essa mesma pesquisa, apresentaram modos de pensar classificados pelos pesquisadores como de categoria “duvidosa” uma vez que apresentavam expressões que caracterizavam um pensamento dialógico e, ao mesmo tempo, concepções unívocas. Diante dessas concepções apresentadas a questão é: Como relacionar o ensino de ciências, mais especificamente o ensino de Física, às diversas formas de ver a relação ensino-aprendizagem?

Segundo Villani & Nascimento (2003), o conhecimento científico apresentado na escola de Ensino Fundamental e Médio é resultado de um complexo processo de transposição acentuada tanto no seu conteúdo como na própria linguagem usada. O conhecimento em Física possui uma linguagem própria, científica, presente em manuais universitários que é bem diferente da linguagem transposta para o Ensino Fundamental e Médio. Entende-se que, para que haja aprendizado, é preciso que o aluno se aproprie da linguagem científica. Pela linguagem é possível estabelecer relações entre os elementos que compõem o conhecimento científico. Nesse contexto, a prática no laboratório tem se mostrado

útil em levar o aluno a montar sua argumentação, ao unir os dados fornecidos pelo roteiro da prática, os conhecimentos teóricos sobre o assunto em questão, os resultados empiricamente fornecidos pelo experimento e a própria carga de conhecimento já presente, inclusive o senso comum. Nesse ponto a linguagem científica, que se apresenta em alguns casos apenas como dados recebidos de um equipamento de laboratório, precisa ser lida e interpretada pelo aluno e interligada com a teoria científica e o senso comum.

[...] podemos dizer que o laboratório didático introduz elementos específicos, que facilitam o reconhecimento do contexto escolar, e aumentam a probabilidade e a necessidade dos alunos utilizarem argumentos mais adequados e completos, cuja estrutura se aproxima mais da estrutura dos argumentos científicos, em suas respostas a problemas e questões escolares. (Villani & Nascimento, 2003).

Experimentos realizados interligados a conceitos físicos cujo resultado seja fornecer dados empíricos dão a oportunidade para o aluno usar esses dados na construção de um argumento, não apenas uma opinião baseada em subjetividade, mas que se baseie em informações objetivas e que possa, dentro do contexto escolar fundamental e médio, corroborar conceitos físicos que se pretende estudar. Embora não se possa afirmar que uma ou outra teoria de ensino e aprendizagem se encaixe melhor, é possível ver que em vários momentos do processo, incluindo o laboratório, seja visualizada a presença de uma ou outra forma de ver o ensino. No contexto escolar os alunos estão em processo de verificação da validade de uma teoria. Desse modo, esse ambiente leva a um ponto no processo que torna inevitável que o aluno seja colocado diante de um conhecimento científico, o que na maioria das vezes é feito por meio de aulas tradicionais e roteiros de práticas de laboratório. Em outro momento, na aquisição de dados, ocorrem várias interações: ora com o equipamento, ora com outros alunos, ora com o professor. Nesse momento ele pode questionar a medida realizada, a forma com que o outro realizou a medição, os possíveis erros cometidos ao medir e buscar a melhor forma de manusear o equipamento, muitas vezes após constatar que os dados obtidos não se aproximam dos resultados previsto pela teoria. Esse momento pode ser compreendido como uma fase em que o processo passa a dialógico, onde todos participam ativamente na construção do conhecimento. O laboratório escolar tem como papel fornecer um

ambiente propício a apropriação de uma linguagem científica, sua interpretação, sua aplicação e, segundo Villani & Nascimento (2003), aumentar “a probabilidade da ocorrência de argumentos, cuja estrutura se aproxime bastante da estrutura dos argumentos científicos”.

3 O PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DA DINÂMICA E A MÁQUINA DE ATWOOD

Conceitos como o de força são fortemente impregnados de concepções baseadas em observações. Até hoje as ideias iniciais formadas sobre o tema possuem tal alicerce. Pensadores como Aristóteles formularam teorias acerca do movimento que, de certa forma, foram suficientes para explicar por um tempo considerável, o movimento dos corpos. No entanto, a teoria construída por ele e outros se baseou em observações de fenômenos que ocorriam em um meio dissipativo, o que limitou bastante suas conclusões. Curiosamente Aristóteles pensou no movimento como sendo *natural*, determinado pela composição do corpo e o oposto ao natural, chamado de movimento *violento*. Em todos os casos ele associou, assim como comumente se faz, o movimento à presença de um agente, no caso do movimento violento, a atuação de força.

Críticos aos conceitos de Aristóteles passaram a incluir os efeitos do ar no movimento. Hiparco, um crítico de Aristóteles, cria em uma força impressa que passava do motor ao movente e, à medida que esse se movia no ar, esse *impetus* interno diminuía. Buridan foi ainda mais longe ao afirmar que, dependendo da quantidade de matéria e da velocidade do corpo, ele receberia maior ou menor quantidade de *impetus* fazendo com que seu movimento apresentasse duração diferente. Segundo ele, um pedaço de madeira e um de ferro, de mesmo tamanho, lançados a mesma velocidade percorreriam distancias diferentes uma vez que o meio teria que dissipar mais do ferro, por ter mais matéria em relação a madeira. Assim ele relacionou a medida do *impetus* a quantidade de matéria e velocidade, algo que posteriormente seria a composição da definição de *momentum* na teoria newtoniana.

Estudiosos do Merton College, em Oxford, apresentaram uma distinção entre a Cinemática (efeito espaço-temporal do movimento) e a Dinâmica (causas do movimento). Definiram velocidade instantânea levando ao conceito de aceleração que viria a ser fundamental na descrição newtoniana da força.

3.1 Newton e o conceito de força.

Antes de apresentar sua teoria sobre movimento, Newton apresenta oito definições¹ que constituem a base de sua Dinâmica. Entre elas ele define a *Quantidade de Matéria* como uma grandeza obtida a partir do seu volume e da sua densidade e também define a *Quantidade de Movimento* como a medida obtida a partir da quantidade de matéria e a velocidade do corpo. Curiosamente, para Newton, a inércia apresenta-se como uma *vis insita*, ou uma força interna à matéria que atua apenas quando uma força externa busca mudar o estado do corpo. Para Newton, existia uma proporcionalidade entre a quantidade de matéria e a força inercial e que, para vencer a força inercial e alterar o estado do corpo, a força impressa teria uma relação com a quantidade de matéria do corpo. Partindo das duas definições, Newton pode então enunciar o que ficou conhecido com A Segunda Lei de Newton, ou O Princípio Fundamental da Dinâmica: “A mudança de movimento é proporcional a força motora impressa e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é impressa” (NEVES, 2000).

A partir dessa lei, em 1747, Euler escreveu as equações diferenciais que hoje conhecemos, e que são produto da Segunda Lei de Newton. Para corpos com massa constante as equações são:

$$m_k \cdot \ddot{x}_k = F_k$$

Onde \ddot{x} é a derivada segunda da posição em relação ao tempo e F_k é a k-ésima força aplicada no k-ésimo corpo de massa m .

Professores, livros, apostilas e tantos outros apresentam essas equações como sendo a Segunda Lei de Newton quando, na realidade, elas não foram escritas por ele, apenas surgiram quase um século depois como resultado de uma formalização matemática. A função $x(t)$ da Cinemática para um corpo que se desloca em linha reta partindo da posição inicial \mathbf{x}_0 , com velocidade inicial \mathbf{v}_0 e aceleração constante \mathbf{a} , ao longo do eixo \mathbf{x} , é:

¹ Para uma abordagem mais detalhada veja “UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE A NATUREZA DO MOVIMENTO ou SOBRE UMA HISTÓRIA PARA A NOÇÃO DO CONCEITO DE FORÇA” de Marcos Cesar Danhoni Neves, publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol 22, n. 4, .543, Dezembro, 2000.

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

Substituindo a função $x(t)$ na equação diferencial:

$$m \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \right) = F$$

Derivando a primeira vez:

$$m \cdot \frac{d}{dt} (v_0 + at) = F$$

Derivando mais uma vez resulta:

$$m \cdot a = F$$

A derivada de segunda ordem da função $x(t)$ é a aceleração a . Assim, a equação assume a forma amplamente conhecida e utilizada em livros didáticos de Ensino Médio e Fundamental. A equação $F = m \cdot a^2$ é amplamente aplicada nas mais diversas soluções de problemas físicos envolvendo força em sistemas que aceleram. Dentre as várias aplicações uma, em especial, será o foco de uma consideração mais detalhada: a Máquina de Atwood.

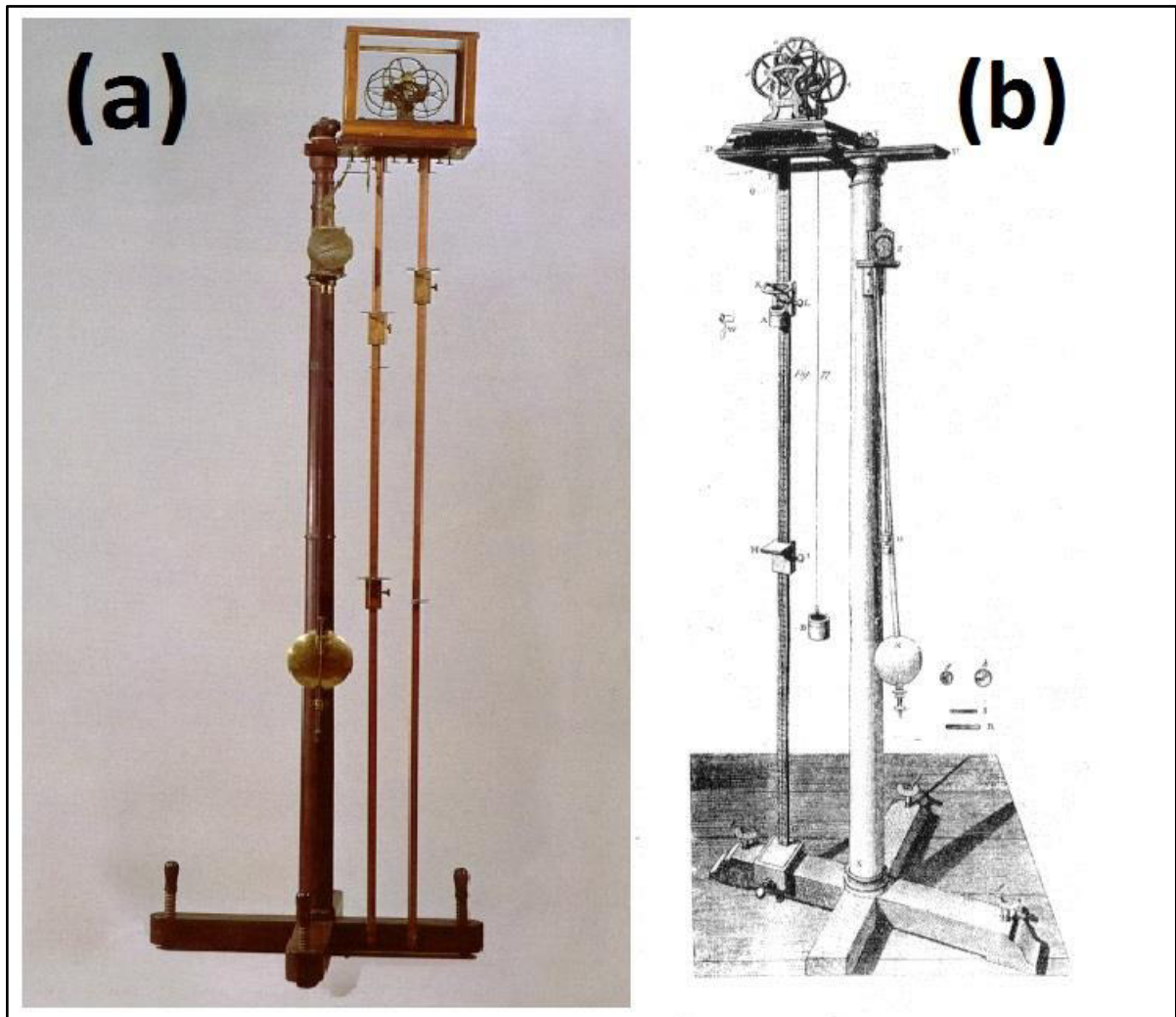
3.2 A Máquina de Atwood.

No final do século XVIII, George Atwood construiu uma máquina que viria a ser, durante pelo menos dois séculos, o principal instrumento para estudo da relação entre o espaço percorrido por um móvel e o tempo para percorrê-lo. Sabe-se que a máquina possui amplos usos no estudo do movimento, principalmente na Dinâmica, por trabalhar com massas, forças e momento de inércia. Hoje, pode-se usar a máquina para estudo dos movimentos retilíneos uniformemente variados, determinação da aceleração da gravidade, do momento de inércia de discos e o estudo do Princípio Fundamental da Dinâmica ou Segunda Lei de Newton. A máquina permite verificar a relação linear entre a força impressa no sistema e a

² Como as massas em uma Máquina de Atwood realizam movimento unidimensional será omitido o caráter vetorial da equação.

aceleração por ele adquirida, bem como comparar o resultado de aceleração obtida tanto pela Cinemática quanto pela Dinâmica. A Figura 01 mostra um exemplar da Máquina de Atwood construída em meados de 1788 e que se encontra em exibição no Museu de Física da Universidade de Coimbra, em Portugal.

Figura 01 – Máquina de Atwood do século XVIII.

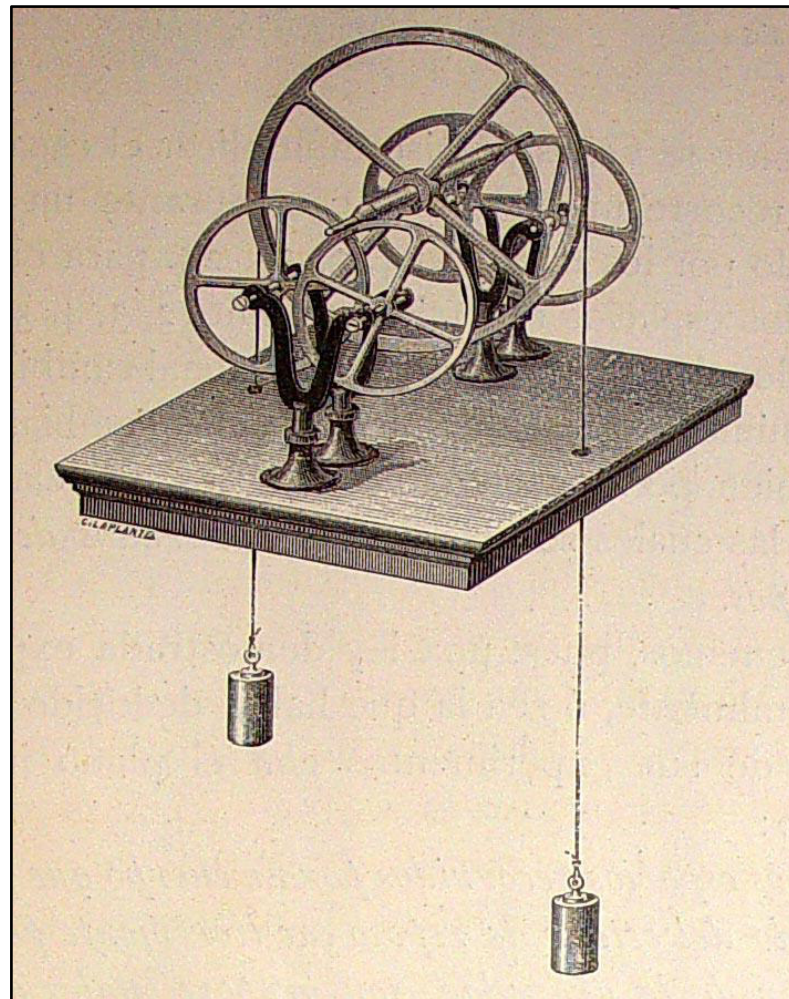


Fonte: Museu de Física da Universidade de Coimbra disponível em: <http://museu.fis.uc.pt/5.htm>, capturada em 12 de julho de 2018.

A Figura 01-b apresenta de forma mais perceptível as partes que compõem a máquina. O eixo central vertical, de diâmetro maior sustenta toda estrutura onde se encontra na parte superior a roldana principal, por onde passa o fio que liga as massas. A roldana principal tem seu eixo apoiado sobre duas

roldanas secundárias. Dessa forma o eixo não sofre ação direta de atrito, salvo o próprio rolamento sobre a roldana. Apenas os eixos das roldanas secundárias sofrem atrito em seus encaixes, mas compensado pelo torque devido ao próprio diâmetro das mesmas. Essa estrutura funciona como uma espécie de rolamento, mas com discos que são inseridos para redução dos efeitos do atrito e vazados para que o momento de inércia não seja significativo a ponto de inserir erros consideráveis nas medidas. A Figura 02 mostra a montagem das roldanas.

Figura 02 – Montagem das roldanas secundárias e a roldana principal ao centro.



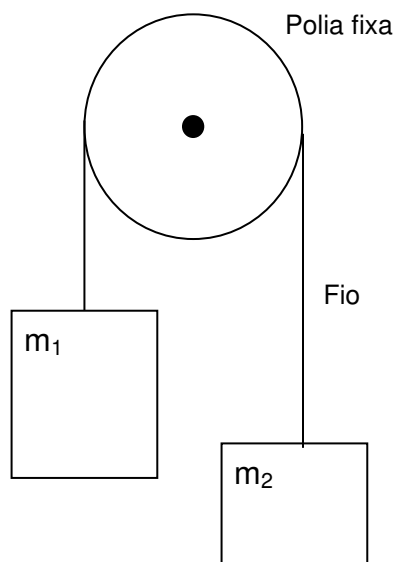
Fonte: El Mundo Físico: Gravedad, Gravitación, Luz, Calor, Electricidad, Magnetismo, etc. / A. Guillemin. - Barcelona Montaner y Simón, 1882. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:El mundo f%C3%ADsico,_1882_%22Polea_de_la m%C3%A1quina_de_Atwood%22._\(4031745804\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_mundo_f%C3%ADsico,_1882_%22Polea_de_la_m%C3%A1quina_de_Atwood%22._(4031745804).jpg), Capturado em 12 de julho de 2018.

O tempo é medido através de um relógio de pêndulo instalado no próprio equipamento. Na Figura 01-b é possível identificar o pêndulo, formado por uma esfera presa por uma haste fina ao relógio, que se encontra fixado na coluna principal de sustentação. A cada segundo o relógio emite um sinal sonoro. A máquina ainda dispõe de réguas graduadas em polegadas e subdividida em décimos de polegada, com escala variando de zero a 72. Os corpos são discos de latão com 4,4 cm de diâmetro.

3.3 Análise Mecânica da Máquina de Atwood.

Após a análise estrutural da Máquina de Atwood, uma análise a luz da Mecânica será desenvolvida a partir de agora. Pode-se esquematizar de forma simplificada, com objetivo didático, a máquina de acordo com a Figura 03:

Figura 03 – Esquema da máquina de Atwood.



Fonte: O próprio autor.

Isolando a massa m_2 para estudo e considerando que o fio que une as massas é inextensível, pode-se calcular a aceleração da massa partindo das seguintes condições:

- a) A massa acelera com aceleração vertical, para cima (sentido positivo);
- b) A posição inicial é nula (origem do sistema de referências);
- c) A velocidade inicial é nula (parte do repouso).

A equação da posição, escrita para o eixo y , vertical, com sentido positivo para cima, será:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}at^2$$

Aplicando as condições, a equação fica:

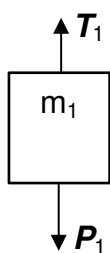
$$y = \frac{1}{2}at^2$$

Isolando a aceleração:

$$a = \frac{2y}{t^2}$$

Essa equação permite calcular a aceleração do sistema conhecendo ou estipulando a altura y e medindo o tempo que o corpo leva para chegar até ela.

De forma paralela, a aceleração do sistema poderá ser obtida a partir da Dinâmica. Considerando que a polia tem uma massa desprezível em relação as massas m_1 e m_2 e que o fio que liga as massas também possui massa muito pequena e, ainda, desprezando os efeitos do atrito, pode-se aplicar a Segunda Lei de Newton ao sistema. Para cada massa escreve-se, considerando que m_1 é maior que m_2 :



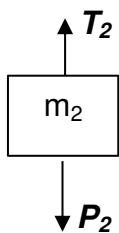
$$F_{R1} = m_1 \cdot a \quad (01)$$

$$P_1 - T_1 = m_1 \cdot a \quad (02)$$

Onde P_1 e T_1 são peso e tração do fio aplicados ao corpo de massa m_1 . O peso pode ser escrito como função da massa e da aceleração da gravidade local o que faz a equação 02 tomar a seguinte forma:

$$m_1 \cdot g - T_1 = m_1 \cdot a \quad (03)$$

Analisando o corpo de massa m_2 :



$$F_{R2} = m_2 \cdot a \quad (04)$$

Como a massa m_2 é menor que a massa m_1 ela irá acelerar para cima, de modo que é possível concluir que T_2 é maior que P_2 . A equação para a resultante no corpo fica:

$$T_2 - P_2 = m_2 \cdot a \quad (05)$$

Novamente, escrevendo o peso como função da massa e da aceleração da gravidade local, a equação 05 fica:

$$T_2 - m_2 \cdot g = m_2 \cdot a \quad (06)$$

Considerando a aceleração dos corpos igual, em módulo, partindo da afirmação que o fio que os une é inextensível. Combinando as equações 03 e 06 obtemos:

$$m_1 \cdot g - T_1 + T_2 - m_2 \cdot g = m_1 \cdot a + m_2 \cdot a \quad (07)$$

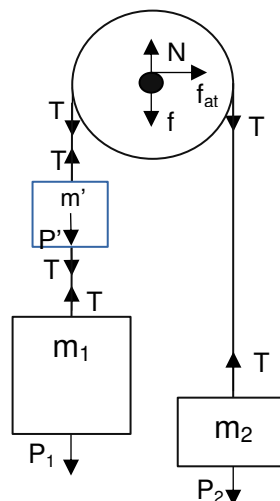
Reagrupando os termos e considerando que as trações T_1 e T_2 são iguais em módulo e que, nessas circunstâncias, elas se anulam na equação, o resultado final será:

$$a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} \cdot g \quad (08)$$

Através da equação 08 se obtém o módulo da aceleração do sistema conhecendo-se as massas e a aceleração da gravidade, obtida a partir do Princípio Fundamental da Dinâmica, para a Máquina de Atwood. Como a ideia é realizar medições, é importante levar em conta fatores que não foram considerados ao se chegar a essa equação. Admitindo que o sistema esteja sob ação de atrito no eixo da roldana, que a massa da roldana não é insignificante e a massa do fio que liga os corpos também não é, torna-se necessária uma reformulação na equação 08. Evidentemente, uma equação que é função da força de atrito e do momento de inércia da roldana, juntamente com a massa do fio, se tornaria uma equação complexa, especialmente para ser usada em experimento no laboratório escolar de Ensino Médio. No entanto, com uma solução simples, é possível se chegar a uma equação simples que se harmonize com os resultados experimentais.

O sistema precisa se mover de modo que o atrito não o desacelere. Uma solução simples seria, no lado de maior massa, inserir uma massa extra para que a mesma acrescentada ao sistema uma força no mesmo sentido da aceleração e que seja, em módulo, próximo ao módulo da força de atrito que acelera negativamente o sistema. Resumindo, uma força é acrescentada para anular o efeito da força de atrito, e não só o efeito da força de atrito, mas da inércia rotacional da roldana. A Figura 04 mostra como ficaria o sistema com a massa extra de compensação e a representação vetorial das forças que atuam no sistema.

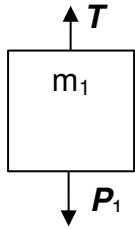
Figura 04 – Máquina de Atwood com massa de compensação m' .



Fonte: O próprio autor.

Diante dessa nova configuração é necessário reanalisar o sistema com base na Segunda Lei de Newton e chegar a uma nova equação que permita calcular sua aceleração.

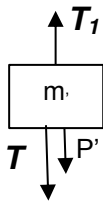
Para o corpo m_1 :



$$P_1 - T = m_1 \cdot a \quad (09)$$

$$m_1 \cdot g - T = m_1 \cdot a \quad (10)$$

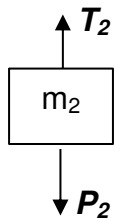
Para a massa de compensação m' :



$$P' + T - T_1 = m' \cdot a \quad (11)$$

$$m' \cdot g + T - T_1 = m' \cdot a \quad (12)$$

E para a massa m_2 :



$$T_2 - P_2 = m_2 \cdot a \quad (13)$$

$$T_2 - m_2 \cdot g = m_2 \cdot a \quad (14)$$

Na polia atua a tração T_1 , a força de atrito f_{at} e a tração T_2 . A soma dos torques de cada uma dessas forças pode ser escrita como:

$$\tau_1 - \tau_2 - \tau_{at} = I\alpha \quad (15)$$

$$\tau_1 - \tau_2 = I\alpha + \tau_{at} \quad (16)$$

Da equação 16 conclui-se que há desigualdade entre T_1 e T_2 uma vez que ambas produzem torque em relação ao centro da roldana com mesmo raio e com valores diferentes visto que o termo à direita da equação não se anula. A condição para anular o termo da direita seria massa desprezível da roldana ($I=0$) e atrito nulo.

Somando as equações 10, 12 e 14:

$$m_1 \cdot g - T + m' \cdot g + T - T_1 + T_2 - m_2 \cdot g = m_1 \cdot a + m' \cdot a + m_2 \cdot a$$

Reagrupando os termos:

$$m_1 \cdot g - T + m' \cdot g + T - T_1 + T_2 - m_2 \cdot g = (m_1 + m' + m_2)a$$

$$m' \cdot g - T_1 + T_2 + m_1 \cdot g - m_2 \cdot g = (m_1 + m' + m_2)a$$

$$m' \cdot g - (T_1 - T_2) + (m_1 - m_2)g = (m_1 + m' + m_2)a \quad (17)$$

Na equação 17 os termos T_1 e T_2 foram inseridos em um parêntesis. Mas o termo $m' \cdot g$ não foi incluído no agrupamento das massas. Isso é necessário uma vez que o termo $(T_1 - T_2)$ não é nulo. Dessa forma o termo $m' \cdot g$ terá como função anular esse termo. Se $m' \cdot g$ for igual a $(T_1 - T_2)$ eles se anulam e a equação ficará:

$$(m_1 - m_2)g = (m_1 + m' + m_2)a \quad (18)$$

$$a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2 + m')} \cdot g \quad (19)$$

A equação 19 é muito semelhante à equação 08 com a inclusão da massa m' no cálculo da massa total do sistema! Portanto, o uso da massa de compensação se torna altamente viável quando comparado a complexidade do mecanismo para redução de atrito. A questão é: Como determinar a massa m' ?

A determinação de m' para o experimento é algo relativamente simples, mas requer cuidados para minimizar erros experimentais. A obtenção de m' é um processo totalmente experimental. Requer percepção aguçada para concluir sobre a constância de um movimento e alterar a massa até obter o movimento uniforme. Usar o próprio cronômetro e o sensor para determinar a constância do movimento seria uma opção não recomendada por se tratar de uma aproximação que facilmente pode ser alterada por uma simples lubrificação do eixo da roldana. Embora se requeira uma boa aproximação, não há necessidade de se levar a tanto. Uma verificação visual da uniformidade do movimento normalmente já é o suficiente. Vale

ainda ressaltar que a massa m' dependerá também da massa total do sistema. Isso acontece por que a medida que a massa total aumenta, mesmo que a diferença de massa entre m_1 e m_2 seja mantida, a força aplicada pela roldana, que sustenta todo o conjunto no seu eixo, será cada vez maior. O eixo, por sua vez, sustenta o conjunto aplicando uma força Normal na roldana que é proporcional ao peso total. Como o atrito depende diretamente da força Normal então uma massa total maior irá gerar um atrito maior. De acordo com a equação 16, o torque da força de atrito aumenta (último termo da equação) gerando um aumento na diferença entre T_1 e T_2 . Essa diferença terá que ser novamente compensada ajustando o valor de m' para um valor maior. Esse resultado mostra que cada conjunto de massas terá a sua própria massa de compensação não sendo possível usar a mesma massa quando a massa total do sistema é alterada ou usar a mesma massa em outro equipamento construído de forma diferente. Trabalhar com a máquina mantendo sua massa constante resulta em uma simplificação considerável visto não ser necessário, para cada experimento, determinar a nova massa m' .

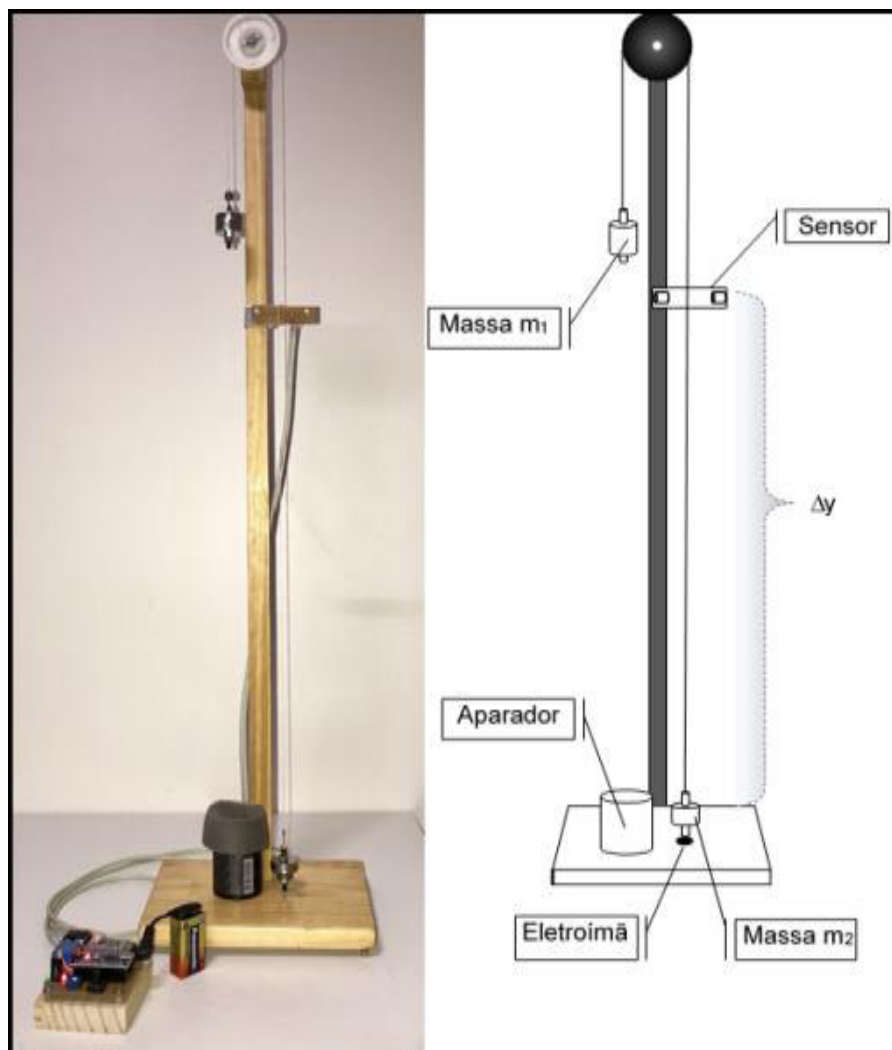
Os resultados obtidos mostram-se coerentes. O sistema acelera e a sua massa total, de acordo com a dinâmica newtoniana, é um parâmetro que tem relação com sua inércia. Como já mencionado no capítulo 2, uma força aplicada ao sistema deve ser diretamente relacionada a sua massa para atuar de modo a vencer a “força inercial”. Desse modo a inclusão da massa m' é fundamental no cálculo da aceleração. Todavia, a mesma não foi incluída no termo onde se calcula a diferença de massa. A explicação é simples: a diferença de massa tem relação direta com a força resultante que atua no sistema. Lembrando que a massa m' é uma compensação e que ela tem como função anular outras interações então para a resultante atuante no sistema ela não aparece visto ter sido anulada por outras interações.

Na sequência será feita uma pormenorização necessária acerca da construção do equipamento. Detalhes relevantes serão considerados no capítulo seguinte. A concepção e montagem do equipamento tem importância significativa no objetivo desse trabalho. A partir dele e em torno dele se desenvolve uma sequência didática em busca de um resultado educacional. Portanto será dada uma atenção especial à montagem da Máquina de Atwood usada no projeto.

4 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE ATWOOD

Conforme apresentado no capítulo anterior, a Máquina de Atwood é um dispositivo de relativa simplicidade e de grande importância no estudo experimental das leis que governam as relações entre espaço-tempo e as concepções dinâmicas de força, massa e momento de inércia. A Figura 05 apresenta um modelo fabricado manualmente mesclando peças produzidas artesanalmente com peças que podem ser adquiridas em pontos de venda específicos. À direita há um esquema apresentando as partes mecânicas principais além do sensor e eletroímã.

Figura 05 – Máquina de Atwood de fabricação parcialmente artesanal



Fonte: O próprio autor.

No circuito de controle do equipamento estão a plataforma Arduino Nano, módulo relé, módulo *bluetooth* e alguns componentes cujo detalhamento será feito posteriormente. Na placa de circuito foi adicionado um botão para início do experimento. Como o equipamento permite conexão *bluetooth* com dispositivos móveis, o controle do mesmo pode ser feito por um aplicativo terminal. Embora existam opções, o aplicativo *Bluetooth Terminal HC-05* foi desenvolvido especialmente para interagir com o módulo HC-05 e está disponibilizado para instalação, gratuitamente, na loja de aplicativos do sistema *Android*. Depois de instalado o aplicativo, realizar o emparelhamento do HC-05 com o dispositivo móvel. Uma vez emparelhados, ao abrir o aplicativo ocorrerá a conexão automática entre eles. O *LED* vermelho, presente no próprio módulo, deixará de piscar rapidamente e passará a piscar em intervalos maiores indicando a conexão.

O funcionamento se dá pressionando o botão **INICIAR** ou digitando **s** no terminal do aplicativo e enviando via *bluetooth*. O eletroímã é acionado e retorna à tela do aplicativo a mensagem **Ligado**, estando pronto para prender a massa m_2 em sua posição inicial (ver Figura 05). Após prender a massa m_2 ao eletroímã, pressionando o botão **INICIAR**, ou enviando novamente o caractere **s**, o eletroímã será desligado iniciando o movimento e a contagem do tempo. Como a massa m_1 é maior que m_2 , o sistema adquire aceleração de modo que a massa m_2 irá subir enquanto m_1 irá descer. Quando m_2 passar pelo fotossensor, a contagem de tempo para e o Arduino irá enviar para a tela do aplicativo o intervalo de tempo desde o início do movimento até o momento de passagem de m_2 pelo sensor. Medindo a distância Δy , conforme a Figura 05, que corresponde ao deslocamento da massa m_2 , e conhecendo o intervalo de tempo, pode-se aplicar a equação da Cinemática para o Movimento Retilíneo Uniformemente Variado que relaciona deslocamento, velocidade inicial (que no caso é nula) e tempo para calcular a aceleração da massa m_2 , que é a própria aceleração do sistema.

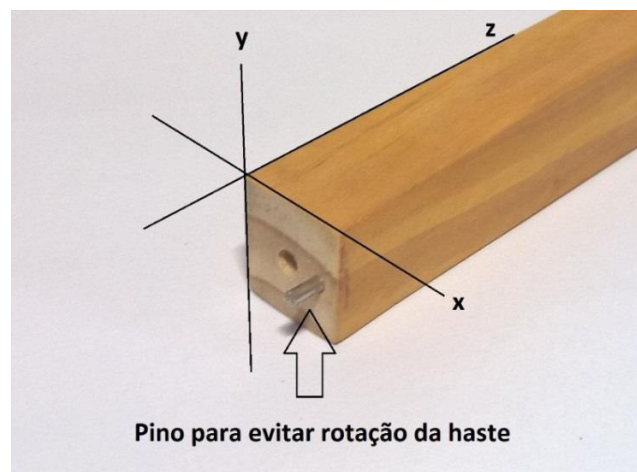
Nas seções que seguem são dadas algumas orientações sobre a construção das partes da máquina. No decorrer da descrição há a preocupação em apresentar a ideia central de cada componente, ficando a escolha do material alternativo determinado pelas circunstâncias ou preferências do construtor.

4.1 – Estrutura de sustentação

O primeiro passo para a construção do equipamento é idealizar e executar uma estrutura de sustentação central. A escolha de materiais é o primeiro fator a ser levado em conta. A justificativa para esse cuidado se deve ao fato de a escolha repercutir favorável ou desfavoravelmente no funcionamento do experimento ou na otimização da montagem. O material deve apresentar uma rigidez que mantenha o equipamento relativamente estável durante seu funcionamento. Para isso, tanto a base quanto a haste que sustenta a polia deve ser de material com pouca torção. Para exemplificar, esses poderiam ser feitos de madeira, MDF³ ou metais. Materiais plásticos poderiam ser usados, como tubos de PVC para a haste, sempre verificando se o seu comprimento não tornaria a haste flexível.

O segundo passo é realizar o corte da coluna central de sustentação de modo que a sua montagem sobre a base plana seja o mais perpendicular possível à mesma e que possua rigidez de torção. A Figura 06 mostra uma haste de madeira já cortada com os eixos de referência perpendiculares entre si. Na mesma figura é possível ver o pino acrescentado para evitar rotação da haste.

Figura 06 – Haste com pino e eixos referenciais de corte.



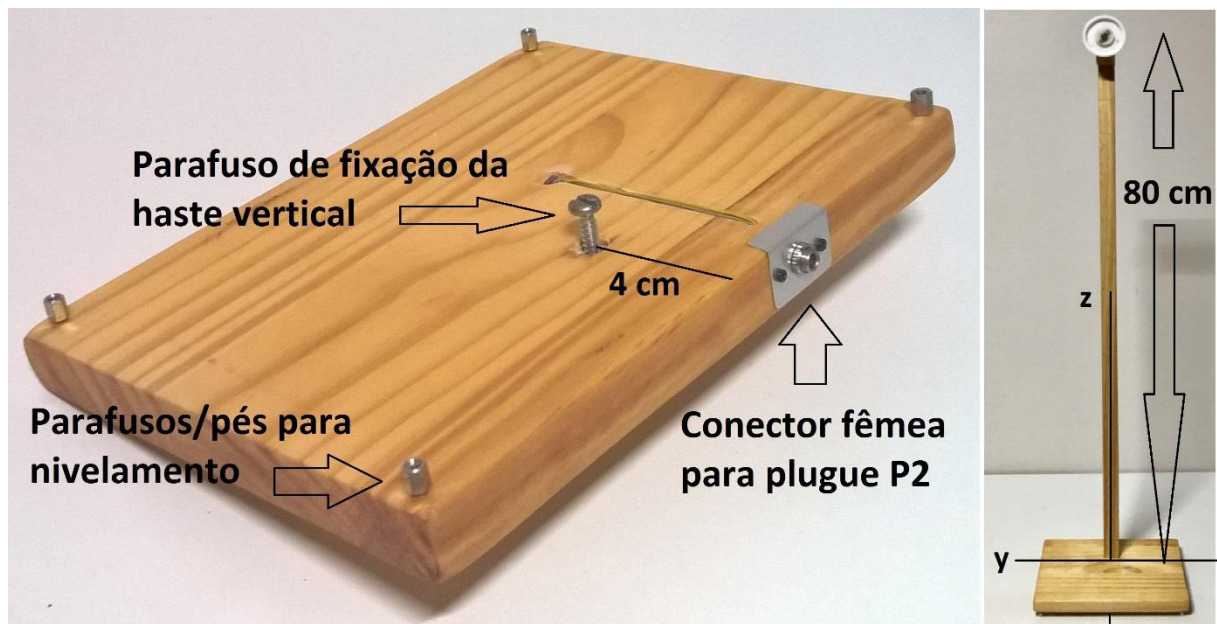
Fonte: O próprio autor

³ MDF é a sigla para *Medium Density Fiberboard* e se refere a um material derivado da madeira formado por fibras bem finas de madeira aglutinadas com resina e cera prensadas para formar tábuas.

Para que a haste fique aproximadamente perpendicular à superfície da base os eixos x e z e os eixos y e z devem ser mutuamente perpendiculares.

A base feita em madeira tem 20 cm de largura com uma profundidade de 15 cm e 1,8 cm de espessura. Como se trata de pinus, essa madeira possui textura macia facilitando o trabalho de lixamento, corte e moldagem. Dessa forma foi possível fazer um sulco na parte inferior para passagem dos fios do eletroímã e a cavidade para receber o conector fêmea. A Figura 07 mostra a base com vista inferior, a distância do parafuso central até o fundo da peça, o eletroímã cravado na madeira sob pressão e os pés que servem para nivelamento. Esses pés são parafusos de fixação de componentes seriais de computador reaproveitados. O eletroímã fixo à base tem a função de prender a massa em sua posição inicial e soltar a mesma para início do movimento. Os pés niveladores permitem ajuste para evitar que a massa realize um movimento pendular durante o seu movimento de subida.

Figura 07 – Vista inferior da base e conjunto base-haste-roldana montados.

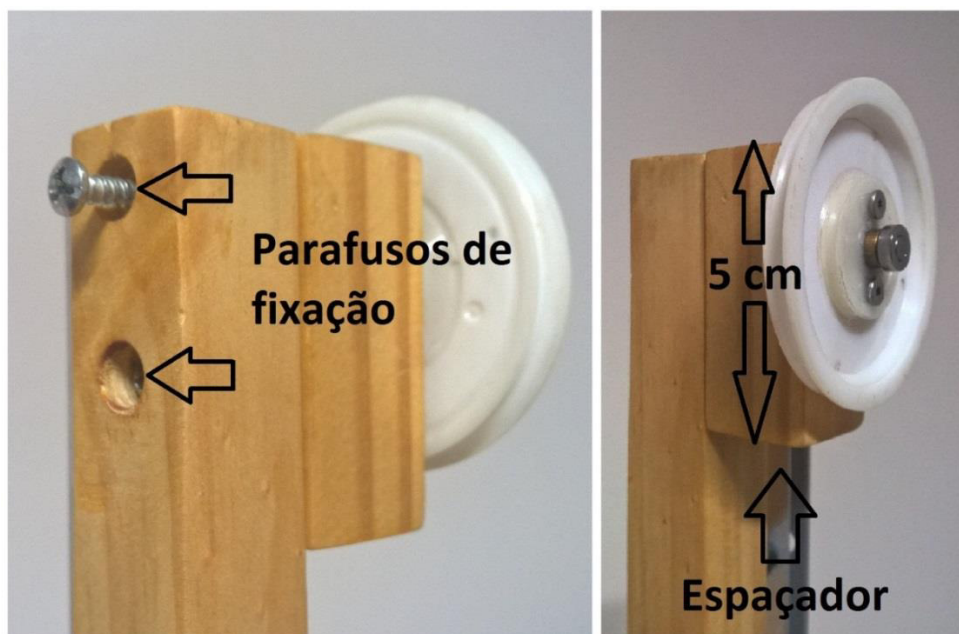


Fonte: O próprio autor

Ainda na Figura 07, pode-se ver a haste fixada em sua base. Os eixos z e y foram acrescentados à figura para dar uma ideia de como esses componentes devem ficar posicionados. Os eixos devem ficar o mais perpendicular possível entre si. Todos os furos foram feitos com broca para madeira nas medidas aproximadas dos parafusos que seriam usados. Para parafusos que precisam de passagem livre pela peça, como é o caso do que passa pela base e se prende à haste, a passagem pela base deve ser livre, portanto usa-se broca de diâmetro um pouco maior que o parafuso. No caso onde o parafuso precisa fixar usa-se broca de diâmetro menor. Assim ele penetra com certo aperto na madeira garantindo uma fixação adequada.

Na parte superior da haste encontra-se fixada a roldana. Esse componente fundamental do equipamento requer cuidados especiais na sua construção. Antes de entrar nesse campo, primeiro uma descrição da parte superior da haste e fixação do eixo da roldana. A Figura 08 mostra uma peça adicional que faz o elo entre a haste e a roldana. Sua presença é fundamental para que haja um espaço de trabalho evitando que as massas entrem em contato com a haste durante o movimento. Trata-se da mesma madeira em que foi feita a haste, mas com comprimento de aproximadamente 5 cm.

Figura 08 – Detalhes do espaçador/suporte da roldana



Fonte: O próprio autor

4.2 – Roldana (polia)

Esse componente importante requer cuidados especiais na sua construção. A escolha da roldana deve ser feita levando em conta o seu diâmetro e o material de construção. A usada no equipamento tem aproximadamente 5,25 cm de diâmetro, feita em material plástico bem leve e resistente. Foi retirada de equipamento eletrônico. Talvez seja o item mais complexo de ser localizado, mas casas de vendas de componentes eletrônicos não raro apresentam opções. Caso não esteja disponível, visitas em oficinas de eletrônicos podem ser suficientes para localizar uma que se encaixe no projeto ou mesmo, em última instância, adquirir em *sites* de vendas de produtos para robótica. Existem modelos comerciais, como mostrado na Figura 09, com valor acessível caso seja preferida a aquisição por compra.

Figura 09 – Roldana (polia) comercial da marca Tamiya de 50 mm de diâmetro

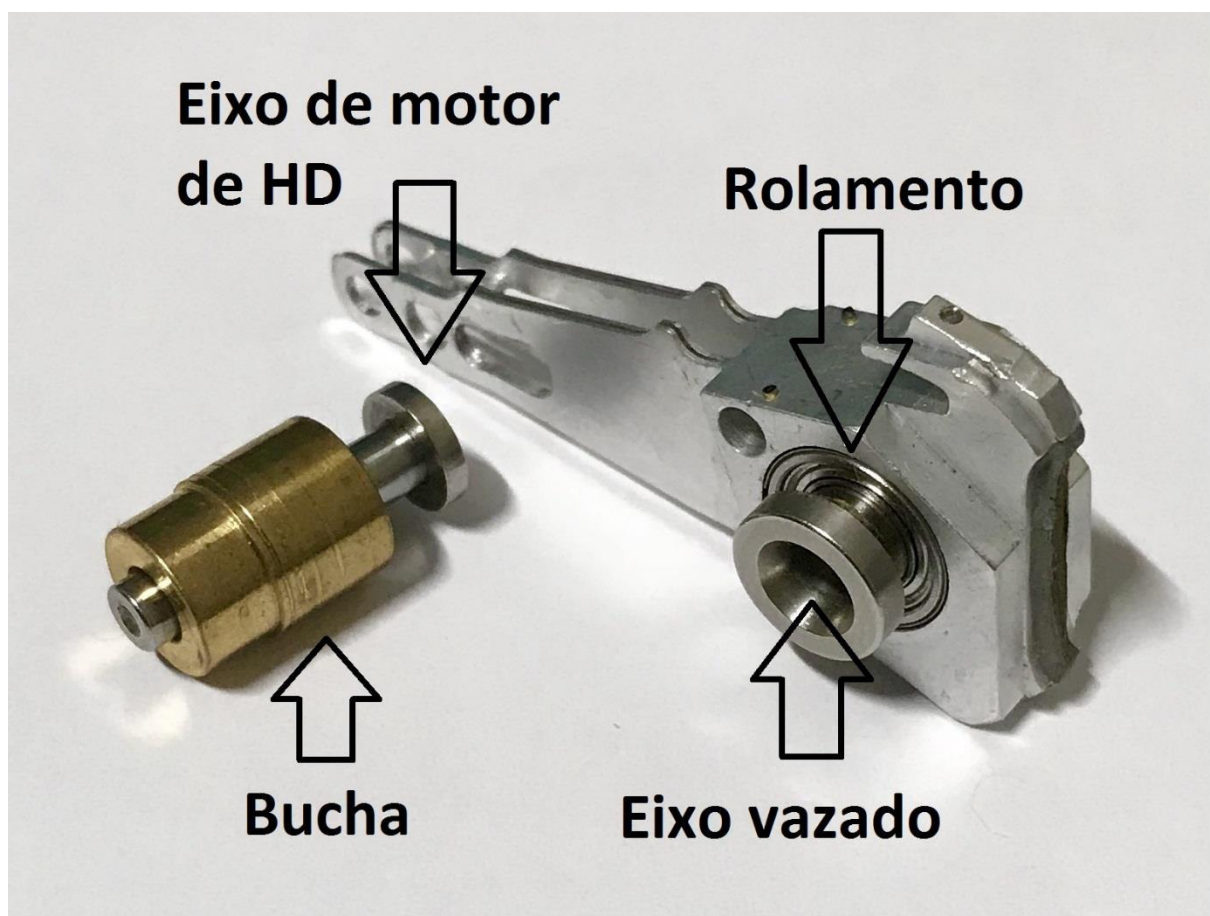


Fonte: <https://www.amazon.com/Tamiya-70141-Pulley-L-Set/dp/B001VZHRVI>. Capturado em: 19 jul. 2018.

Identificada uma polia que possa ser usada, o próximo passo é o sistema de montagem composto pelo seu eixo e sua respectiva bucha. No projeto foi usado um eixo extraído de um disco rígido de computador. O motor central que gira o

disco, após desmontagem cuidadosa, apresenta um eixo central que gira com grande liberdade em uma bucha. Como o eixo coincidentemente encaixou em uma bucha de latão retirado de outro componente eletrônico não foi preciso usar mais componentes do motor do disco rígido. Como se trata de uma montagem com reaproveitamento de peças, é preciso testar eixos e possíveis buchas até encontrar um par que se encaixe perfeitamente com pouca folga e deslizamento suave.

Figura 10 – À esquerda, uma bucha e eixo de motor de disco rígido (HD) e, à direita, um braço leitor de HD montado com rolamento e um eixo central vazado.



Fonte: O próprio autor.

Como opção pode ser incluído o eixo com rolamento do braço do leitor do disco rígido. Ele possui eixo vazado que permite inserir um parafuso para fixação da polia. Se optar pela extração do eixo junto com o rolamento da estrutura original o processo deve ser feito cuidadosamente (ver Figura 10). Deve-se evitar fazer a

extração através de impactos para não danificar o rolamento. Embora não seja esteticamente uma boa opção, a manutenção do sistema montado seria uma maneira de evitar correr risco de danificar o rolamento e ainda aproveitar uma peça que já recebe o conjunto rolamento-eixo e que pode ser parafusada à haste. Para exemplificar, a Figura 11 mostra uma montagem com uma polia pequena. A estrutura do braço foi mantida sem extrair o rolamento e o eixo. Para melhor visualização foi presa a uma morsa e colocados pequenos pesos. A fixação da roldana foi feita com um parafuso atravessando o eixo e uma porca na outra extremidade.

Figura 11 – Opção de montagem da roldana usando a articulação do braço leitor de disco rígido de computador.



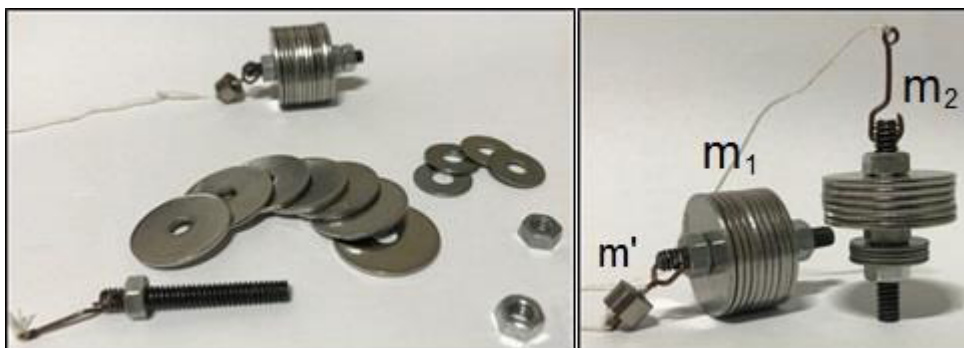
Fonte: O próprio autor

Alguns modelos de eixos não são perfurados totalmente de um lado a outro, mas a maioria deles possui perfuração parcial com rosca. Desse modo, pode-se fixar a polia com um parafuso compatível com a rosca do eixo dispensando a aquisição de um parafuso longo e porca.

4.3 – Massas

As massas que compõem o sistema constituem um aspecto muito importante na realização do experimento. Maiores detalhes sobre sua influência nos resultados serão considerados na seção 4.7. Cada massa, m_1 e m_2 , foi concebida para ser facilmente construída e ajustada conforme a necessidade. A massa m_1 é formada por dez arruelas de aço inox, com aproximadamente 5,0 gramas cada uma, montadas em um parafuso e presas por duas porcas. O conjunto tem massa de 60,5 gramas, incluindo 2,0 gramas da massa m' . A massa m_2 , com 43 gramas, tem montagem semelhante à massa m_1 , porém, com seis arruelas. Além das arruelas fixas, quatro arruelas, com aproximadamente 1,0 grama cada uma, foram adicionadas à massa m_2 . As arruelas menores são responsáveis pela variação na diferença de massa entre m_1 e m_2 . A Figura 12 mostra os componentes e os conjuntos montados.

Figura 12 – Componentes e massas montadas.



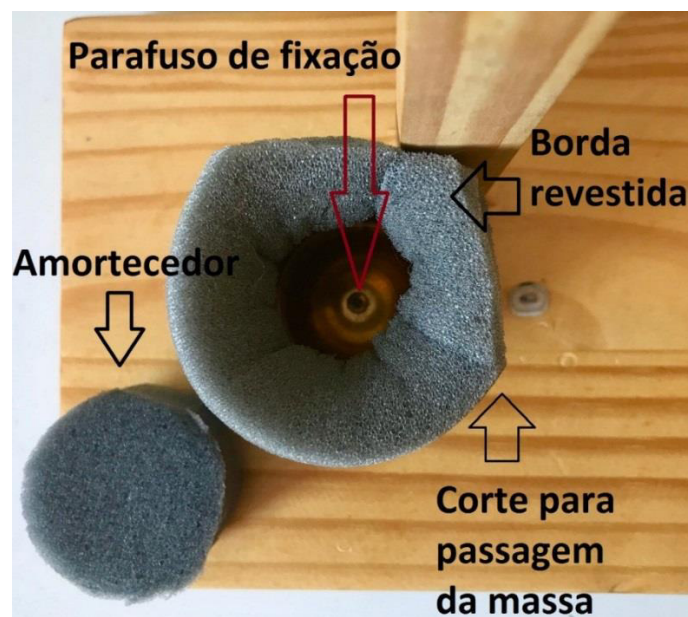
Fonte: O próprio autor.

O lado direito da Figura 12 apresenta os conjuntos montados. A massa m_1 , com o acréscimo da massa m' , e a massa m_2 , com as arruelas menores. O fio que liga as massas é uma linha de algodão Nº 10. A terceira porca, adicionada aos dois conjuntos, servirá para fixar as arruelas menores.

4.4 – Copo coletor

O copo coletor é uma estrutura feita para receber o impacto, absorver e reter a massa que desce acelerada e que se chocaria com a base do equipamento. Ele foi construído a partir de uma lata de desodorante *spray* que foi cortada aproximadamente a uma altura de 6 cm, medido a partir de sua base, e revestida na borda por uma esponja comum, colada com cola de secagem rápida. A borda serve para direcionar a massa ao centro do copo e evitar que, ao entrar, a massa seja lançada para fora pelo amortecedor de esponja. A Figura 13 apresenta uma visão superior do copo coletor. O amortecedor feito de esponja encontra-se fora do copo para permitir a visualização do parafuso de fixação.

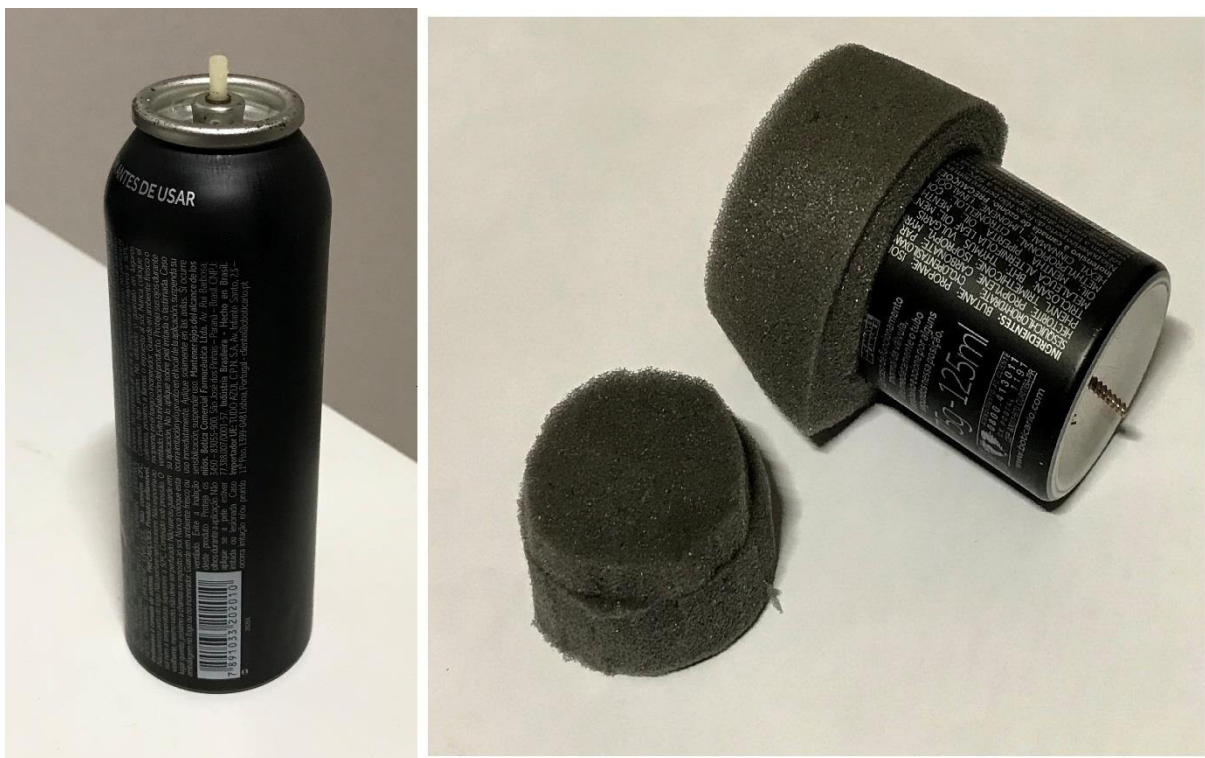
Figura 13 – Vista superior do copo coletor



Fonte: O próprio autor

O corte lateral na esponja que reveste a borda foi feito para que a massa, ao deixar o eletroímã logo à direita do copo (ver Figura 13), não colida com a própria esponja. Percebe-se, ainda, que o orifício central de passagem da massa possui diâmetro semelhante ao diâmetro dos discos das massas usadas. Isso permite que a massa penetre, mas que ela tenha dificuldades para sair após o impacto. Mas não deve impor dificuldades para retirada após a realização do experimento.

Figura 14 – Lata usada para fabricação e visão em diagonal do copo. Esponja amortecedora e parafuso de fixação.



Fonte: O próprio autor

Existem opções de embalagens que podem ser usadas. O recipiente mostrado na Figura 14 foi escolhido por possuir diâmetro compatível com as medidas do equipamento e estar facilmente disponível no momento. Por se tratar de um objeto cujo conteúdo é expelido por diferença de pressão, existem cuidados que precisam ser tomados ao perfurar sua estrutura. O fato de ter sido descartado como lixo pode significar que esteja vazio quanto ao produto, mas não significa que o gás não esteja mais sob pressão. Portanto, antes de realizar qualquer corte ou furo no

corpo da lata, acionar a válvula até que não haja mais gás comprimido em seu interior.

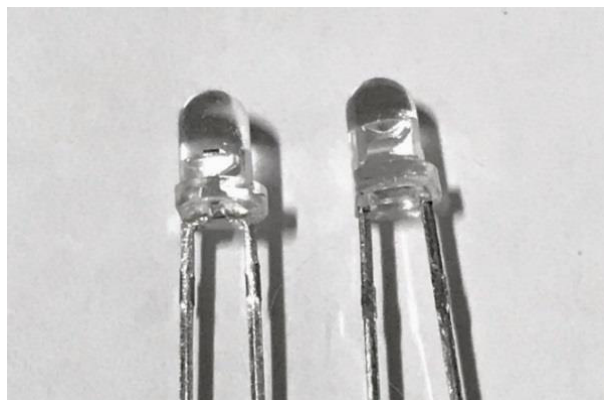
4.5 – Sensor

A descrição da construção do sensor será subdividida em dois subtemas: a parte eletrônica, envolvendo componentes e placa de circuito e a parte física, envolvendo posicionamento e fixação.

4.5.1 – Eletrônica do sensor

O sensor aqui usado é formado por um par de componentes eletrônicos onde um deles tem a propriedade de emitir radiação infravermelha e o outro de detectar variação de intensidade de raios infravermelhos. A Figura 15 mostra o par formado pelo TIL 78 e TIL 32 com encapsulamento transparente.

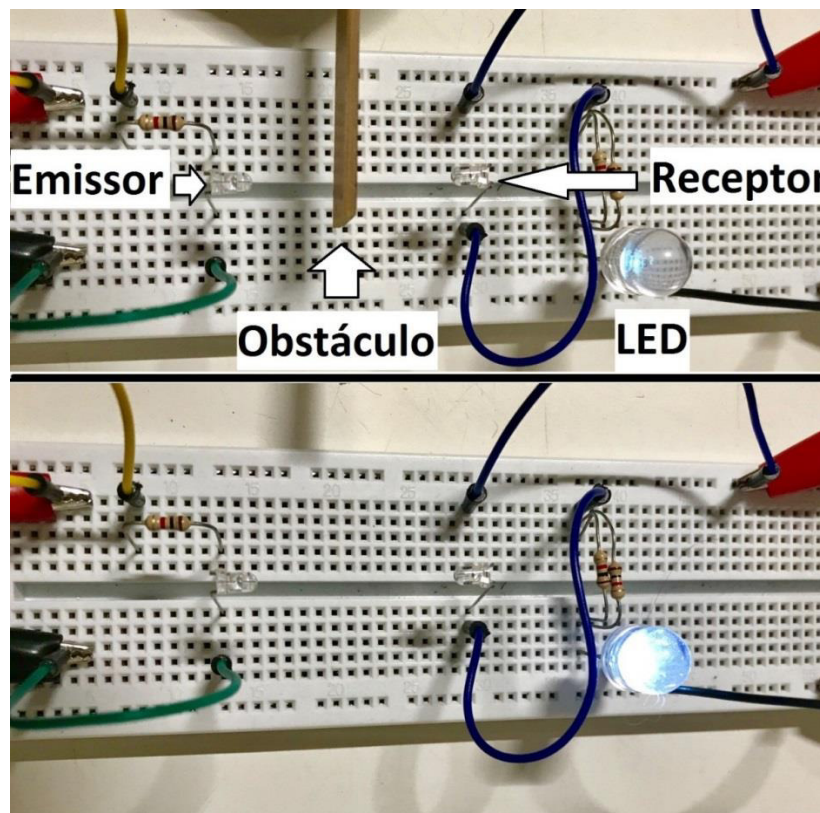
Figura 15 – TIL78 (fototransistor), à esquerda, e TIL32 (Infravermelho), à direita, com encapsulamento transparente.



Fonte: O próprio autor

Essa variação, ou ausência dela, é prevista por um *software* ao tomar ações previamente programadas. O TIL32 é um LED⁴ emissor de radiação infravermelha e o TIL78 é um transistor cuja corrente elétrica que o percorre depende da intensidade da radiação infravermelha incidente sobre ele. Chamamos o TIL78 de fototransistor. Ambos são produzidos a partir de materiais semicondutores e possuem polaridade. Para identificar os polos dos seus terminais de contato, a cápsula possui um “corte” em sua circunferência em um dos lados. Esse detalhe identifica o terminal como catodo (k) no caso do TIL32 e como coletor (c), no caso do TIL78. A Figura 16 mostra uma ligação em série entre uma fonte de tensão, um resistor, um LED e um fototransistor. O infravermelho emitido pelo TIL32 está direcionado para o fototransistor. Ao receber a radiação o mesmo conduz corrente elétrica de modo que o brilho do LED fica intenso. Quando o feixe de infravermelho é interrompido a luminosidade do LED cai consideravelmente.

Figura 16 – Teste de condutividade do fototransistor.

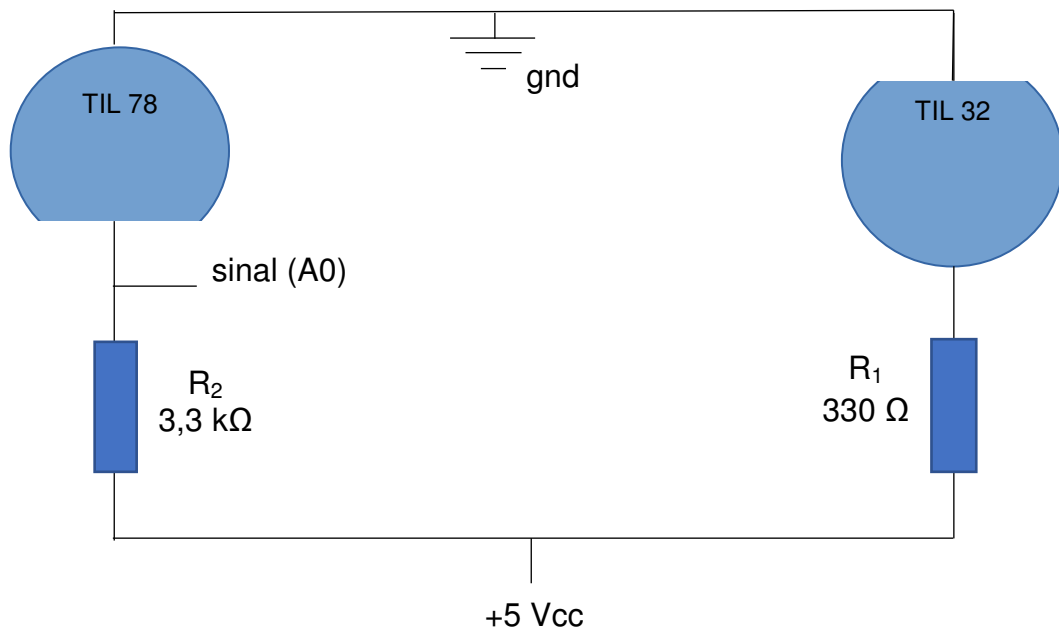


Fonte: O próprio autor.

⁴ LED é a sigla para *light emitting diode* que significa diodo emissor de luz. No caso do TIL32 a radiação emitida é infravermelha, invisível ao olho humano.

A Figura 16 apresenta duas situações: a primeira com o feixe de infravermelho interrompido por um obstáculo e a segunda com o obstáculo removido e o feixe incidindo diretamente no fototransistor. No primeiro caso, o LED está quase que totalmente apagado, apresentando uma pequena luminosidade decorrente de uma condução no fototransistor gerada por uma captação de infravermelho do próprio ambiente. Na mesma figura, com o obstáculo removido, a luminosidade do LED aumenta significativamente. A incidência de infravermelho sobre o fototransistor aumenta consideravelmente a sua condutividade. Assim, pode-se montar o seguinte circuito elétrico:

Figura 17 – Circuito divisor de tensão para o sensor infravermelho.

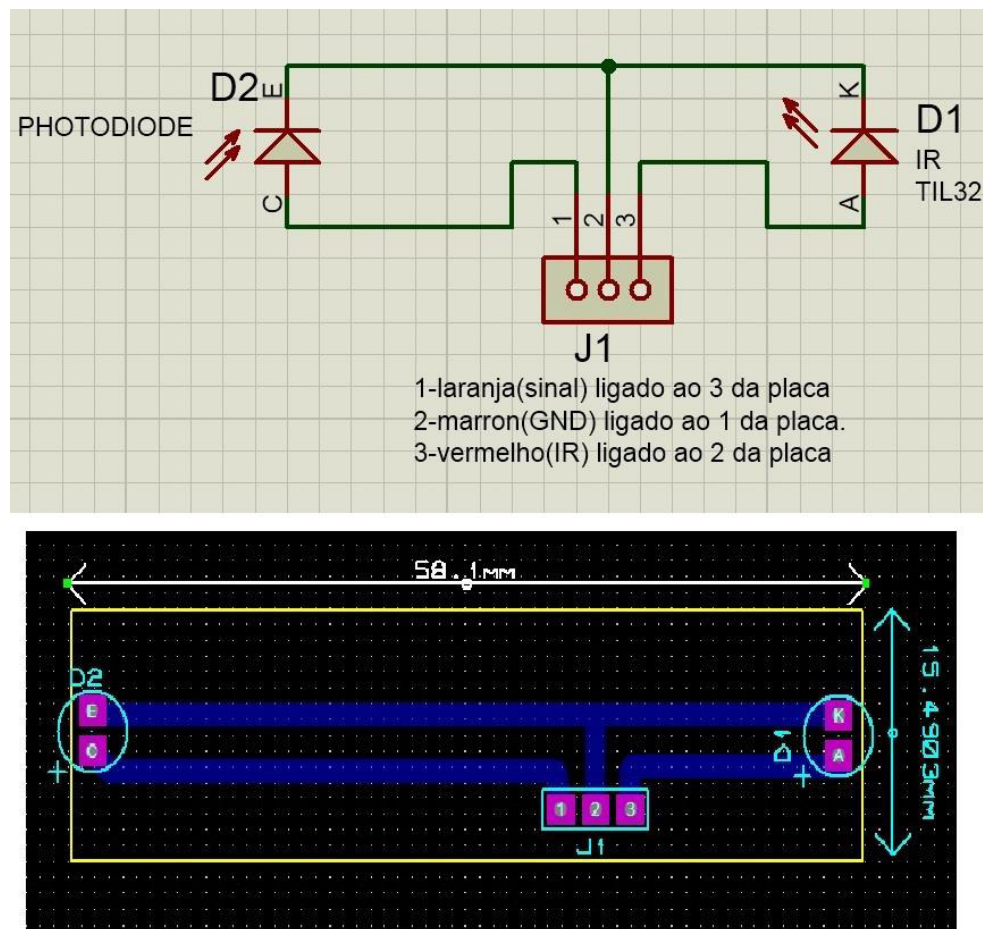


Fonte: O próprio autor.

No circuito da Figura 17 há um divisor de tensão (ramo esquerdo) formado pelo TIL78 (fototransistor) e pelo resistor de 3,3 kΩ. Entre os dois (sinal) uma tensão variável entre zero (TIL78 em condução total, quando o sensor não estiver obstruído) e +5 V (TIL78 em corte, quando o sensor estiver obstruído) será o sinal enviado ao microcontrolador e interpretado por ele como o momento de encerrar a contagem de tempo, realizar os cálculos programados e retornar os valores. Curiosamente, o TIL32 tem o lado marcado na cápsula com o “corte” indicando o catodo, o polo a ser

ligado ao terminal negativo da fonte. O TIL78 é ligado de forma invertida, com o lado que não é “cortado” ligado ao negativo. Um esquema produzido em *software*⁵ de simulação de circuitos e placas, mostrado na Figura 18, foi usado para gerar um gabarito. Esse esquema não inclui os resistores visto que eles foram alocados na placa principal.

Figura 18 – Esquema do sensor e sua placa de circuito.



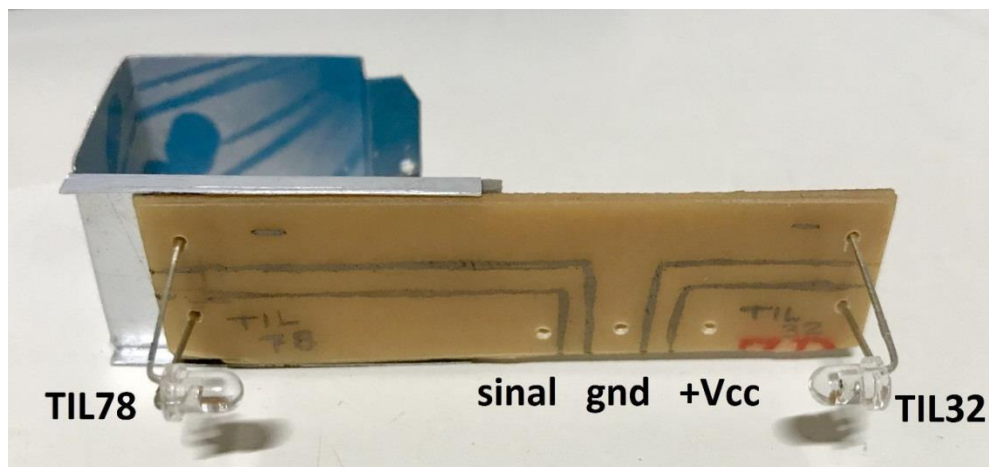
Fonte: O próprio autor

A placa foi construída a partir de uma placa de fenolite de face simples (circuito apenas em um lado da placa), perfurador de placa, solda à base de estanho e ferro de soldagem. As medidas indicadas no esquema servem como parâmetro, mas o tamanho das massas usadas deve ser sempre levado em conta. Como uma

⁵ O *software* utilizado foi o Proteus Design Suite 8.1, desenvolvido pela LabCenter Eletronics Ltda.

das massas passará entre os componentes, a distância entre eles deve ser suficiente para que a passagem ocorra sem risco de colisão. Para o equipamento montado nesse trabalho foram usadas massas de diâmetro 25 mm e roldana de 52,5 mm de diâmetro. De acordo com a medida especificada no esquema, a placa do sensor deve possuir algo em torno de 58 mm de comprimento com uma largura de aproximadamente 15 mm. Os componentes são inclinados de modo que seus terminais formam um ângulo de 90 graus com a direção de emissão/recepção de cada componente. Um exemplo de placa já montada com os componentes já posicionados e fixados pode ser visualizado na Figura 19

Figura 19 – Placa de circuito do sensor.



Fonte: O próprio autor.

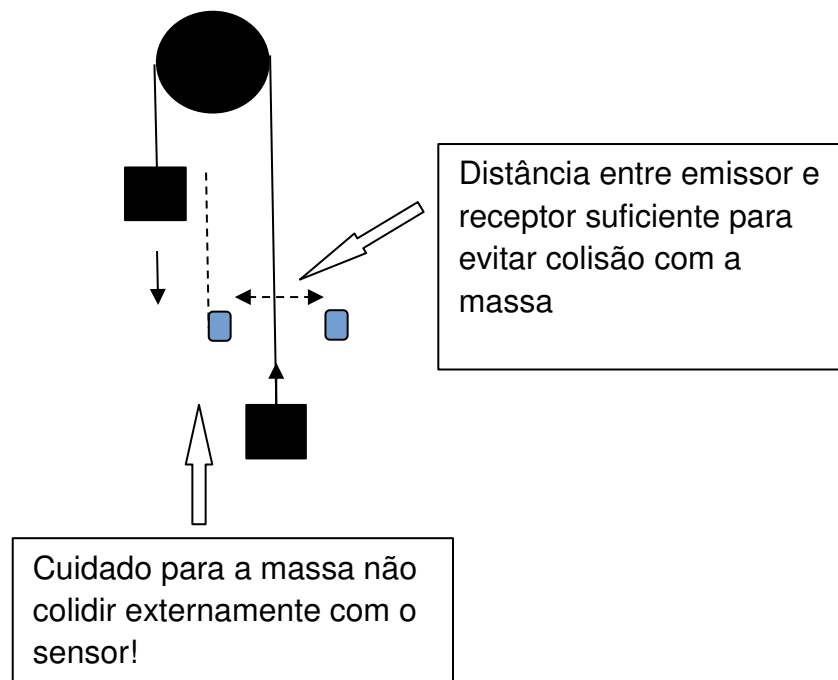
As marcas feitas na placa a lápis indicam a ligação e o posicionamento correto de cada componente.

4.5.2 – Posicionamento e fixação

A obtenção de dados precisos passa pelo posicionamento correto do sensor e uma fixação adequada. Dois fatores devem ser considerados. Um deles é a livre movimentação das partes móveis do equipamento e o outro fator é a precisão

de leitura. Sensor mal posicionado pode acarretar colisões indesejadas entre o mesmo e as massas caso haja uma pequena oscilação pendular à medida que a massa presa por um fio executa seu movimento de subida e descida. Mal posicionado, o sensor pode deixar de realizar a detecção da presença da massa ou mesmo fazer uma detecção antecipada. As massas são sustentadas por um parafuso e porcas, presa a um suporte de cobre. Toda essa estrutura pode ser detectada pelo sensor e uma leitura indesejada ser feita acrescentando erros ao resultado. Como esses itens possuem dimensões relativamente reduzidas ocorre de eles serem detectados em algumas ocasiões e em outras não, tudo dependendo da oscilação pendular da massa no momento em que ela atravessa a região de trabalho do sensor. A Figura 20 traça um esquema com a roldana, as massas e o posicionamento do sensor e as margens livres para que as massas possam realizar o seu movimento sem nenhuma interrupção ou contato.

Figura 20 – Espaços para passagem livre das massas.

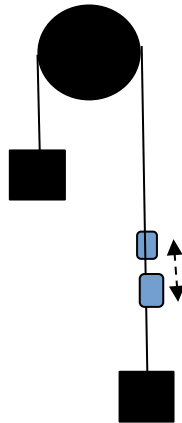


Fonte: O próprio autor.

A configuração de posicionamento do sensor permite que o mesmo fique no espaço entre as duas massas sem risco de colisão. Caso o diâmetro da roldana ou a

dimensão das massas faça a distância entre elas ser muito pequena será necessário reposicionar o sensor. Uma alternativa seria ele girar 90 graus no eixo vertical, conforme ilustra a Figura 21, de modo que nenhum componente ficaria no espaço entre as massas.

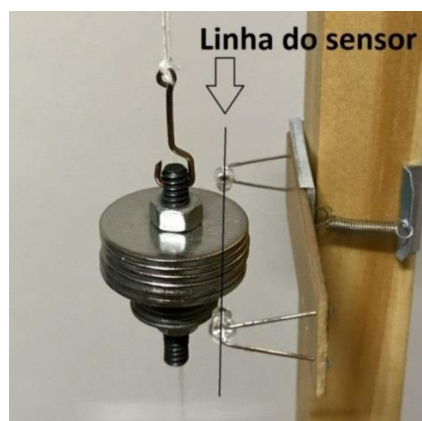
Figura 21 – Reposicionamento de sensor após uma rotação de 90 graus.



Fonte: O próprio autor.

A linha imaginária que liga o emissor e o receptor é um indicativo do posicionamento correto do mesmo. A Figura 22 exibe a linha do sensor e onde ela deve estar posicionada em relação à massa.

Figura 22 – Linha imaginária entre emissor e receptor.

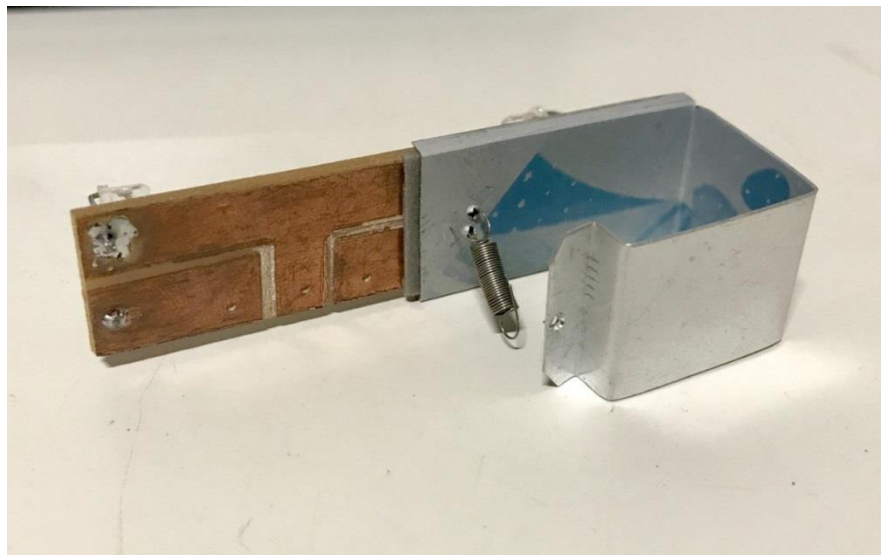


Fonte: O próprio autor.

A linha imaginária traçada na Figura 22 mostra o ponto onde a massa deve passar para que a leitura seja correta. Caso essa linha esteja no centro da massa então leituras imprecisas serão realizadas, pois o suporte de cobre que liga o parafuso à linha pode ser detectado, em especial no ponto onde a linha é presa por meio de um nó. Por se tratar de um objeto de pequena dimensão física uma pequena oscilação pendular pode fazer com que, no instante de passagem pelo sensor, o suporte de cobre esteja interrompendo o feixe ou não, gerando a imprecisão na medida.

A fixação do sensor pode ser realizada através de um simples suporte de metal (no caso foi usada uma chapa fina de alumínio) ou parafusada diretamente na haste. Existe ainda a possibilidade de ela ser deslizante sobre uma calha de metal para que a sua altura possa ser ajustada, permitindo mais possibilidades de aplicação para o equipamento. O protótipo inicial foi concebido com sensor móvel, mas pela complexidade requerida em sua construção e tendo em vista que esse trabalho visa produzir um equipamento que seja de mais fácil reprodução, o sensor aqui deve ser de posicionamento fixo. Embora o suporte usado ainda permita uma certa movimentação, recomenda-se fortemente que o mesmo seja definitivamente fixado por motivos que mais tarde serão justificados.

Figura 23 – Sensor e suporte de fixação em alumínio.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 23 pode-se perceber a presença de uma mola para que o suporte envolva a haste sob pressão. Vale ressaltar a importância de um isolamento elétrico entre a placa e o suporte. A vista posterior da placa revela o lado condutor dela junto ao suporte, mas isolado por uma fita adesiva dupla face. Mesmo assim, recomenda-se aplicar uma lixa fina nos pontos onde o componente foi soldado para que possíveis pontas não atravessem a fita e toquem o suporte de alumínio gerando curto-circuito. Testes realizados com o mesmo sensor mostrado na Figura 19 apresentaram, inicialmente, ausência de leitura por curto-circuito, no entanto o problema foi resolvido facilmente pelo procedimento descrito anteriormente.

4.6 – Arduino e a placa de circuito.

O Arduino constitui uma plataforma eletrônica de código aberto muito apropriada para o desenvolvimento de projetos por possuir custo relativamente baixo, contar com muitos acessórios modulares projetados especificamente para ele, tutoriais disponíveis⁶ e uma certa facilidade em seu uso. Ao longo dos anos, profissionais e amadores nas mais diversas áreas têm desenvolvido projetos usando o mesmo como cérebro. Professores exploram suas potencialidades na construção de equipamentos de baixo custo, tanto para a área científica quanto para a robótica⁷.

4.6.1 – Modelo e especificações.

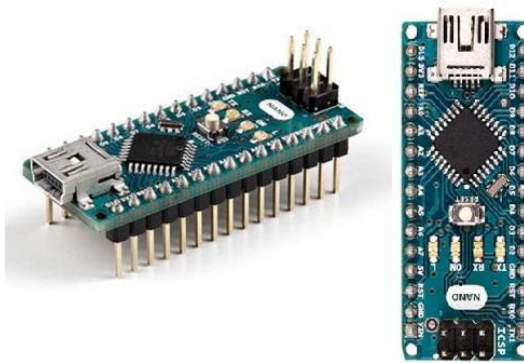
Estão disponíveis opções de modelos do Arduino, cada um com características peculiares, que tornam possível realizar a escolha daquele que melhor se ajusta às necessidades do projeto ou à preferência do usuário. Alguns modelos contam com conexão de rede. Outros se adaptam bem a projetos de robótica. Ainda outros, possuem uma quantidade de portas maior, permitindo o controle de mais circuitos. Existem modelos com maior capacidade de memória.

⁶ Alguns *links* de tutoriais foram disponibilizados nas Referências.

⁷ Exemplos de projetos educacionais usando Arduino podem ser encontrados nas Referências.

Opções para variados tipos de projetos. O modelo escolhido para a montagem da placa foi o Arduino Nano v3.0 (Figura 24). Algumas propriedades podem ser usadas como justificativa para a escolha do modelo. O Arduino Nano v3.0 usa o mesmo microprocessador do modelo Arduino Uno, porém com dimensões físicas bastante reduzidas, o que contribui para uma placa bem menor.

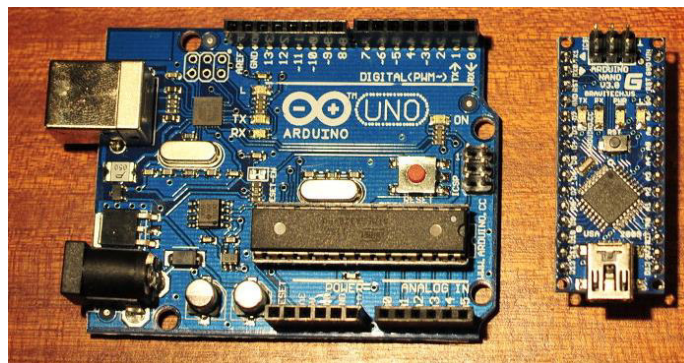
Figura 24 – Arduino Nano.



Fonte: <http://arduino.cc>

Em termos numéricos são 68,6 mm de comprimento por 53,3 mm de largura para o Arduino Uno contra 45 mm de comprimento por 18 mm de largura do Nano (Figura 25).

Figura 25 – Comparativo visual entre Arduino Uno (a esquerda) e Arduino Nano (a direita).



Fonte: <https://br-arduino.org/2014/11/arduino-nano-x-uno-repetindo-o-programa-do-semaforo-agora-no-nano.html>

O modelo Nano não conta com conector de entrada de alimentação DC externa para plugue P4, disponível no modelo Uno, mas possui o pino Vin para alimentação. A entrada serial do Nano é Mini-usb enquanto a do Uno é usb, sendo ambas do tipo “b”.

Quanto as entradas e saídas estão disponíveis 14 pinos digitais operando em dois estados lógicos, (alto e baixo) com tensões de zero e +5 Vcc, incluindo 6 pinos que oferecem possibilidade de saída PWM⁸ e 8 entradas analógicas com resolução de 10 bits (1024). O Nano conta ainda com pinos Rx e Tx entre os pinos digitais para troca de informações com outros equipamentos, pinos de reinicialização, alimentação externa regulada, e outros.

De acordo com a Tabela 01, a corrente elétrica máxima em cada pino de entrada/saída é de 40 mA, o que limita o Arduino a ser, basicamente, um controlador de periféricos. Ainda de acordo com a Tabela 01, a tensão de saída em todos os pinos é de +5 V contínua e a tensão de alimentação recomendada pode variar entre 7 volts e 12 volts.

Tabela 01 – Especificações técnicas do Arduino Nano

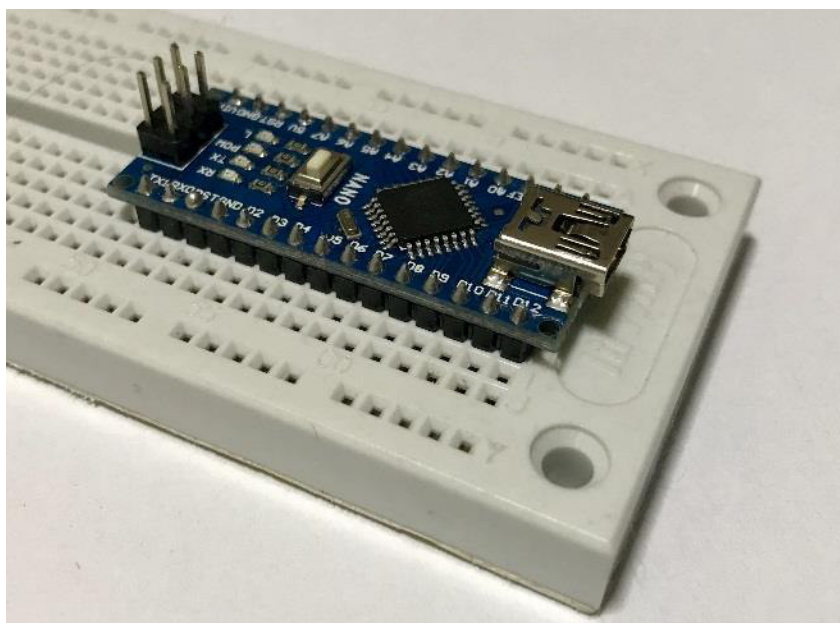
Microcontrolador	ATmega328
Arquitetura	AVR
Tensão de Operação	5 V
Memória Flash	32 KB com 2 KB usados para bootloader
SRAM	2 KB
Clock Speed	16 MHz
Entradas Analógicas	8
EEPROM	1 KB
Corrente DC por Pino I/O	40 mA (I/O)
Tensão de Alimentação	7-12 V
Pinos Digitais I/O	22 (com 6 PWM)
PWM Output	6
Dimensão PCB	18 x 45 mm
Peso	7 g

Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>

⁸ PWM (*Pulse Width Modulation*) é uma técnica de controlar a largura de um pulso de uma onda quadrada (digital) controlando, assim, a potência transferida. A largura do pulso depende do tempo em que a porta permanece em nível lógico alto ou baixo.

O modelo Nano possui pinos em suas portas que permitem que ele seja facilmente “espetado” em uma *breadboard*⁹. Caso seja opção a construção do circuito em placas de ensaio, o Arduino Nano é uma placa adequada por ser pequena e possuir pinos que se encaixam perfeitamente nos furos da *breadboard* (Figura 26).

Figura 26 – Arduino Nano encaixado em uma placa de ensaio.



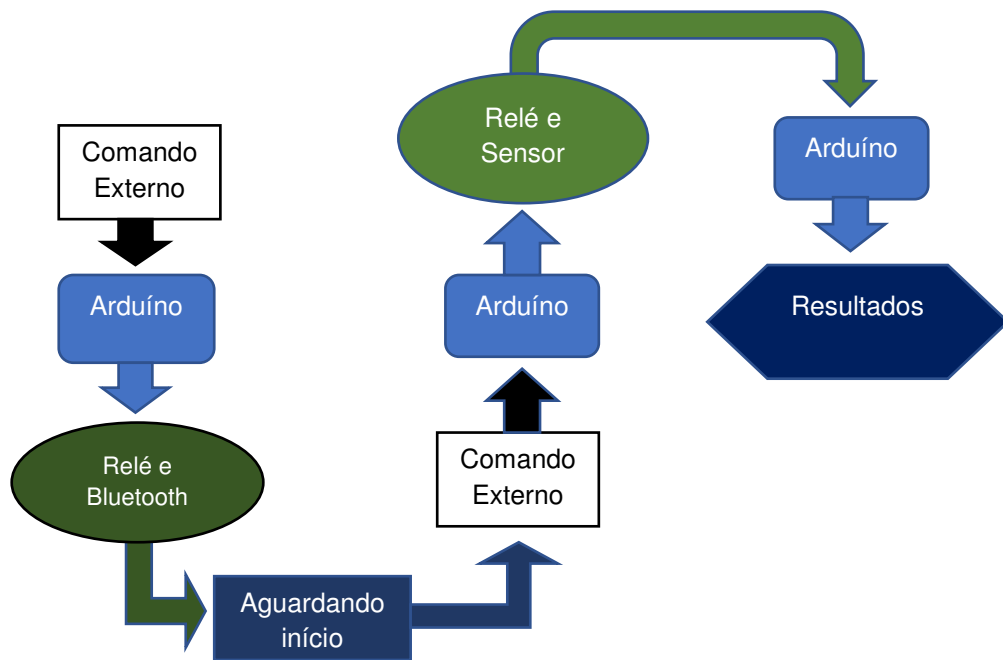
Fonte: O próprio autor.

4.6.2 – Circuito elétrico e sua logística.

O circuito elétrico tem como finalidade principal determinar o intervalo de tempo desde o início do movimento do sistema até um determinado ponto predefinido, ou seja, o tempo para a massa percorrer uma determinada distância. Tendo o Arduino como núcleo, o circuito completo pode ser representado esquematicamente de acordo com a Figura 27.

⁹ *Breadboard*, placa de ensaio ou matriz de contato são placas plásticas com furos interligados por condutores de forma que componentes eletrônicos possam ser inseridos e facilmente ligados em uma simulação real de funcionamento de circuito.

Figura 27 – Esquema lógico do circuito.



Fonte: O próprio autor

De acordo com o esquema, o processo tem início por um comando externo sobre o Arduino que pode ser originado a partir de um interruptor ou comando enviado de um terminal via cabo ou conexão sem fio. Recebido o comando, o Arduino se comunica com o relé, para acionamento do eletroímã, e envia informações (via porta serial e módulo *bluetooth*) para a tela do terminal. A partir daí o Arduino aguarda o próximo comando externo, vindo pelos mesmos meios anteriormente citados, para iniciar o movimento do sistema e a contagem do tempo. Quando o segundo comando é dado, o Arduino se comunica com o relé desligando o eletroímã, iniciando a contagem do tempo do movimento das massas e monitora a leitura no sensor. Quando o sensor recebe informação de presença do corpo (obstrução do infravermelho) o sinal é recebido pelo Arduino que realiza os cálculos para encontrar o intervalo de tempo entre os dois eventos (desligamento do eletroímã e passagem pelo sensor de presença). O resultado do cálculo é enviado à tela do terminal tanto via cabo usb como via conexão sem fio *bluetooth*.

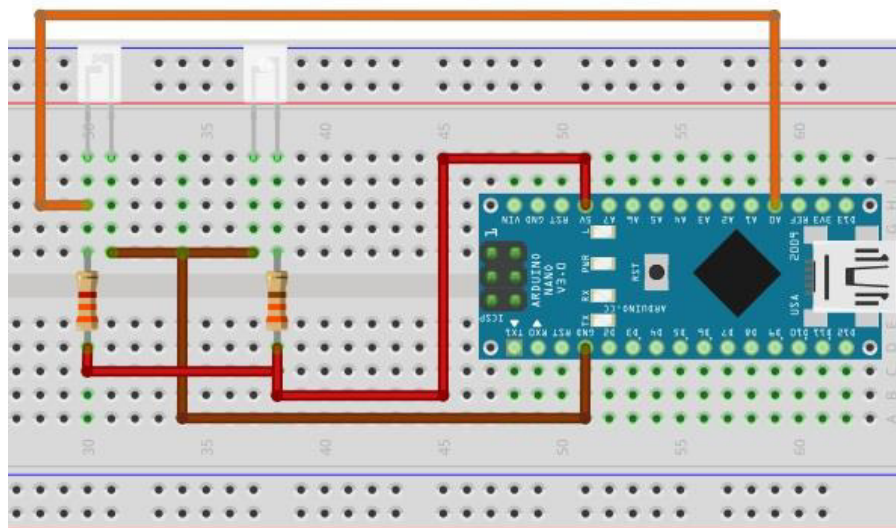
O circuito é composto por um conector *Jack* para plugue P4 que servirá como entrada de alimentação usando uma bateria de 9 V. Um resistor de 3,3 kΩ será ligado em série com o fototransistor para formar um divisor de tensão. Um outro

resistor, de 330Ω , ligado em série com o emissor de infravermelho, irá limitar a corrente elétrica a valores seguros para o Arduino e o emissor infravermelho. Como o módulo *bluetooth* opera nas portas Rx e Tx com tensão de 3,3 V, um trimpot de $10 \text{ k}\Omega$ deve ser inserido como divisor de tensão na saída Tx do Arduino. Finalmente, um botão de pressão (*pushbutton*) deve ser incluído. A função dele é enviar informação para o Arduino acionar o eletroímã, cuja finalidade é prender a massa menor junto à base do equipamento, e informar ao Arduino que desligue o eletroímã para iniciar o movimento do sistema e início da contagem de tempo.

4.6.2.1 – Ligação sensor e Arduino

As ligações dos componentes no Arduino são simples. O sensor visto na Figura 19 apresenta três ligações. O gnd ligado ao gnd do Arduino, o +Vcc ligado em série com um resistor de 330Ω ao pino 5 V e o sinal que é ligado à uma porta analógica (A0 a A7) e a um resistor de $3,3 \text{ k}\Omega$ na alimentação 5 V (ver Figura 28).

Figura 28 – Ligação entre sensor e Arduino



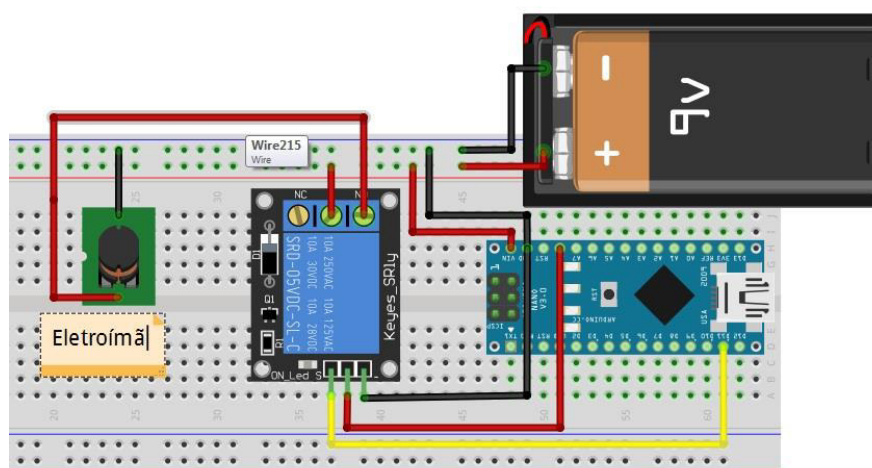
Fonte: O próprio autor

De acordo com o que foi mostrado anteriormente na Figura 17, e agora na Figura 28, o fototransistor e o resistor de 3,3 k Ω formam um divisor de tensão entre a alimentação de 5 V e o gnd. A variação na incidência de infravermelho no fototransistor varia sua condutibilidade e, conseqüentemente a tensão no ponto entre ele e o resistor. Nesse ponto sai a ligação para uma das portas analógicas que fará a conversão da tensão em uma resolução de 10 bits (1024). Os limites superiores e inferiores para a tensão no ponto é de 5 V (1024) quando o fototransistor está em corte e zero quando estiver em condução total. Esses valores não são atingidos pois ele nem estará em condução total nem em corte total, mas o Arduino poderá exibir os extremos de leitura para ajustes necessários. Os resistores de 330 Ω e 3,3 k Ω foram dimensionados para que a corrente elétrica em cada porta e na própria alimentação não supere os 40 mA máximos para as portas do Arduino. Alimentar o infravermelho sem o resistor provavelmente irá danificar o próprio infravermelho e pôr em risco a placa.

4.6.2.2 – Ligação módulo relé e Arduino

O relé tem como função atuar como interruptor para um circuito cuja corrente elétrica seja elevada. Como a corrente esperada no circuito do eletroímã, que prende a massa junto a base do equipamento, é próxima dos 50 mA, valor acima do suportado pelo Arduino, essa corrente não poderia ser fornecida pelo próprio Arduino, cabendo a ele apenas o controle do estado do relé. Existe no mercado o relé montado em módulo, pronto para ser ligado ao Arduino. O mesmo já opera com tensão de alimentação de 5 V contínua e possui resistência interna adequada para que a corrente elétrica não supere o valor máximo suportado. O pino de entrada (IN) também pode ser ligado diretamente às portas digitais do Arduino sem a necessidade de resistores limitadores de corrente elétrica. A Figura 29 mostra o esquema de ligação entre o módulo relé, eletroímã e Arduino, com a fonte de alimentação externa.

Figura 29 – Esquema de ligação relé, eletroímã e Arduino

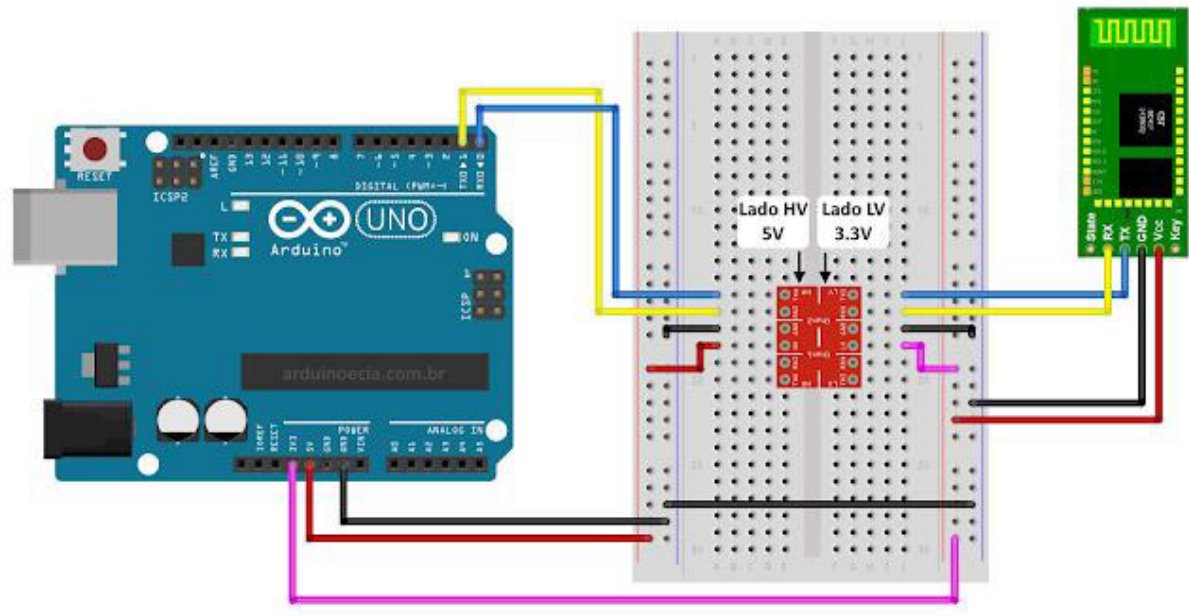


Fonte: O próprio autor

4.6.2.3 – Ligação módulo bluetooth e Arduino.

Para que o Arduino possa opcionalmente ser controlado e enviar dados remotamente para dispositivos móveis, é necessário acrescentar um módulo *bluetooth* ao circuito. Disponíveis em lojas físicas e virtuais, existem dois modelos de módulos *bluetooth* muito comuns: o HC-05 e o HC-06. Ambos podem ser utilizados no projeto. São compatíveis com sistemas *Android* e *Windows* e emparelham facilmente com *smartphone* ou *tablet*. O inconveniente do módulo é o seu valor, semelhante ao do próprio Arduino. No entanto, embora não constitua uma peça fundamental para o funcionamento do circuito, ele oferece comodidades que compensam o investimento. Uma delas é permitir que os *smartphones* dos usuários sejam parte do equipamento, conectando-se a ele e exercendo controle sobre o mesmo. O módulo *bluetooth* usado no projeto é o HC-05. Embora ele seja adequado ao Arduino, não deve ser ligado diretamente às suas portas lógicas. Isso porque a tensão de operação em suas portas de comunicação Tx e Rx – transmissão e recepção de dados – é de 3,3 V. Desse modo, há opção de uso de um conversor de nível lógico, de baixo custo, ou ainda pode ser usado um divisor de tensão para a conversão aos 3,3 V desejados. A Figura 30 apresenta o esquema de ligação usando conversor lógico.

Figura 30 – Conversor lógico entre Arduino e módulo *bluetooth*.

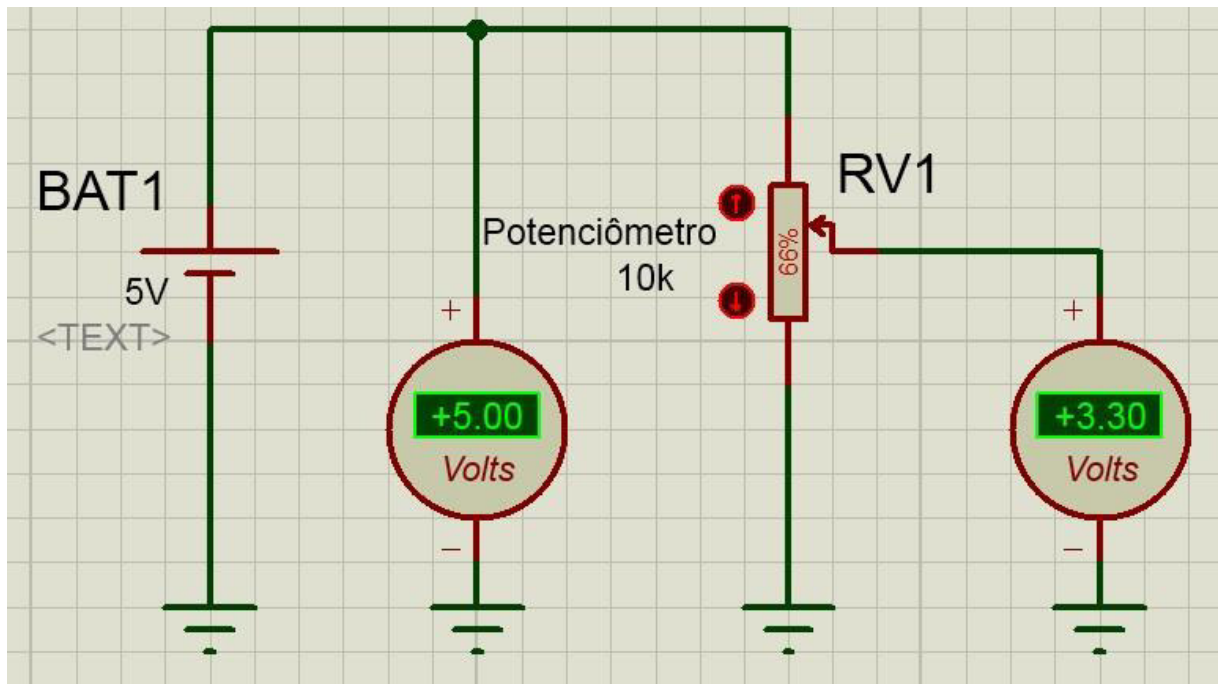


Fonte: <https://www.arduinoecia.com.br/2015/11/conversor-de-nivel-logico-33-5v-Arduino.html>

Uma vantagem do conversor é o fato de ele estar pronto para o uso, sendo apenas necessário fazer a correta ligação dos seus pinos. O divisor de tensão necessita a combinação de, pelo menos, dois resistores calculados para que a tensão de 5 V nos pinos de saída do Arduino sejam convertidos para 3,3 V. Uma maneira prática é usar um trimpot de 10 k Ω com seus extremos ligados ao gnd e a porta Tx do Arduino e ajustado para que o pino central forneça a tensão desejada na porta Rx do módulo.

Uma simulação feita em *software*, mostrada na Figura 31, corresponde ao circuito divisor de tensão. Uma fonte de 5 V contínua foi inserida simulando a tensão fornecida pela porta digital em estado alto.

Figura 31 – Divisor de tensão em programa de simulação de circuitos elétricos.



Fonte: O próprio autor

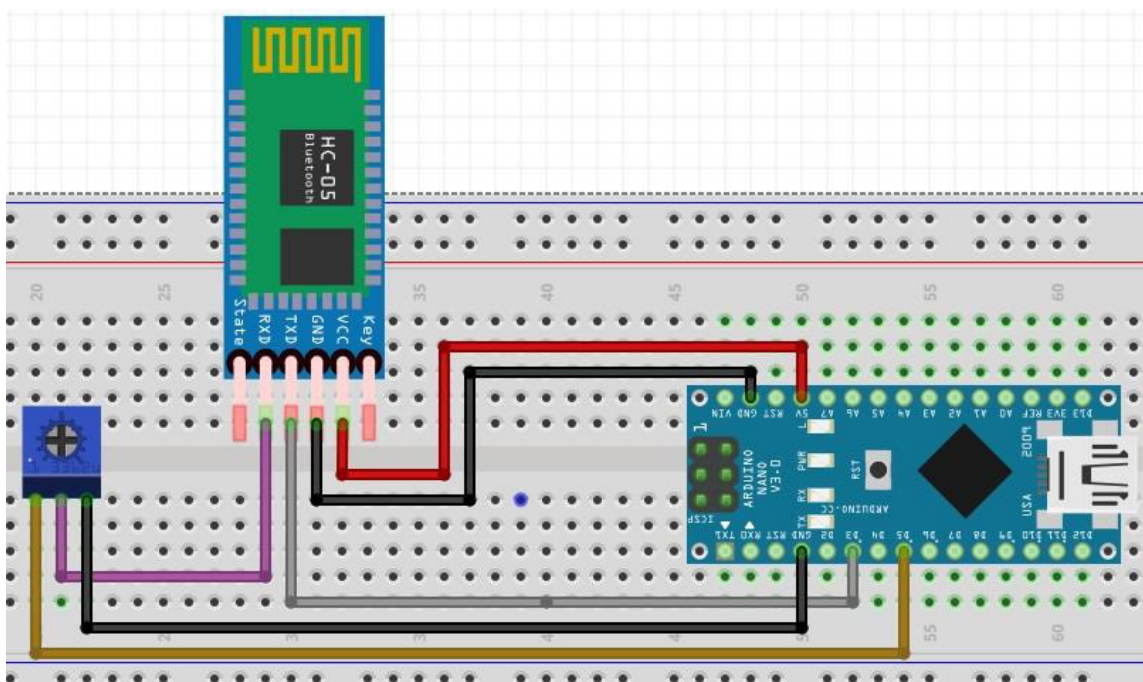
A tensão desejada é obtida à medida que o potenciômetro vai sendo ajustado. Um voltímetro monitora a tensão. Esse ajuste deve ser feito antes da montagem do componente na placa. Essa regulagem pode ser feita em uma placa de ensaio ligando a alimentação de 5 V fornecida pelo Arduino e o gnd nos extremos do trimpot e, com o auxílio de um voltímetro, medir a tensão entre o terminal central e o gnd. Girar o trimpot até obter a tensão desejada. Após esse procedimento o componente pode ser fixado à placa de circuito ou ser usado na própria *breadboard*.

O divisor de tensão é necessário apenas na ligação entre o pino Rx do módulo e a porta do Arduino programada para ser usada como Tx. O pino Rx do módulo opera em 3,3 V. Recebendo sinal de 5 V ele poderá ser danificado. O Pino Tx do módulo envia 3,3 V para a porta do Arduino. Como a porta do Arduino opera em 5 V não há risco de danos e, mesmo com tensão menor, ele reconhecerá o sinal.

Após essa consideração sobre a tensão de operação do módulo *bluetooth* e os recursos possíveis para fazer a adequação do mesmo ao Arduino é possível, nesse momento, proceder a explanação de como ligar o periférico.

A placa Arduino possui duas portas identificadas como Rx e Tx. Essas portas podem ser usadas para ligar o módulo, sempre lembrando que o Rx recebe sinal e o Tx envia sinal. Assim, o Tx do Arduino envia sinal para o módulo que, para receber, deve ter a ligação feita no seu Rx. Quando o módulo enviar sinal através do seu Tx o mesmo deve chegar ao Rx do Arduino. Em síntese, o Rx de um liga-se ao Tx do outro lembrando que o Tx do Arduino se liga ao Rx do módulo através do divisor de tensão. A Figura 32 mostra o esquema de ligação.

Figura 32 – Ligação entre Arduino e módulo *bluetooth*.



Fonte: O próprio autor

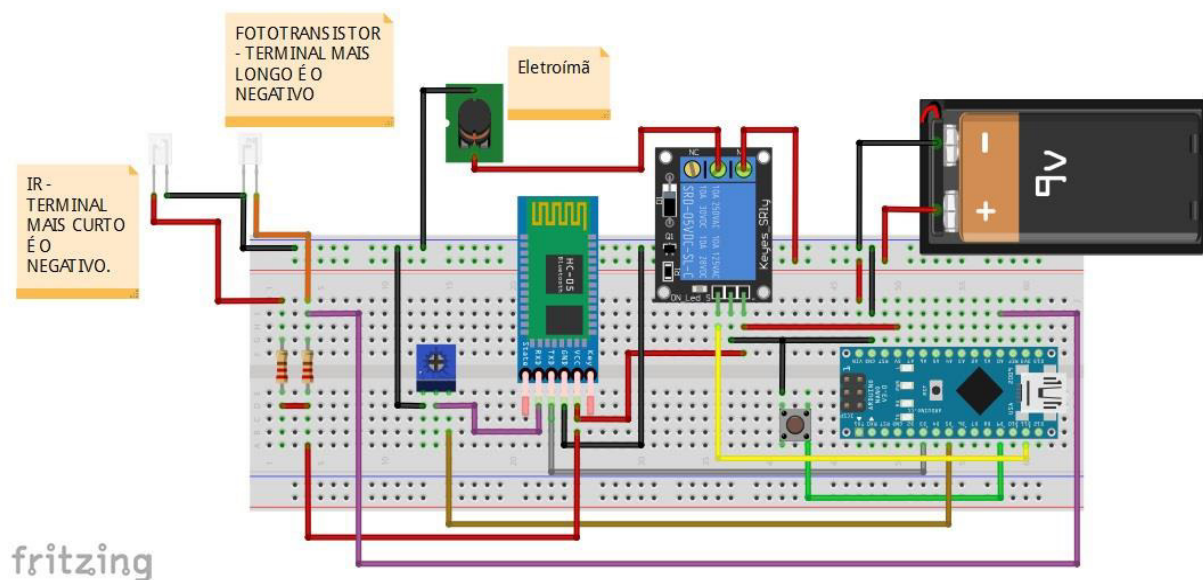
No esquema, as portas usadas para comunicação entre o Arduino e o módulo são os pinos digitais D3 e D5 configurados para atuarem com Rx e Tx, respectivamente. A vantagem desse modelo de ligação é a possibilidade de poder transferir programas através da porta usb entre o Arduino e o computador sem a necessidade de desconectar o módulo *bluetooth*. As portas Rx e Tx do Arduino estão ligadas em

paralelo com a entrada usb. O módulo *bluetooth* ligado a essas portas causaria interferência em uma transferência via usb entre computador e Arduino. Então, toda vez que uma transferência fosse necessária, o módulo deveria ser desconectado, o que geraria um inconveniente para o usuário. Para evitar esse desconforto, foi criado um pacote para configuração chamado “*Software Serial*” que permite usar qualquer porta digital como Rx e Tx.

4.6.2.4 – O circuito completo em breadboard

Unindo os circuitos do sensor, relé e *bluetooth* com a fonte de alimentação e o botão de acionamento obtém-se o circuito completo, rearranjado conforme mostra a Figura 33.

Figura 33 – Circuito completo montado em uma *breadboard*



Fonte: O próprio autor

Essa seria uma opção de montagem para o caso de dificuldades na manipulação de placas de circuito impresso e soldagem de componentes. Essa montagem requer

*jumper*¹⁰ macho (e fêmea para a ligação do módulo relé) e fios rígidos finos para fazer conexões. O indesejável nessa opção é a possibilidade de ocorrer mau funcionamento devido a possíveis falhas de contato, já que os componentes e suas ligações não são fixadas por solda, apenas contato sob pressão.

4.6.3 – Circuito em PCB¹¹ (placa de circuito impresso).

Montagem em placas de circuito usando solda à base de estanho constitui uma construção mais resistente e estável para um equipamento que será manuseado por um volume maior de pessoas. Os componentes fixos na placa não apresentam falhas de contato com facilidade e os componentes mais sensíveis, e que possuem uma maior probabilidade de apresentar problemas, podem ser facilmente substituídos, mesmo em uma placa cujos componentes sejam fixados com solda. Caso haja possibilidade de trabalho com soldas, a montagem em PCB constitui uma excelente opção.

Talvez um grande desafio na confecção de placas de circuito seja a organização dos componentes e a definição de como seriam seus trilhos condutores. Realizar essa tarefa manualmente pode ser simples para alguns, mas um verdadeiro desafio, especialmente para quem nunca a realizou. Nesse aspecto, os programas de confecção de placas de circuito ajudam bastante. Mesmo que não se consiga reproduzir fielmente o esquema por eles gerados, acabam fornecendo um gabarito que pode ser usado como parâmetro para uma construção manual. Alguns programas permitem a montagem e simulação de funcionamento, bem como a organização dos componentes de forma automática, ou manual, em uma placa de circuito com possibilidade de imprimir, em papel comum, um gabarito que pode ser usado como base para a confecção de uma PCB. Como opção, o Proteus¹² é um programa capaz de realizar simulações e que permite a impressão do esquema de

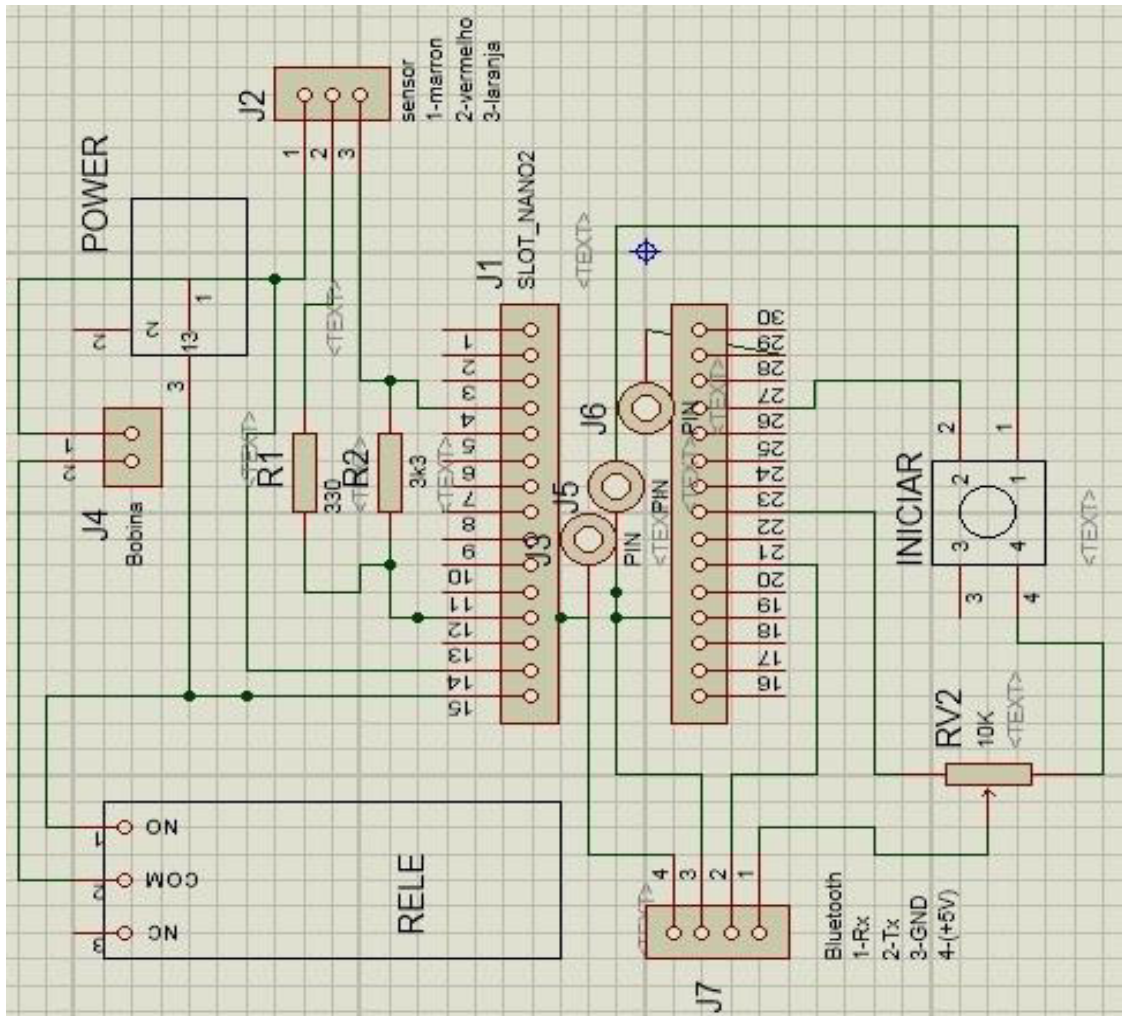
¹⁰ *Jumpers* são fios condutores cujas extremidades possuem um pino ou uma entrada para fazer ligação elétrica entre dois pontos na *breadboard*.

¹¹ PCB é uma sigla, em inglês, para *Printed Circuit Board* (Placa de Circuito Impresso). São as placas onde os componentes eletrônicos são fixados.

¹² Proteus é um *software* para criação e simulação de circuitos eletro-eletrônicos desenvolvido pela Labcenter Electronics.

ligação. A Figura 34 mostra a tela do Proteus com o esquema do circuito construído no próprio programa.

Figura 34 – Esquema do circuito feito no Proteus.



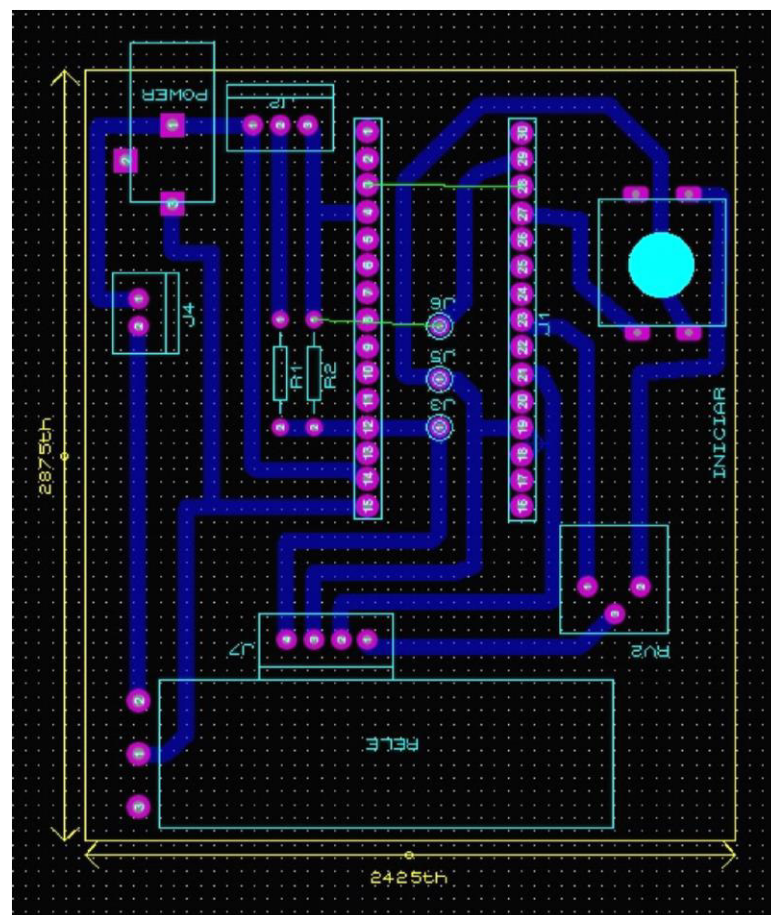
Fonte: O próprio autor

Os conectores J2 ao J7 são pontos para soldagem de cabos. Em J2 serão soldados, nos pontos 1, 2 e 3, o gnd, a alimentação do infravermelho e a alimentação do fototransistor. O J3 alimenta o módulo relé com 5 V. O J4 é o ponto de ligação do cabo do eletroímã. Os pontos J5 e J6 são gnd e sinal para o módulo relé e em J7 são ligados os cabos do módulo *bluetooth* na ordem de 1 a 4: Rx, Tx, gnd e 5 V. Os cabos que alimentam o módulo relé e o módulo *bluetooth* possuem, em suas extremidades, conectores para encaixe nos pinos das placas dos módulos.

Os componentes R1 e R2 são os resistores do emissor infravermelho e fototransistor. O RV2 é o resistor variável (trimpot) responsável pela redução da tensão de saída da porta Tx do Arduino. A placa conta com um botão de pressão (*pushbutton*), identificado como “INICIAR”, e um conector para plugue P4 usado na alimentação do circuito (POWER). O conector J1 representa as duas barras que receberão o Arduino.

Após a esquematização do circuito no programa, o mesmo pode ser usado para criar o esquema de uma PCB de forma automática ou mesmo de forma manual. A Figura 35 mostra o resultado final da criação do esquema da PCB de forma manual através do *software*.

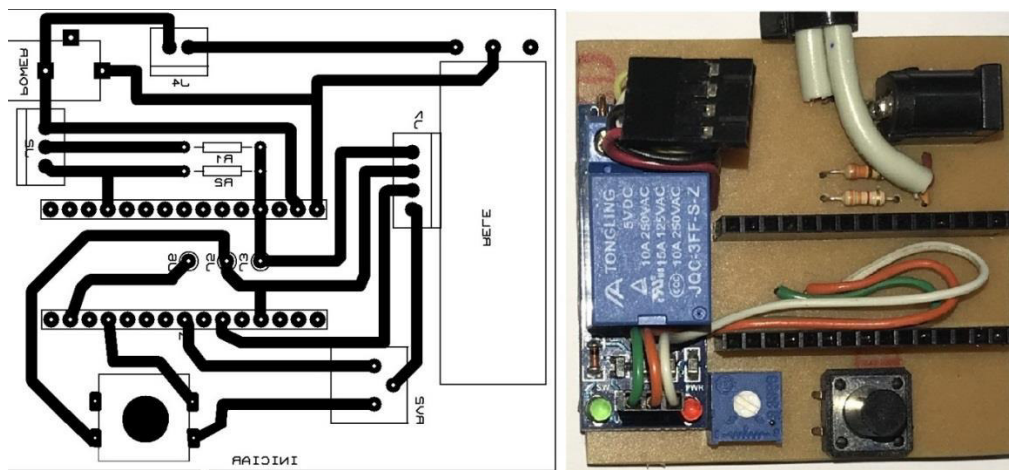
Figura 35 – Esquema de PCB criada no *software* Proteus.



Fonte: O próprio autor

Um recurso que o *software* Proteus oferece é a impressão em tamanho real do esquema do circuito para confecção da PCB. A Figura 36 mostra o esquema do circuito impresso para transferir à placa.

Figura 36 – Esquema e placa de circuito



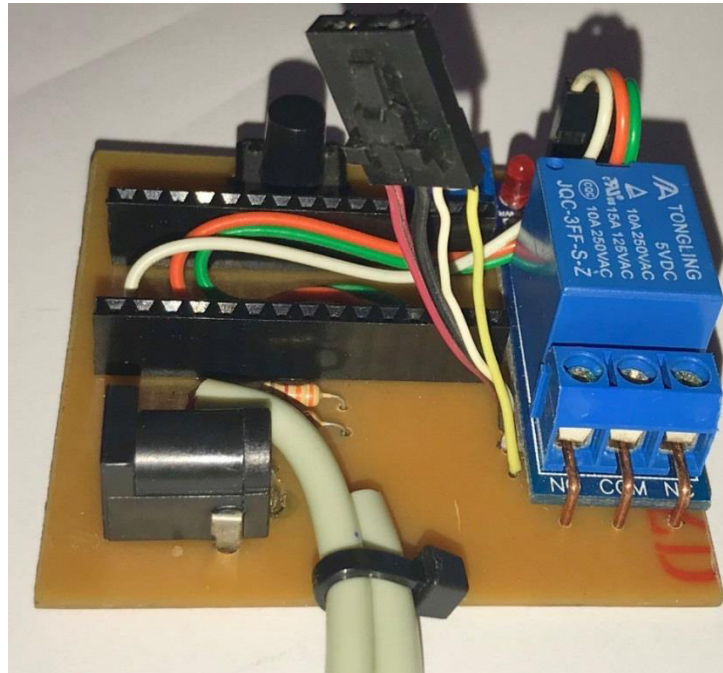
Fonte: O próprio autor.

Nota-se que o circuito construído à direita se encontra invertido em relação ao esquema. Isso porque o esquema deve ser impresso invertido já que ele representa a visão de quem olha a placa por baixo, diferente da visão superior da placa mostrada na mesma figura. Foram fixados à placa somente os resistores, o botão de pressão, o trimpot, o conector de alimentação, duas barras de pinos fêmea e os cabos do sensor e eletroímã. O relé se encontra fixado com fita dupla face à placa e conectado aos três pinos de cobre, em formato de “L”, soldados nos pontos 1, 2 e 3, que correspondem ao NO (normalmente aberto), COM (comum) e NC (normalmente fechado). O circuito de maior corrente elétrica é formado pelo eletroímã, na base do equipamento, ligado em série com os pinos 1 (NO) e 2 (COM) e a fonte de alimentação. Cabe ao relé, controlado pelo Arduino, fazer o fechamento do circuito para o estabelecimento da corrente elétrica e funcionamento do eletroímã.

A Figura 37 mostra os pinos de cobre ligados ao relé. Ainda na mesma figura pode-se ver os cabos verde, laranja e branco conectados ao módulo relé e os

cabos vermelho, preto, branco e amarelo, com seu conector, para ser plugado ao módulo *bluetooth*.

Figura 37 – Pinos em “L” para ligação do relé no circuito de maior corrente elétrica.



Fonte: O próprio autor

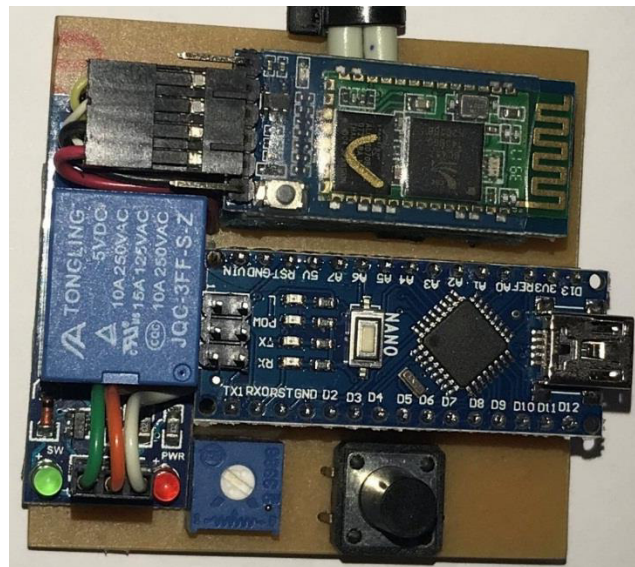
Essa construção permite que o Arduino e componentes periféricos, como relé e *bluetooth*, sejam removidos com facilidade caso seja necessário. A barra de pinos, inicialmente com 16 pinos cada uma, foi cortada para que ela fique apenas com 15 pinos. Um corte feito cuidadosamente com um estilete removeu um dos pinos. Além disso, alguns contatos dos pinos foram removidos para facilitar sua fixação na placa. A remoção dos pinos não utilizados evita o trabalho de se realizar trinta perfurações para encaixe das barras. Com os pinos retirados com auxílio de um alicate (basta puxar) uma barra ficou com quatro pinos e a outra ficou com cinco pinos. Assim facilitou consideravelmente a fixação das barras na placa e a fixação do Arduino nas barras.

No APÊNDICE C está disponibilizado um esquema já pronto para impressão de uma PCB em folha de papel A4, em tamanho real, para servir como

gabarito na confecção da placa. Os furos podem ser feitos com um perfurador de placas de circuito, disponível em lojas de materiais de eletrônica, ou mesmo com uma furadeira ou micro retífica usando uma broca de 1 mm. Existem disponíveis no comércio kits compostos de perfuradores, caneta para marcar os trilhos condutores, Percloroeto Férrico para corrosão do cobre da placa, riscador para corte e régua de metal. Com um kit assim foi construída a placa mostrada na Figura 37.

Pelo esquema apresentado usando módulos, barra de pinos e poucos componentes o circuito se torna de fácil montagem. Os cabos soldados à própria placa contribuem para a simplificação e evita mau contato, muito comum às tomadas onde há movimentação do cabo/fio. Algo a ser lembrado antes da fixação do trimpot é realizar a regulação já descrita na subsecção 4.6.2.3. Após isso ele pode ser fixado à placa com o cuidado para não perder o ajuste feito.

Figura 38 – Placa concluída com seus componentes inseridos.

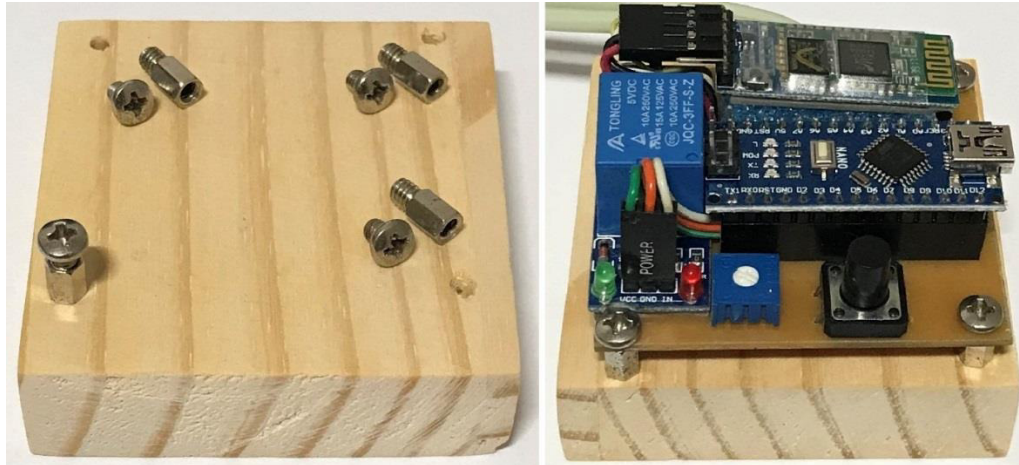


Fonte: O próprio autor

A Figura 38 apresenta a placa com todos os seus componentes inseridos. O Arduino, encaixado na barra de pinos, e o módulo *bluetooth* conectado à sua tomada e fixado com fita adesiva dupla face. Como apoio, foi colocado um preenchimento de espuma rígida fixada com fita adesiva dupla face. Todo o conjunto foi fixado a uma

base de madeira, com medidas ligeiramente maiores que a placa, usando parafusos encontrados em computadores, usados para fixação de conectores seriais.

Figura 39 – Base para fixação da placa e conjunto montado.



Fonte: O próprio autor

A imagem à esquerda, na Figura 39, mostra a base em madeira com os parafusos/porcas extraídos de computador e os parafusos que irão fixar a placa. Na mesma figura, à direita, a placa já perfurada com broca de 2,5 mm e parafusada à sua base. Pelas dimensões reduzidas dessa placa não foi constatada a necessidade de mais pontos de apoio, mas em construções maiores pode ser recomendável a instalação de apoios adicionais.

4.6.4 – Programas do Arduino

Basicamente, foram inscritos dois programas para o Arduino. Um deles realiza teste no sensor para verificação de funcionamento e coleta de dados para ajuste no programa principal. O outro é o programa principal. É aquele que efetivamente rodará durante o uso do equipamento. Ele receberá o comando externo, via *bluetooth* ou botão, e irá acionar o eletroímã onde a massa é presa enquanto aguarda o segundo comando para iniciar o movimento. Recebendo o

próximo comando, o eletroímã é desligado para iniciar o movimento no mesmo instante em que o tempo começa a ser contado. O sensor entra em estado de leitura para detectar a passagem da massa que se movimenta em sua direção. Ao realizar a detecção da massa (interrupção do feixe de infravermelho) o programa calcula o intervalo de tempo entre os dois eventos (partida do eletroímã e chegada ao sensor) a partir dos instantes de tempo associadas a esses eventos. O valor do intervalo de tempo calculado é enviado pelas portas seriais, tanto usb como *bluetooth*, para serem visualizadas em telas de terminais.

Por fugir do eixo de pesquisa desse trabalho, não serão detalhados os passos da programação. No APÊNDICE D estão disponibilizados os dois programas para serem copiados no *software*¹³ de compilação de programas do Arduino. Esse *software* está disponível gratuitamente em www.arduino.cc para vários sistemas. Foi acrescentada a opção do *Arduino Web Editor*, que realiza as mesmas tarefas do *software*, porém, via *internet*. Convêm apenas alguns comentários pertinentes relativos a algumas particularidades do equipamento e do programa que será executado.

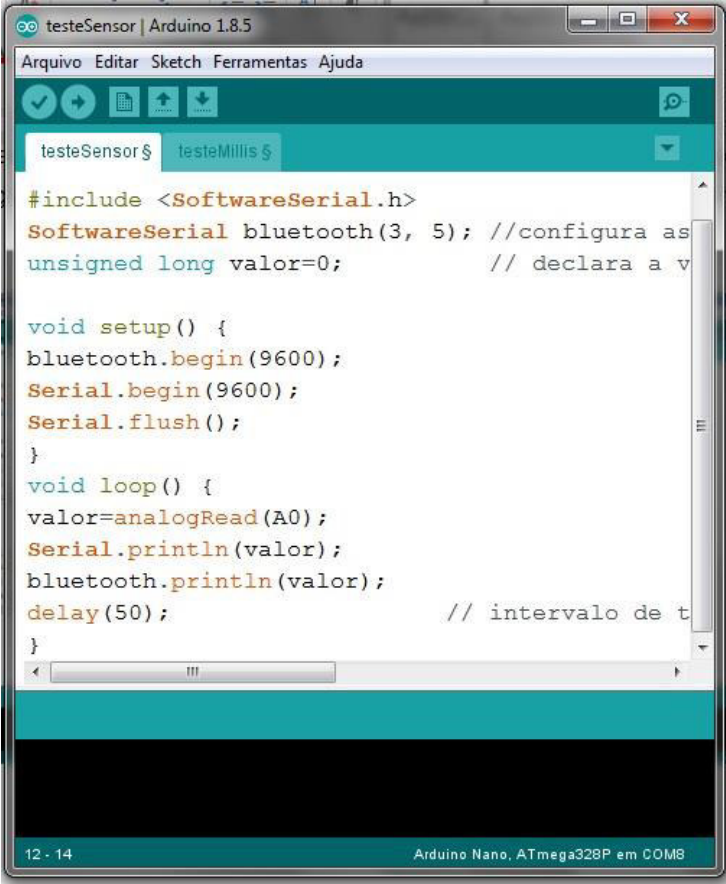
4.6.4.1 – Software de análise do sensor.

O objetivo desse *software* é verificar o funcionamento do sensor e coletar dados de leitura para que o programa principal seja ajustado de acordo com as condições atuais. Antes de qualquer ação, no menu “Ferramentas” deve ser selecionado o modelo de Arduino que está sendo usado, o modelo do processador do Arduino e a porta de comunicação. A partir daí se pode proceder a interação do Arduino com o compilador. Caso a porta não seja selecionada, ou seja selecionada incorretamente, após a compilação de um programa surgirá uma mensagem de erro. Vale lembrar que as portas usb do pc variam e a conexão *bluetooth* também possui número diferente. Sempre que mudar a tomada usb ou conectar via *bluetooth*, a porta de comunicação deve ser conferida e ajustada, caso necessário.

¹³ O *software* é o Arduino 1.8.5, versão disponível no período de escrita deste trabalho.

Após os ajustes devidamente realizados, os procedimentos podem ser seguidos. A Figura 40 mostra o programa de teste na tela do compilador do Arduino. Para facilitar a visualização, apenas a região do programa foi selecionada.

Figura 40 – Programa de análise do sensor.



```
testeSensor $ testeMills $
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial bluetooth(3, 5); //configura as
unsigned long valor=0;          // declara a v

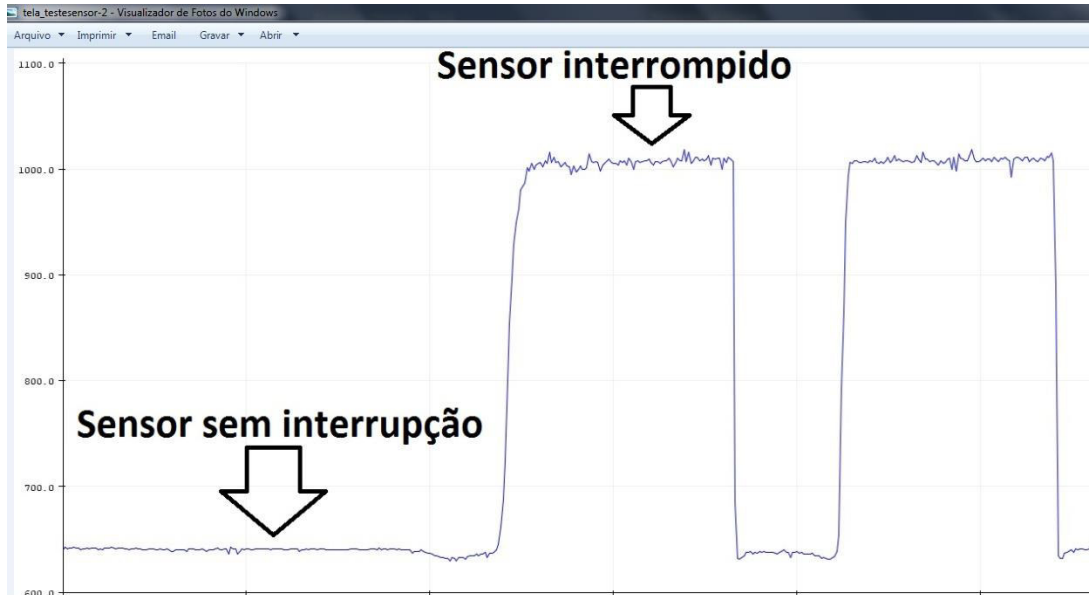
void setup() {
  bluetooth.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  Serial.flush();
}
void loop() {
  valor=analogRead(A0);
  Serial.println(valor);
  bluetooth.println(valor);
  delay(50);                // intervalo de t
}
12 - 14                      Arduino Nano, ATmega328P em COM8
```

Fonte: O próprio autor

A resolução das portas analógicas é de 10 bits ($2^{10} = 1024$). Se a porta estiver sob tensão de 5 V a leitura do Arduino será de 1024 e sob tensão de 0 V a leitura obviamente será de 0. Assim, a leitura da porta analógica estará nesse intervalo. Incidindo infravermelho no fototransistor, ele conduz, levando a uma queda de tensão no ponto onde a porta está ligada. A leitura não chega a zero no Arduino, mas atinge valores menores. Dependendo da influência de infravermelho externa esse valor pode subir mesmo inserindo uma capa protetora nos componentes. Com a interrupção do infravermelho, a condução reduz significativamente, reduzindo a queda de tensão. O ponto atinge valores próximos dos 5 V levando a leitura do

Arduino próxima a 1024. A Figura 41 mostra um gráfico, apresentado pelo próprio compilador na opção “Serial Plotter”, com as leituras para os estados interrompido e livre.

Figura 41 – Gráfico para sensor interrompido e sem interrupção.



Fonte: O Próprio autor

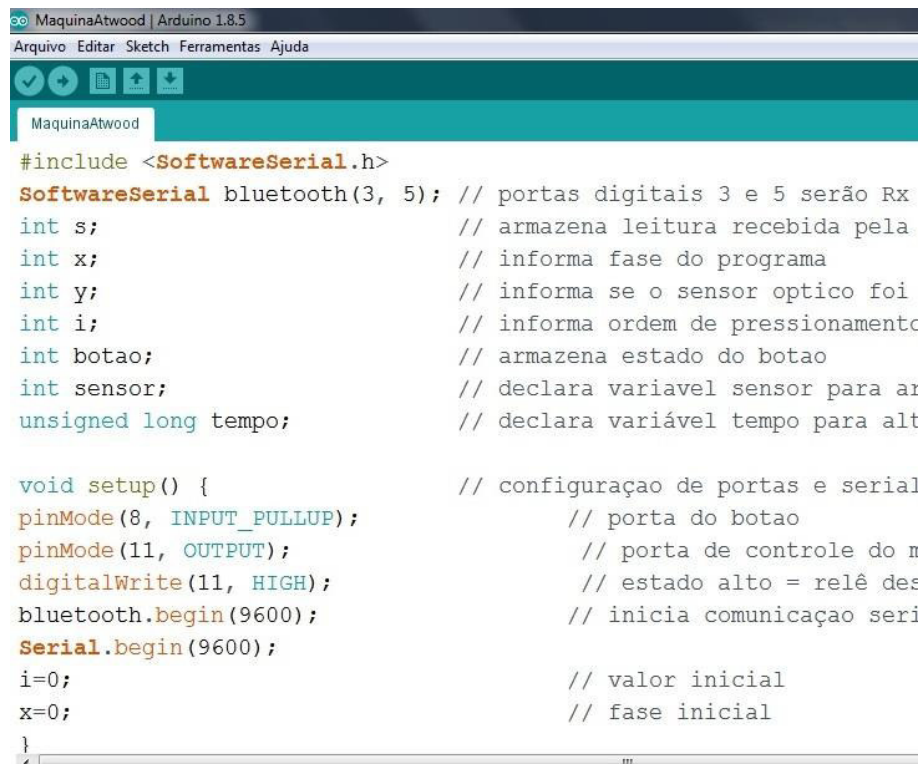
O gráfico mostra valor um pouco maior que 1000 para o sensor interrompido e valor entre 600 e 700 para o sensor sem interrupção. Dependendo do ambiente o valor inferior pode sofrer alterações consideráveis para menos ou para mais. Incidência de raios solares e exposição a lâmpadas com grande emissão de infravermelho são fatores que alteram a leitura. Por isso, é importante no ambiente em que será realizada a medição, observar o valor mínimo com o sensor não interrompido para usar como parâmetro no programa principal.

4.6.4.2 – Software principal e a transferência de dados via bluetooth.

O *software* principal é aquele que será utilizado na realização do experimento e se encontra no APÊNDICE D. A função dele é, efetivamente,

controlar o eletroímã, contar o tempo e enviar esses dados para a tela do dispositivo. Por meio do *software*, o Arduino interage com os componentes a ele ligados. Embora não seja objetivo primário aprofundamentos na programação, uma visão geral do funcionamento do programa se faz pertinente. Um programa escrito para o Arduino tem sua estrutura baseada em duas partes principais: (1) *void setup* e (2) *loop*. O *void setup* é o momento onde as configurações são realizadas. Nele, informamos a configuração das portas e iniciamos e configuramos pacotes para módulos, como o *bluetooth*, e comunicação serial. Antes do *setup*, variáveis podem ser declaradas e pacotes podem ser incluídos. A Figura 42 mostra a parte do *void setup* e as linhas antes dele.

Figura 42 – Parte inicial do programa principal mostrando o *void setup*.



```

MaquinaAtwood | Arduino 1.8.5
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
MaquinaAtwood
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial bluetooth(3, 5); // portas digitais 3 e 5 serão Rx
int s; // armazena leitura recebida pela
int x; // informa fase do programa
int y; // informa se o sensor optico foi
int i; // informa ordem de pressionamento
int botao; // armazena estado do botao
int sensor; // declara variavel sensor para ar
unsigned long tempo; // declara variável tempo para alt

void setup() { // configuração de portas e serial
pinMode(8, INPUT_PULLUP); // porta do botao
pinMode(11, OUTPUT); // porta de controle do m
digitalWrite(11, HIGH); // estado alto = relê des
bluetooth.begin(9600); // inicia comunicação seri
Serial.begin(9600);
i=0; // valor inicial
x=0; // fase inicial
}

```

Fonte: O próprio autor.

Como cada linha possui um comentário explicativo, que pode ser visualizado na íntegra consultando o programa no APÊNDICE D, não será detalhado o significado de cada comando. Apenas, de forma objetiva, são identificadas as variáveis declaradas para uso e a inclusão e configuração do “SoftwareSerial” para

usar as portas digitais 3 e 5 para comunicação entre o módulo *bluetooth* e o Arduino. Dentro do *setup* configuraram-se as portas digitais e iniciou-se a comunicação *bluetooth* e serial.

A segunda parte do programa é o *loop*. A Figura 43 mostra as linhas iniciais. Nessa parte, o programa executa repetidas vezes até ser interrompido por desligamento da fonte de energia ou pressionando o botão *RESET*. Após a leitura da parte inicial e do *setup*, ocorre a leitura em ciclo do *loop*. Assim, quando a última linha do *loop* é lida ele retorna para sua primeira linha.

Figura 43 – Início do *void loop*, a parte cíclica do programa.



```

void loop() { // parte do programa que é
  botao=digitalRead(8); // armazena na
  s=bluetooth.read();
  if(botao==0 && i==0 || s == 's' && i==0){ // se
    i=1; // atribuir va
    if(x==0){ // executa se
      x=1; // atribui val
      digitalWrite(11, LOW); // porta em LC
      bluetooth.println(); // salta uma l
      bluetooth.println("Ligado"); // imprime "Li
      Serial.println(); // salta uma l
      Serial.println("Ligado"); // imprime "Li
    }
    else { // executa se
      if(x==1){ // executa se
        x=0; // atribui val
        digitalWrite(11, HIGH); // sinal HIGH
        bluetooth.println("INICIO"); // imprime
        Serial.println("INICIO"); // imprime no
        delay(10); // atraso na c

```

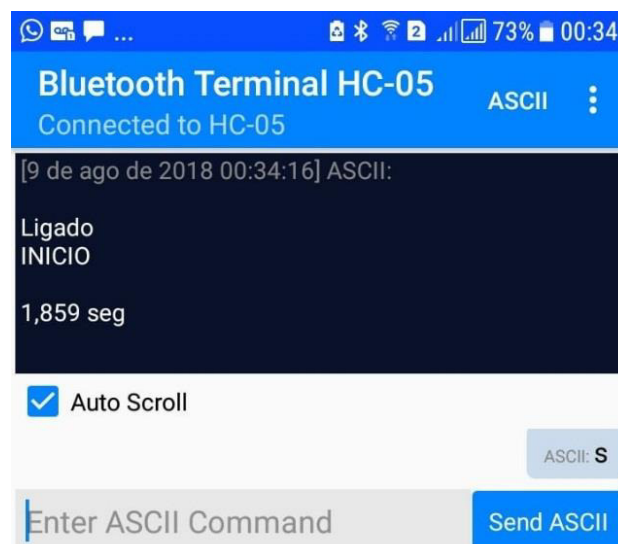
Fonte: O próprio autor.

No corpo do programa foi usado o comando *if*. Ele estabelece condições para a execução de determinadas partes do programa ou não. No primeiro *if* a variável *i* armazena a informação que dá ao Arduino condições de saber se o processo foi inicializado ou não. Caso mantenha o botão “INICIAR” pressionado, a variável *i* não mudará seu valor no final do programa não permitindo que ele entre novamente no

mesmo ciclo. Ele precisa ser solto para que o valor 0 (zero) lhe seja atribuído novamente e a condição do primeiro *if* seja novamente satisfeita. A variável *x* informa ao Arduino se a passagem por dentro do *if* ocorre para ligar o eletroímã ou desligar e acionar a função para contagem de tempo. E a variável *y* com o laço *do* e o comando *while()* faz o Arduino aguardar até que haja leitura indicando obstrução no sensor. O comando *millis()* é usado para armazenar o valor do tempo e calcular intervalos. O *Serial.print()* e *bluetooth.print()* exibem na tela as informações das portas seriais e bluetooth. Quando tem *.println* a impressão é feita na próxima linha.

O comando do equipamento pode ser feito pelo botão físico, instalado na placa, ou pode ser realizado pelo terminal. Antes, deve ser instalado o aplicativo “*Bluetooth Terminal HC-05*” (Figura 44) disponível na loja de aplicativos do sistema operacional *Android*. Conectando o computador, via *bluetooth*, ou o *smartphone* (com exceção dos dispositivos da *Apple*¹⁴, por incompatibilidade de protocolos com o módulo HC-05), basta digitar um comando, que pode ser uma letra, uma palavra, um número ou qualquer caractere previamente programado (ao gosto do programador), que o Arduino executará as tarefas programadas.

Figura 44 – Parte da tela do aplicativo *Bluetooth Terminal HC-05*, instalado em *smartphone*, exibindo uma medida realizada.



Fonte: O próprio autor.

¹⁴ O módulo HC-08 é compatível com dispositivos *Apple*. Como a maioria dos usuários possuem dispositivos *Android* o módulo usado nesse projeto é o HC-05.

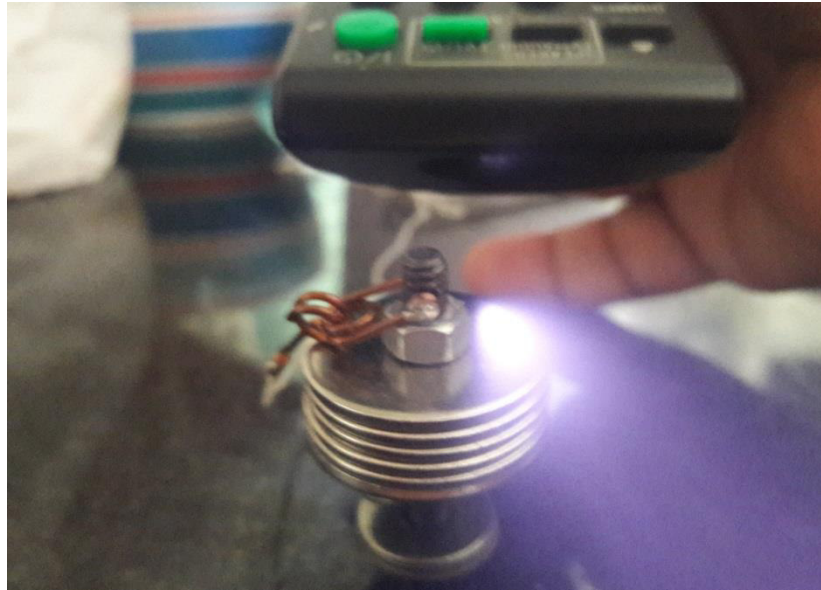
A Figura 44 mostra a parte superior da tela do aplicativo. Foi omitida a parte inferior por se tratar apenas do teclado. A primeira linha aparece após o envio do comando **s**. O segundo envio do mesmo comando retorna a mensagem **INÍCIO** e inicia a contagem do tempo. Quando o sensor detecta a passagem da massa o programa calcula o intervalo de tempo e retorna o valor, exibindo na tela.

4.7 – Testes, resultados e ajustes no equipamento.

Realizações de ensaios, onde o equipamento foi colocado em testes de sequências de execuções de medições, são necessários para identificar ajustes importantes, resistência a danos físicos durante o manuseio, dificuldades na aquisição de dados, complexidade ao ajustar parâmetros (massas) e outras necessidades. Antes do início dos testes, dois ajustes importantes devem ser feitos no programa para que ele retorne resultados mais precisos. O primeiro deles é o valor referencial para que o Arduino identifique a passagem da massa pelo sensor. Quando ocorre essa passagem o valor de leitura sobe. Pelos resultados dos testes, se a leitura for 640 sem interrupção, então qualquer valor acima significa interrupção no sensor. Para que não haja interferências e acionamentos indevidos é apropriado que o valor referência para detecção não seja muito próximo do valor mínimo. Como exemplo, para o mínimo já mencionado, um valor de 750 como referência seria um valor seguro para o funcionamento do equipamento. Um efeito por reflexão ocorre quando a massa se aproxima do sensor. A sua superfície metálica reflete na direção do fototransistor um infravermelho que, sem a reflexão, não incidiria. A intensidade de infravermelho incidente aumenta e, conseqüentemente, a leitura diminui.

A Figura 45 exemplifica uma reflexão de infravermelho na superfície metálica da massa usada no equipamento. Usando um emissor de infravermelho (controle remoto de TV) direcionado para a superfície do corpo, os raios são visivelmente refletidos e captados pela câmera do celular.

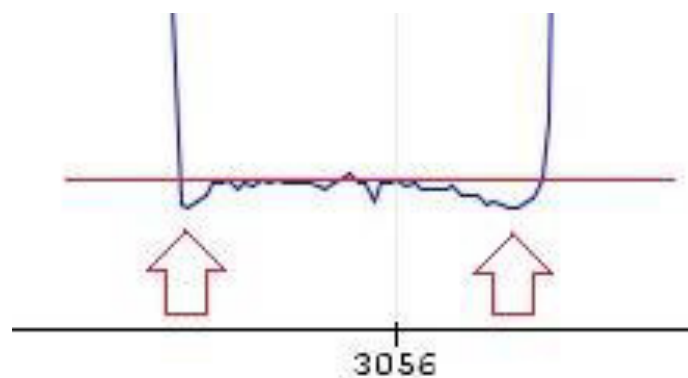
Figura 45 – Infravermelhos sendo refletidos na superfície metálica polida da massa.



Fonte: O próprio autor.

Por isso, o gráfico na Figura 46 apresenta uma leve queda antes de subir e quando o gráfico desce ele desce mais do que o valor final. Destacando uma parte do gráfico onde a interrupção é retirada e, em seguida, recolocada, a linha vermelha foi adicionada como referência e as setas indicam as quedas.

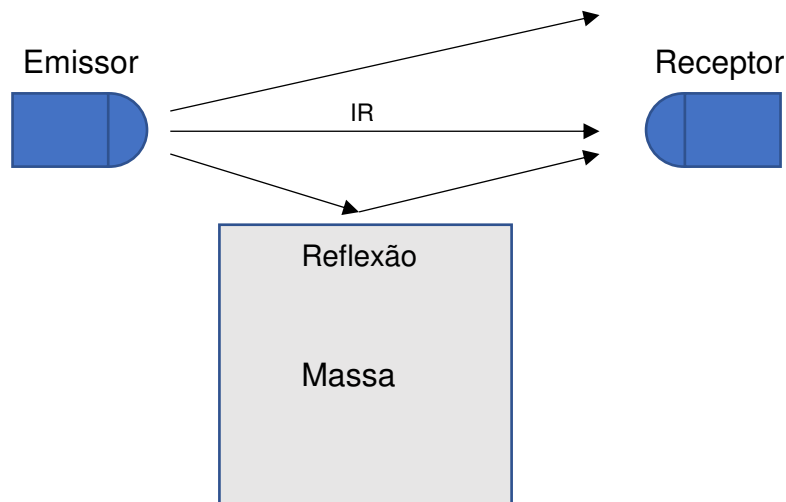
Figura 46 – Quedas de tensão verificadas na aproximação e afastamento do corpo metálico.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 47 mostra um esquema representando raios de infravermelho partindo do emissor em direção ao receptor. A presença da superfície refletora direciona raios dispersos ao receptor aumentando a sua condutividade, proporcionando queda de tensão verificada no gráfico.

Figura 47 – Esquema da reflexão do infravermelho na direção do fototransistor.



Fonte: O próprio autor.

Quando o corpo desobstrui o sensor ocorre nova queda de tensão no fototransistor. Como se trata de uma queda de tensão, o programa irá ignorar essa leitura. Se houvesse um pico de tensão, então, esse efeito poderia ser interpretado como interrupção e o sensor ser acionado antes da passagem da massa. Erros de medidas fatalmente seriam inseridos. Como o efeito não gera medidas incertas não há necessidade de buscar remover a capacidade reflexiva da superfície do corpo.

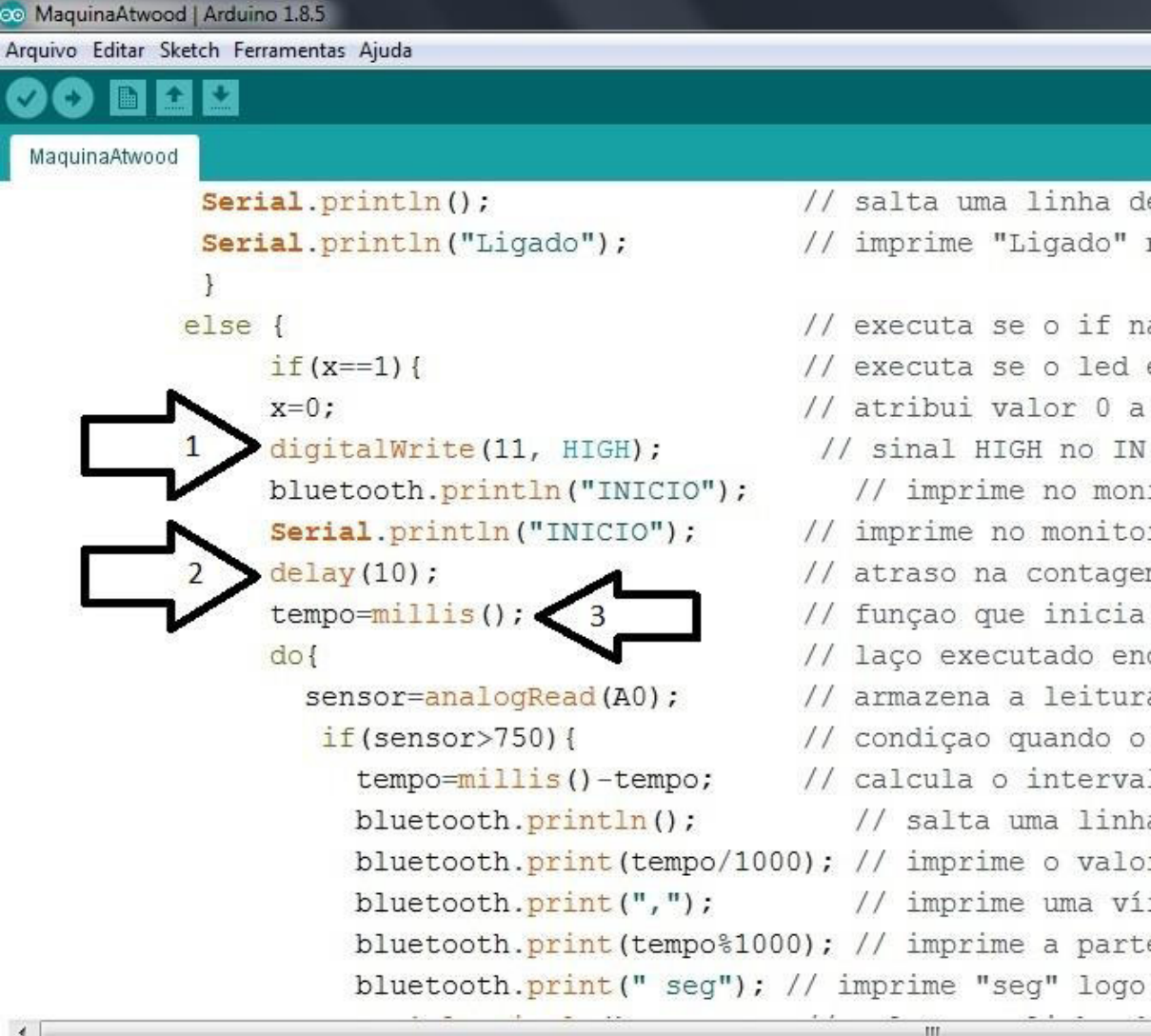
Um segundo ajuste que pode ser feito tem relação com a presença de campos magnéticos e autoindução em duas bobinas – uma no eletroímã que prende a massa em repouso inicial junto à base do equipamento e a outra no relé que aciona o próprio eletroímã. Em ambas, há um núcleo com material ferromagnético para intensificar o campo magnético produzido pela corrente elétrica que percorre a bobina. O relé recebe o comando para desligar o circuito que alimenta o eletroímã. O desligamento desse circuito leva ao início do movimento do sistema. Logo após o

envio do comando para desligamento do relé, o Arduino irá iniciar a contagem do tempo. Embora a sequência leve a uma pequena diferença de tempo entre o comando de desligamento e o início da contagem do tempo (apenas o tempo que o processador do Arduino leva para fazer a leitura das linhas de comando) o tempo é basicamente insignificante. No entanto, o tempo entre o início do movimento e o início da efetiva contagem são diferentes. Quando a tensão que aciona a bobina do relé é removida, o campo magnético ainda persiste momentaneamente, por autoindução, além do campo magnético residual no núcleo da bobina, levando a um atraso no desligamento do eletroímã. Como há um circuito controlador no módulo que também possui um tempo de resposta, esses tempos somados podem atingir 10 ms¹⁵. Após esse atraso, o eletroímã finalmente é desligado, mas ocorre o mesmo fenômeno físico de autoindução no próprio eletroímã. Assim, o campo magnético que permanece após o desligamento da tensão retardará consideravelmente a soltura da massa em valores que podem superar os 10 ms. Dessa maneira, surge um intervalo de tempo indesejável entre o momento em que o Arduino aciona a função que inicia a contagem do tempo e o momento de início do movimento do sistema, sendo que esses momentos deveriam ser simultâneos.

A linguagem de programação usada no Arduino possui uma função de atraso que pausa o programa no momento em que ela é executada. Por meio dela é possível determinar o local da pausa e o intervalo de tempo. A unidade de tempo usada na função é o milissegundo. Com essa função é possível inserir uma pausa entre o momento de acionamento do relé e o início da contagem do tempo do movimento. A Figura 48 mostra a função *delay* no local onde foi inserida no programa.

¹⁵ As especificações do módulo relé apontam um tempo de resposta variando entre 5 ms e 10 ms. Como exemplo, consultar <https://www.filipeflop.com/blog/controle-modulo-rele-arduino/>. Acessado em: 10 abr. 2018.

Figura 48 – Parte do programa “MaquinaAtwood” mostrando o local da função *delay*.



```

MaquinaAtwood | Arduino 1.8.5
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

MaquinaAtwood

Serial.println(); // salta uma linha de
Serial.println("Ligado"); // imprime "Ligado"
}
else { // executa se o if nã
  if(x==1){ // executa se o led e
    x=0; // atribui valor 0 a
    1 digitalWrite(11, HIGH); // sinal HIGH no IN
    bluetooth.println("INICIO"); // imprime no mon:
    Serial.println("INICIO"); // imprime no monito:
    2 delay(10); // atraso na contager
    tempo=millis(); // função que inicia
    3 do{ // laço executado en
      sensor=analogRead(A0); // armazena a leitura
      if(sensor>750){ // condição quando o
        tempo=millis()-tempo; // calcula o interval
        bluetooth.println(); // salta uma linha
        bluetooth.print(tempo/1000); // imprime o valo:
        bluetooth.print(","); // imprime uma ví:
        bluetooth.print(tempo%1000); // imprime a parte
        bluetooth.print(" seg"); // imprime "seg" logo

```

Fonte: O próprio autor.

A seta **1**, na Figura 48, indica a linha de comando que desliga o relé. Nas próximas linhas o programa retorna mensagem na tela. Devido aos fatores já mencionados, o início do movimento do sistema sofre um retardo. Um pouco abaixo, a seta **2** indica o ponto onde o programa irá pausar, evitando que a linha de comando indicada pela seta **3** seja lida – a linha que inicia a contagem do tempo do movimento. A função *delay* é seguida por um parêntesis onde o valor do tempo de pausa desejado pode ser inserido, lembrando que a unidade é o milissegundo (milésimo de segundo). Recorrendo novamente a imagem da Figura 48, está programada uma pausa de 10 milésimos de segundo entre o desligamento do eletroímã e o início da contagem do

tempo. O valor pode ser ajustado de modo a aproximar o valor experimental do valor esperado. Uma série de três experimentos foram realizados como teste para ajuste da pausa. A primeira medição foi realizada com uma pausa de 1 ms (um milissegundo). A Tabela 2 apresenta medidas que foram utilizadas para o cálculo da aceleração da gravidade local comparada ao valor teórico de $9,80 \text{ m/s}^2$. O erro relativo foi calculado com base nesse valor.

Tabela 2 – Medições de aceleração da gravidade realizadas com pausa programada de 1 milissegundo.

	Δt	$\Delta t_{\text{médio}}$	y (m)	a (m/s^2)	m_1 (g)	m_2 (g)	aceleração da gravidade (m/s^2)	erro relativo (%)
Δt_1	0,681							
Δt_2	0,682	0,682	0,50	2,152	62,7	39,0	9,43	3,82
Δt_3	0,682							

Fonte: O próprio autor.

A tabela apresenta três medições de tempo para o movimento, a partir do repouso, da massa m_2 ao percorrer a distância y do ponto de partida ao sensor. Partindo das equações da Cinemática para o Movimento Retilíneo Uniformemente Acelerado, foi obtido o valor experimental da aceleração e o valor inserido na tabela. A partir das massas m_1 e m_2 medidas e a aceleração do sistema, pela Segunda Lei de Newton, calculou-se a aceleração da gravidade, cujo valor se encontra na Tabela 2. Considerando o valor teórico $9,80 \text{ m/s}^2$ como parâmetro referencial, o erro percentual relativo foi de 3,82%. O mesmo procedimento foi repetido mantendo os mesmos parâmetros de distância, massa total e diferença de massa. No entanto, o valor do atraso (*delay*) foi alterado para 5 milissegundos e 10 milissegundos. As novas medições foram usadas nos cálculos e os resultados se encontram na Tabela 3. Recomenda-se sempre fazer os ajustes necessários para uma melhor eficiência do equipamento. Por se tratar de equipamento de medição, ajustes sempre são bem-vindos principalmente por se tratar de equipamentos com maior sensibilidade. Para facilitar a comparação, os dados da Tabela 2 foram acrescentados.

Tabela 3 – Medidas realizadas com valores diferentes de atraso.

Δt	$\Delta t_{\text{médio}}$	y (m)	a (m/s ²)	m_1 (g)	m_2 (g)	aceleração da gravidade (m/s ²)	erro relativo (%)
delay 1 ms							
Δt_1	0,681						
Δt_2	0,682	0,682	0,50	2,152	62,7	39,0	9,43
Δt_3	0,682						3,82
delay de 5 ms							
Δt_1	0,674						
Δt_2	0,675	0,675	0,50	2,152	62,7	39,0	9,61
Δt_3	0,676						1,91
delay de 10 ms							
Δt_1	0,670						
Δt_2	0,673	0,672	0,50	2,152	62,7	39,0	9,71
Δt_3	0,672						0,94

Fonte: O próprio autor.

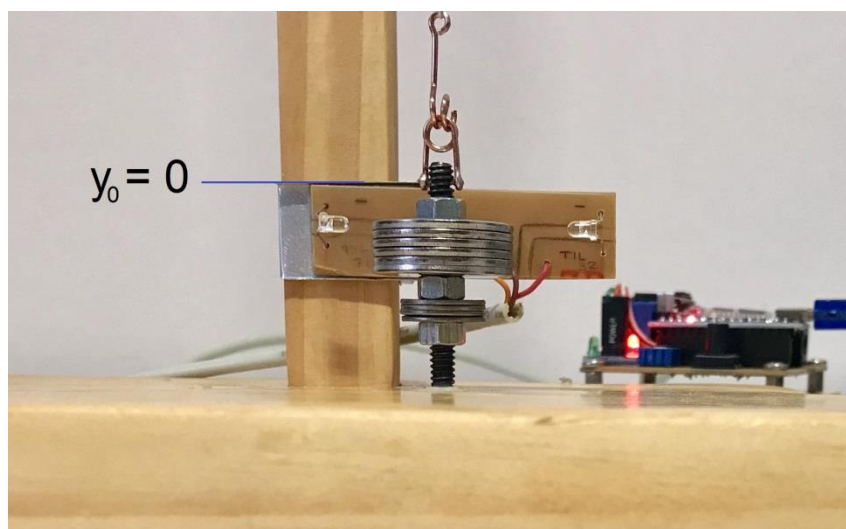
Valores próximos a 10 milissegundos de atraso levam o erro relativo percentual para valores em torno de 1%. O mesmo experimento, sem o atraso, leva o erro à 4%, o que se pode considerar um valor experimental satisfatório tendo em vista que se trata de uma Máquina de Atwood.

Estudos sobre a Máquina de Atwood foram realizados por Siqueira, Almeida e Frejlich (1999) apontando fatores de propagação de erros. Segundo esse estudo, a precisão na medida das massas e do tempo são fatores importantes para o melhoramento dos resultados. Mesmo que seja conseguida uma boa precisão, as pequenas imprecisões de cada medida se acumulam. Cada medida de massa gera uma incerteza. Como o sistema precisa da diferença das massas, a subtração de duas medidas incertas gerará outra medida imprecisa. Equipamentos que funcionam usando cronômetros com acionamento manual produzirão resultados bem mais imprecisos se comparados a sistemas automatizados. Equipamentos com tamanho reduzido fazem com que as massas se movam por deslocamentos menores, inserindo erro na medida. Através desses estudos, algumas conclusões contribuíram para a construção do equipamento:

1. Valores muito pequenos para diferença de massa m_1 e m_2 aumentam o erro experimental.
2. Valores muito pequenos para a massa total do sistema aumentam o erro experimental.
3. A medida do tempo deve ser a mais precisa possível, preferencialmente por meio de sistemas automatizados.

Dessa forma, a automatização do tempo com sensor e eletroímã, com o recurso da programação de atraso no início da contagem do tempo, tornando simultâneo o início do movimento do sistema e início do cronômetro, bem como o uso do sensor óptico para também ser simultânea a parada da contagem do tempo com a passagem do corpo pela posição final, foi uma das metas. O uso de balança com precisão de 0,1 grama nas medições das massas também decorre das conclusões e o cuidado no posicionamento do sensor para que a altura seja precisamente medida. Para tanto, o sensor foi, inicialmente, posicionado na parte inferior e a leitura foi feita com a ideia de se determinar o ponto de referência para medir a distância percorrida pelo corpo, da base, até o ponto onde o sensor esteja posicionado. Essa distância corresponde ao Δy mostrado na Figura 05. A Figura 49 mostra a massa presa ao eletroímã e o sensor em um ponto na iminência de detectar a presença da massa.

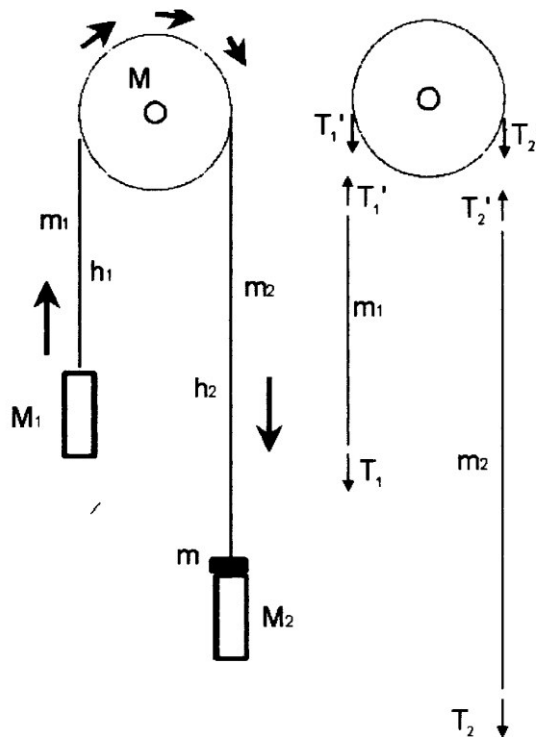
Figura 49 – Marcação da referência para determinação do Δy .



Fonte: O próprio autor.

Marcada a posição de referência, qualquer outro ponto onde estiver o sensor sobre a haste de sustentação terá sua posição conhecida medindo sua distância a partir da posição inicial já marcada. Embora a medida do deslocamento da massa não seja um fator de erro tão significativo se comparado a outros, uma variação de medida de ± 2 mm pode significar um erro relativo variando de 0,54% até 1,33%. Siqueira, Almeida e Frejlich (1999) ainda apresentaram, em seu estudo, uma equação baseada na teoria da propagação de erros que permite avaliar como otimizar os resultados experimentais fornecendo uma orientação sobre onde buscar o refinamento do experimento. A Figura 50 mostra uma análise mais detalhada da Máquina de Atwood, considerando a massa da polia (M), as massas de cada lado do fio (m_1 e m_2), a massa extra (m), as massas M_1 e M_2 e a altura h .

Figura 50 – Esquema da Máquina de Atwood indicando as massas. À direita, o esquema do corpo livre com as forças T' e T .



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 21, N° 1, p. 96, março, 1999.

Partindo do esquema mostrado na Figura 50, a equação da propagação de erro, para o cálculo do erro na determinação da aceleração da gravidade, será:

$$\frac{\Delta g}{g} \approx \frac{|\Delta M_1| + |\Delta M_2|}{M_2 - M_1 + m} + \frac{|\Delta M_1| + |\Delta M_2| + |\Delta M/2|}{M_1 + M_2 + M/2} + \frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{|\Delta t|}{\sqrt{\frac{M_1 + M_2 + M/2}{M_2 - M_1 + m}}} \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad (20)$$

A ideia é se concentrar nas massas M_1 e M_2 , na altura e no tempo. Analisando a equação 20, é possível perceber que o primeiro termo cresce quando a diferença de massa ($M_2 - M_1 + m$) é pequena. O segundo termo cresce quando a massa total do sistema é pequena e o terceiro e quarto termos crescem quando a altura (h) é pequena, exigindo precisão na sua medida (terceiro termo) e na medida do tempo (quarto termo). Para isso, um sistema com massa total da ordem de 100 g teve uma distribuição de tal modo que a diferença de massa varia entre o mínimo de 15 g e o máximo de 25 g. Essa diferença de massa permitiu obter medidas experimentais com erros relativos bem abaixo dos 5%. Equipamentos montados inicialmente com massas totais da ordem de 15 g e diferença de massa em torno de 1 g apresentaram erros de medidas muito acima dos 5%, até chegando aos 30%. Experimentos realizados com a Máquina de Atwood precisam de uma massa total e uma diferença de massa consideráveis. Mesmo que a massa total o seja, se a diferença for pequena as medidas serão altamente imprecisas.

A preparação, montagem do equipamento e realização de medições não constituem tarefas complexas. Em testes realizados, foram executadas várias medições. Para isso, as massas foram alteradas várias vezes e medidas com uso de uma balança de precisão 0.1 grama. Durante os testes o manuseio das massas não apresentou problemas ou dificuldades de montagem. As medidas realizadas foram coerentes, dentro de um valor esperado com erros relativos normalmente abaixo dos 5%. Após refinamentos e ajustes os erros estavam próximos dos 2% ou menos. A montagem sobre uma base de madeira e uma placa de circuito tornou o circuito estável e desprovido de falhas de contato elétrico, o que é muito importante. A conexão entre o Arduíno e outros aparelhos foi realizada sem problemas. Tanto no

computador quanto no *smartphone*, não foi verificada nenhuma falha comprometedora.

5 ATIVIDADES SUGERIDAS

Basicamente a Máquina de Atwood tem como finalidade a comprovação da Segunda Lei de Newton. As atividades sugeridas para seu uso se direcionam a esse objetivo muito embora existam possibilidades de abordagens em outros campos teóricos. Trabalhar os princípios da Mecânica envolve analisar o fenômeno físico observado e descrevê-lo prevendo resultados ou chegando a eles por estratégias diferentes. Na máquina, essa estratégia se apresenta por comparação entre resultados obtidos através da Cinemática, da análise das relações entre espaço e tempo, e os resultados apresentados pela Dinâmica obtidos a partir das relações entre forças (no caso, os pesos) e massas. Enquanto uma balança de precisão pode auxiliar na obtenção de valores de massa, a obtenção das relações entre tempo e espaço carecem de uma atenção maior visto ser uma medida que é realizada com o sistema em movimento, diferente da estática da medição da massa em uma balança. Medidas de tempo em espaços curtos apresentam complexidade maior, exigindo maior sensibilidade e habilidade da parte de quem realiza a medição manualmente. Nesse aspecto, o Arduino surge como automatizador do processo, reduzindo erros gerados pela interferência humana.

Como já considerado, o equipamento abre um leque de possibilidades de uso. Levando em consideração o contexto muitos usos seriam facilmente descartados dada a sua complexidade de análise, tempo de execução e outros fatores. Toda atividade experimental que se pretende realizar deve estar atrelada e ser conduzida por fatores como:

1. O objetivo a ser atingido, que tem a ver com o conteúdo.
2. As condições de aplicação.

5.1 – Objetivo a ser atingido.

É requisito em todo procedimento que se estabeleça um objetivo a ser atingido e que este esteja bem delimitado. Um alvo a ser focado leva a objetividade

que se liga a simplicidade. Antes de tudo, deve-se pensar na questão: onde esse experimento vai levar? Obviamente que as conclusões a que chegarão os alunos que o manusearem não precisam ser necessariamente engessadas. Pensar o ensino dessa forma é torna-lo doutrinador, coisa questionável para aqueles que vislumbram um ensino que leve ao questionamento, a abertura de novas ideias, a busca de novos caminhos, a quebra de paradigmas e o avanço no pensamento humano e científico. Mesmo no Ensino Médio, é possível trabalhar conceitos físicos bem alicerçados com a liberdade de questionamento que o experimento pode proporcionar. Problemas em sala de aula que são propostos nos livros são idealizados de forma a possuir uma solução dentro de um procedimento que segue uma sequencia e uma teoria. Seguindo aquele procedimento, há de se chegar a solução. Atividade experimental permite, mesmo seguindo um procedimento já determinado, a possibilidade de apresentar resultados que se aproximem ou não dos valores esperados. Nesse prisma, a atividade pode gerar um ambiente de discussão bastante enriquecedora.

Mesmo com resultados previsíveis, e ao mesmo tempo inesperados, todo procedimento deve possuir um direcionamento. Por exemplo, usando a máquina, pode-se fazer um estudo da relação entre a força resultante no sistema e a aceleração adquirida. Como predito pela segunda lei, essa relação deve ser linear. Nesse sentido, há um resultado esperado e inúmeras situações que podem ocorrer durante a sua realização que produzam resultados paralelos passíveis de considerações.

5.2 – Condições de aplicação.

Fatores estruturais falam alto na maneira como a atividade deve ser realizada. Em alguns casos, existem ambientes propícios para realização de experimento. Algumas unidades escolares possuem laboratórios destinados a esse fim. Outras possuem salas que poderão ser usadas e ainda outras não possuem espaço algum além da própria sala de aula. Para cada caso há uma adaptação a se fazer. Quando existem espaços próprios para laboratório, as condições para

realização de um experimento mais bem elaborado são maiores. Em sala de aula o processo deve ser muito mais simplificado. No laboratório, grupos menores podem ser conduzidos e monitores podem ser escalados para prestar auxílio. Claro que há necessidade da presença de mais de um equipamento. O fator tempo não pode ser desconsiderado. No Ensino Médio, o laboratório normalmente é usado como um apoio a aula teórica. Funciona diferente do que ocorre no Ensino Superior, onde o laboratório constitui uma disciplina ou uma parte da avaliação dentro de uma disciplina. Mesmo que ela seja uma parte da avaliação de uma disciplina, no Ensino Médio ainda persiste o conceito de que o laboratório é um espaço lúdico, onde o aluno vai para lá apenas “ver coisas interessantes”. Diferentemente de quando o aluno vai a uma sala fazer uma avaliação, a ida ao laboratório muitas vezes é encarada como um passatempo. Dessa forma, o pouco tempo disponível não consegue ser totalmente direcionado ao procedimento. Roteiros longos tendem a desanimar. São dispersantes de atenção. Procedimentos que se arrastam por semanas costumam não ser finalizados. Procedimentos, mesmo que fracionados, mas curtos e simples fornecem bons resultados do ponto de vista da execução.

5.3 – Sugestões de aplicações para o equipamento.

No APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL estão disponíveis sugestões de procedimento experimental. Um esquema de construção de um equipamento e roteiros práticos para aulas. Adaptações podem ser realizadas tendo em vista os fatores já mencionados.

5.3.1 – Determinação da relação entre força resultante e aceleração do sistema.

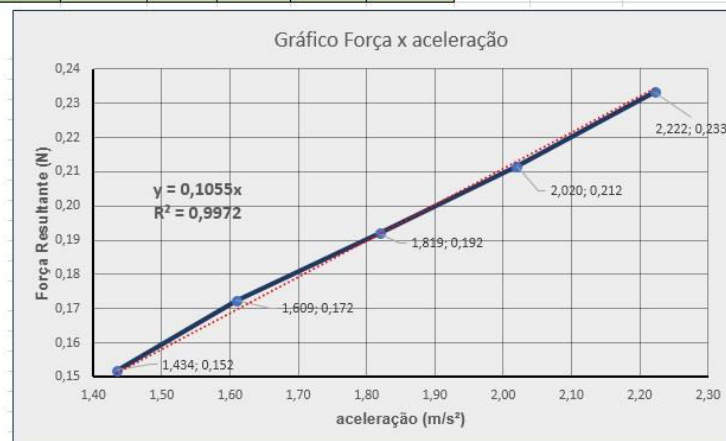
Uma aplicação possível é a determinação da relação entre a força resultante e a aceleração de um sistema de massa constante. Uma série de medições foram realizadas e os resultados foram lançados em uma planilha preparada para receber os dados e realizar alguns cálculos. A partir desses dados, a

aceleração do sistema é calculada usando conceitos de Cinemática Escalar. Como o sistema parte do repouso, o cálculo da aceleração se torna uma tarefa bastante simples. Visando minimizar os erros, sugere-se realizar o cálculo usando uma média aritmética de tempo. Quanto mais medições forem realizadas, mais o erro será diluído. Entretanto, o fator tempo de aula novamente deve ser considerado ao determinar quantas medidas deverão ser feitas para a obtenção do valor final.

Como exemplo, realizaram-se cinco medidas de tempo para cada conjunto de massas. O resultado da aceleração foi inserido na planilha. Deslocando um disco de cada vez e realizando as medições foram obtidos cinco pares de valores (Δm , $\Delta t_{\text{médio}}$). A Figura 51 mostra os dados, resultados e gráficos na planilha.

Figura 51 – Planilha contendo as medidas realizadas para obtenção da relação entre aceleração do sistema e força resultante.

Δt	média de t	y	m1	m2	massa total	m1.m2	aceleração	resultante (N)
	0,835	0,5	60,5	43	103,7	15,5	1,434	0,152
	0,788		61,6	42		17,6	1,609	0,172
	0,741		62,6	41		19,6	1,819	0,192
	0,704		63,6	40		21,6	2,020	0,212
	0,671		64,7	38,9		23,8	2,222	0,233
Tempo	medida 1	medida 2	medida 3	medida 4	medida 5			
	0,84	0,793	0,74	0,705	0,671			
	0,835	0,79	0,742	0,705	0,671			
	0,835	0,788	0,74	0,703	0,67			
	0,831	0,785	0,743	0,701	0,671			
	0,835	0,786	0,742	0,704	0,671			
Médias	0,835	0,788	0,741	0,704	0,671			



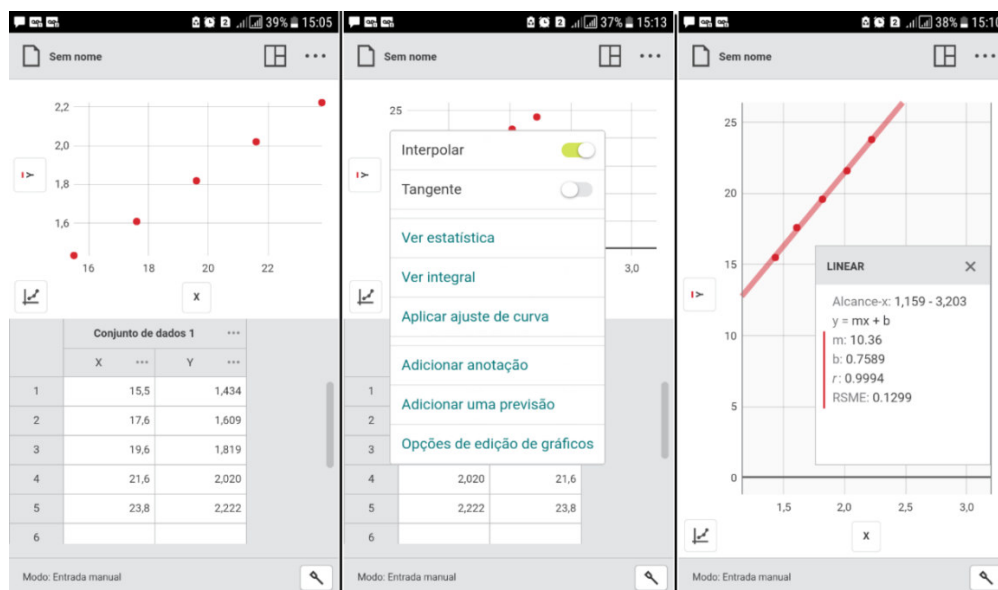
Fonte: O próprio autor.

No APÊNDICE A encontra-se uma figura da mesma planilha exibindo alguns comentários explicativos. A Figura 51 mostra as medições, resultados calculados e o gráfico gerado a partir das colunas “aceleração” e “ Resultante”. O gráfico em azul foi

obtido solicitando ao *software* que trace uma linha passando pelos pontos experimentais. O gráfico, formado por uma reta pontilhada, em vermelho, foi ajustado, por aproximação, pelo próprio *software*, aos pontos fornecidos pelo experimento. Visualmente, o gráfico real (azul) e o gráfico ajustado (vermelho) estão muito próximos. Curiosamente, o coeficiente angular da reta, correspondente ao gráfico vermelho, fornece o valor da massa total do sistema, em kg, com um erro de 1,74%. A aproximação visual entre o gráfico experimental e a reta fornecida pelo *software*, bem como a relação entre o coeficiente angular da reta e a massa total do sistema, são previstos pelo Princípio Fundamental da Dinâmica.

Devido ao fator tempo, pode-se reproduzir a planilha do APÊNDICE A e distribuir nos computadores uma cópia. O uso da planilha reduz significativamente o tempo usado na realização da prática. É preferível que os resultados sejam apresentados ao final do experimento. Caso haja computadores disponíveis com planilhas instaladas é interessante a análise imediata dos dados pelos alunos. Na ausência do recurso, o processo pode ser simplificado realizando manualmente os cálculos de aceleração e usar aplicativos disponíveis para smartphones para plotagem de gráficos a partir dos dados. Como exemplo, o *Graphical Analysis™* desenvolvido pela *Vernier Software & Technology*, interpola pontos fornecendo o gráfico e a função. Na Figura 52, há uma série de imagens da tela do aplicativo.

Figura 52 – Sequência de imagens da tela do aplicativo *Graphical Analysis* com os dados na tabela e o gráfico gerado.



Fonte: O próprio autor.

Ao iniciar o aplicativo, escolher entrada manual de dados, preencher os valores de x e y, interpolar e aplicar ajuste de curva. O aplicativo não é de difícil manuseio. Com um pouco de prática ele se torna muito simples. Os dados são inseridos no aplicativo via teclado e o ícone no centro, á esquerda, abre as opções de interpolação. O ícone no canto superior, á direita, exibe o gráfico, a tabela ou ambos. O aplicativo ocupa 23,58 Mb de espaço no dispositivo.

5.3.2 – Comparar a aceleração do sistema obtida pela Cinemática com a aceleração do sistema obtida pela Dinâmica.

O segundo procedimento consiste em obter o valor da aceleração do sistema a partir da equação da Cinemática e comparar com o valor da aceleração obtido pela Segunda Lei de Newton. Considerando a Cinemática como parâmetro, calcular o erro percentual relativo entre as duas acelerações obtidas. Otimizando a descrição, os mesmos dados usados como exemplo no procedimento anterior serão usados aqui também. Como foram calculadas todas as acelerações para todos os conjuntos de massas, serão realizadas as cinco comparações entre os cinco valores obtidos pela Cinemática, já presente na tabela, com os cinco valores obtidos pela Dinâmica, calculados a partir dos mesmos dados da tabela, na coluna I modificada para esse fim.

Figura 53 – Planilha com as acelerações obtidas pela Cinemática e Dinâmica e o erro percentual relativo para cada par de valores.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Δt	média de t	y	m1	m2	massa total	m1-m2	aceleração Cinemática	aceleração Dinâmica	erro %	=100*ABS(H6-I6)/H6 Cálculo do erro relativo usando a coluna H como referência. A função ABS retorna o módulo da diferença entre as colunas D e E.	
2		0,835	0,5	60,5	43	103,7	15,5	1,434	1,465	2,18		
3		0,788		61,6	42		17,6	1,609	1,663	3,38		
4		0,741		62,6	41		19,6	1,819	1,852	1,81		
5		0,704		63,6	40		21,6	2,020	2,041	1,05		
6		0,671		64,7	38,9		23,8	2,222	2,249	1,21		
7												
8	Tempo	medida 1	medida 2	medida 3	medida 4	medida 5	=1/B6^2 Calcula a aceleração do sistema pela equação da Cinemática. a = 2y/t^2	=9,8*(G6/F2) Equação da Dinâmica para aceleração do sistema. a = g(m1-m2)/(m1+m2)				
9		0,84	0,793	0,74	0,705	0,671						
10		0,835	0,79	0,742	0,705	0,671						
11		0,835	0,788	0,74	0,703	0,67						
12		0,831	0,785	0,743	0,701	0,671						
13	0,835	0,786	0,742	0,704	0,671							
14	Médias	0,835	0,788	0,741	0,704	0,671						
15												

Fonte: O próprio autor.

Basicamente, a planilha da Figura 53 é a mesma planilha da Figura 51 com exceção das colunas I e J que constituem o cálculo da aceleração, pela Segunda Lei de Newton, e o cálculo do erro relativo percentual, respectivamente. Não há necessidade de se realizar o cálculo para todos os conjuntos de massas afim de realizar o comparativo. Esse experimento pode ser simplificado para cada grupo solicitando apenas o cálculo para uma diferença de massa e podendo designar uma diferença para cada grupo de modo que cinco grupos diferentes poderão realizar medidas bem diferentes. Como o objetivo do experimento é a verificação da validade da Segunda Lei de Newton, consideramos a aceleração obtida pela Cinemática como referencial para realizar o comparativo de resultados.

5.3.3 – Determinação da aceleração da gravidade.

Uma terceira sugestão de aplicação seria a determinação da aceleração da gravidade. Embora existam estratégias mais simples e eficientes para atingir esse resultado, como o pêndulo simples, a análise física e matemática do pêndulo é mais complexa se comparada a Máquina de Atwood. A Figura 54 mostra a planilha ajustada para que a coluna I realize o cálculo da aceleração da gravidade e a coluna J calcule o erro percentual relativo ao valor obtido na literatura, de $9,8 \text{ m/s}^2$.

Figura 54 – Planilha de cálculo da aceleração da gravidade experimental comparada ao valor teórico.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		média de t	y	m1	m2	massa total	m1.m2	aceleração Cinemática	g	erro %	
2		0,835		60,5	43		15,5	1,434	9,591	2,13	
3		0,788		61,6	42		17,6	1,609	9,479	3,27	
4		0,741	0,5	62,6	41	103,7	19,6	1,819	9,625	1,78	
5		0,704		63,6	40		21,6	2,020	9,698	1,04	
6		0,671		64,7	38,9		23,8	2,222	9,683	1,19	
7											
8		medida 1	medida 2	medida 3	medida 4	medida 5					
9		0,84	0,793	0,74	0,705	0,671					
10		0,835	0,79	0,742	0,705	0,671					
11		0,835	0,788	0,74	0,703	0,67					
12		0,831	0,785	0,743	0,701	0,671					
13		0,835	0,786	0,742	0,704	0,671					
14		Médias	0,835	0,788	0,741	0,704	0,671				
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											

$=2 \cdot C^2 / B6^{\wedge}2$
 Calcula a aceleração do sistema pela equação da Cinemática.
 $a = 2y/t^2$

$=H6^*(F2/G6)$
 Equação da Dinâmica para aceleração do sistema.
 $g = a(m1+m2)/(m1-m2)$

$=100*(9,8-I6)/9,8$
 Cálculo do erro relativo usando a aceleração g (9,8 m/s²) como referência.

Fonte: O próprio autor.

Os erros relativos entre 1% e 2%, com uma medida se aproximando de 3,3%, indicam uma precisão considerável. O tempo gasto na realização do experimento foi bastante reduzido tornando possível realizar uma quantidade maior de medições de tempo.

Em todos os experimentos as tabelas apresentam as medidas de massa em grama. Como as acelerações possuem dimensão $[LT^{-2}]$ qualquer cálculo de aceleração, obtido através da Equação 18, seja para determinar a aceleração a do sistema, seja para determinar a aceleração g da gravidade, poderá ser executada com as massas em qualquer unidade, contanto que seja a mesma para todas. O termo $\frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2 + m')}$ não possui dimensão.

6 CONCLUSÃO

A relativa facilidade com que equipamentos podem ser construídos usando tecnologias que há bem pouco tempo não se imaginava estarem disponíveis por custos financeiros bem reduzidos é uma realidade atual que privilegia os envolvidos no ensino. Mas, para que essa realidade possa efetivamente ser concretizada, esforços são necessários. Mesmo se tratando de um equipamento de fácil montagem, pois não requer habilidades especiais para isso, o tempo para construí-lo pode se tornar um fator determinante para a sua não execução. Professores sobrecarregados, com cargas horárias extremas, dificilmente conseguiriam sequer usar o equipamento, muito menos, construí-lo eles mesmos. Mesmo não sendo possível construir várias máquinas para uso simultâneo por uma turma, se apenas um for montado, o sistema poderá ser muito bem utilizado em uma sala de aula. Até mesmo uma simples demonstração atrai olhares. Leva a Física puramente conceitual, construída em sala de aula à base essencialmente da imaginação, para uma Física mais real, mesmo que a situação descrita pela Máquina de Atwood não seja observada facilmente em nossa volta. Mas o fato de um fenômeno descrito em sala de aula, resolvido por meios matemáticos, apresentar um valor que acreditamos ser a descrição exata e harmoniosa do acontecimento, ser comprovado pelo experimento, eleva a concepção da Física pelo próprio aluno a outro nível. Teorias, sejam elas quais forem, quando expostas aos testes de veracidade e devidamente comprovadas, mudam a forma como são vistas. Elas ganham alicerces que antes não possuíam. Uma forma de “existência própria”. Não “existe” porque o professor disse que era assim, mas porque foi visto por meio de um experimento que é assim. Um experimento, seja ele apenas demonstrativo, seja ele uma prática laboratorial onde o aluno exerça uma participação ativa, terá sempre seu valor no ensino.

Partindo do ponto de vista de tornar o processo de aprendizagem interativo, inclusive trazendo as tecnologias para o ensino, a construção de um equipamento que contribua com o processo de aprendizagem e que possa ser de simples confecção é uma ideia atraente. Máquinas de Atwood estão disponíveis para aquisição. Comumente, essas máquinas funcionam analisando a rotação da

polia e, pela sua aceleração angular, traçam o gráfico da velocidade do corpo. Máquinas assim devem ser analisadas a luz da Cinemática Rotacional. Inicialmente foi cogitada a ideia de se produzir sensores e um programa que fornecesse a leitura da frequência de rotação da polia e convertesse esses dados de modo que pudessem ser lidos e interpretados. No entanto, se perderia a oportunidade de se realizar um confronto entre a Cinemática do Movimento Retilíneo Uniformemente Variado e a Segunda Lei de Newton em um corpo que se desloca em uma linha reta. A análise do ponto de vista da Cinemática, a priori, seria transferida para a polia, já que os sensores estariam nela, se transformando em um estudo da Cinemática Rotacional, para depois ser relacionada ao movimento retilíneo do corpo. Isso levaria mais tempo e inflaria o conteúdo a ser trabalhado por acrescentar outro tópico. Mesmo estando os temas relacionados, do ponto de vista didático, não seria recomendável devido à mudança acentuada no conteúdo. Manter o sensor no corpo ajuda a direcionar o foco do estudo às massas.

Os resultados dos testes experimentais foram, em todos os casos, muito satisfatórios. Embora não tenham sido usados na demonstração das aplicações do equipamento, descritas no capítulo 5, o APÊNDICE E traz alguns resultados que foram obtidos nesses testes. Esses resultados conduziram a construção do equipamento, ao identificar fatores que contribuem mais intensamente para erros nos resultados. Em termos gerais, pode-se afirmar que o equipamento, com base em várias medidas e testes realizados, é capaz de fornecer medidas confiáveis, medidas que se harmonizam com os fatos físicos e com a teoria. Para que o processo de ensino possa fluir de maneira suave é essencial que as ferramentas utilizadas, sejam elas quais forem, funcionem a contento, apresentando aquilo que se espera dentro de uma margem de erro tolerável.

De fácil construção e com a contribuição dos dispositivos móveis, a Máquina de Atwood, usando a plataforma Arduíno, se mostra uma ferramenta valiosa na apresentação de fatos concretos que levem os alunos a construir uma concepção sobre o movimento, seja ele do ponto de vista da Cinemática, seja do ponto de vista da Dinâmica, bem alicerçada em acontecimentos reproduzidos, testados e estudados. Vivenciar o processo científico com investigação, estudo, comparação e conclusão no período do Ensino Médio constitui uma experiência

marcante para o aluno. Uma metodologia que, ao longo dos anos, tem mostrado sua eficiência em trazer os jovens para o mundo fascinante das Ciências da Natureza.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S. T; ABIB, M. L. V. S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 25, n. 2, jun. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v25n2/a07v25n2.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2017.

BAYLOR, C. **Woodworking with Medium-Density Fiberboard (MDF) - Is there a Place for Medium Density Fiberboard in Fine Woodworking Projects?** Disponível em: <<https://www.thesprucecrafts.com/woodworking-with-medium-density-fiberboard-mdf-3536907>>. Acesso em: 6 jan. 2018.

BRASIL. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+). Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, MEC, 2006. disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

CAVALCANTE, M. A; TAVOLARO, C. R. C; MOLISANI, E. Física com Arduíno para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 33, n. 4, out/dez 2011. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/334503.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2018.

Diferença entre os módulos HC-05 e HC-06; Disponível em: <<https://www.arduinoocia.com.br/2015/01/diferenca-bluetooth-hc-05-hc-06.html>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

FARIA, A. F; VAZ, A. M. Experiências de Pensamento Científico em Aulas de Física. **Investigações em Ensino de Ciências**. Porto Alegre. v. 23, n. 1, pp. 266-294, 2018. Quadrimestral. ISSN 1518-8795. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/1058/pdf>> Acesso em: 10 abr. 2017.

NEVES, M. C. D. Uma Investigação Sobre a Natureza do Movimento ou Sobre Uma História Para a Noção do Conceito de Força. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 543, dez. 2000. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_543.pdf. Acesso em 08 abr. 2017.

RESNICK, R; HALLIDAY, D; KRANE, K. S. **Física 1**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

SILVA, J. C. X; LEAL, C. E. S. Proposta de Laboratório de Física de Baixo Custo para Escolas da Rede Pública de Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 39, n. 1, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v39n1/1806-1117-rbef-39-01-e1401.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2018.

SIQUEIRA, A; ALMEIDA, A. C. S; FREJLICH, J. Máquina de Atwood. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 95, mar. 1999. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v21_95.pdf> Acesso em: 17 abr. 2017.

SoftwareSerial Library. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Reference/SoftwareSerial>. Acesso em: 27 abr. 2017.

SOUZA, A. R; PAIXÃO, A. C; UZÊDA, D. D; DIAS, M. A; DUARTE, S; AMORIM, H. S. A placa Arduíno: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 33, n. 1, jan/mar 2011. Disponível em: <http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/331702.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2018.

SOUZA, P. V. S; DONANGELO, R. Velocidades média e instantânea no Ensino Médio: uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 34, n. 3, jul/set 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v34n3/a17v34n3.pdf> Acesso em: 6 jan. 2018.

TRENTIN, M. A. S; ROSA, C. T. W; ROSA, A, B; TEIXEIRA, A. C. Robótica educativa livre no ensino de Física: da construção do robô à elaboração da proposta didática de orientação metacognitiva. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**. Curitiba, v. 8, n. 3, mai-ago, 2015. ISSN - 1982-873X. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/1950>. Acesso em: 10 mai. 2018.

VIGGIANO, E; MATTOS, C. Quais São as Visões Existentes Sobre Ensinar e Aprender? *In*: VII ENPEC - Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009, Florianópolis, **Trabalhos...** Belo Horizonte, 2009. ISSN 21766940. Disponível em: <http://posgrad.fae.ufmg.br/posgrad/viienpec/pdfs/1523.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

VILLANI, C. E. P; NASCIMENTO, S. S. A Argumentação e o Ensino de Ciências: Uma Atividade Experimental no Laboratório Didático de Física do Ensino Médio. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, pp. 187-209, 2003. Quadrimestral. ISSN 1518-8795. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/539>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

What is Arduino? Disponível em: www.arduino.cc Acesso em: 13 abr. 2017.

Tutoriais Arduino:

<https://pandoralab.com.br/aprenda/>

<https://www.tutorialspoint.com/arduino/>

<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>

<http://labdegaragem.com/page/shields>

Brincando com ideias. Disponível em:

https://www.youtube.com/channel/UCcGk83PAQ5aGR7IVID_cBaw

Curso Arduino. Disponível em:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL05085BAC19CB5DF1>.

APÊNDICE A – PLANILHA DE MEDIDAS MOSTRANDO A RELAÇÃO FORÇA VERSUS ACELERAÇÃO.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Δt	média de t	y	m1	m2	massa total	m1-m2	aceleração	resultante (N)
2		0,835	0,5	60,5	43	103,7	15,5	1,434	0,152
3		0,788		61,6	42		17,6	1,609	0,172
4		0,741		62,6	41		19,6	1,819	0,192
5		0,704		63,6	40		21,6	2,020	0,212
6		0,671		64,7	38,9		23,8	2,222	0,233
7									
8	Tempo	medida 1	medida 2	medida 3	medida 4	medida 5			
9		0,84	0,793	0,74	0,705	0,671			
10		0,835	0,79	0,742	0,705	0,671			
11		0,835	0,788	0,74	0,703	0,67			
12		0,831	0,785	0,743	0,701	0,671			
13	0,835	0,786	0,742	0,704	0,671				
14	Médias	0,835	0,788	0,741	0,704	0,671			

=(SOMA(B9:B13))/5
Calcula a média aritmética das medidas do tempo para a mesma diferença de massa

=F14
Recebe as médias da linha 14

=2*C2/B6^2
Calcula a aceleração do sistema pela Cinemática.
 $a = 2y/t^2$

=D6-E6-2
Diferença de massa: Os valores da coluna D incluem a massa de compensação de 2 gramas. Por isso subtrai-se 2 ao resultado. Apenas a massa total inclui a massa de compensação.

=G6*9,8/1000
Cálculo da força resultante. A divisão por 1000 transforma em kg. O produto por 9,8 transforma em Newton (N).

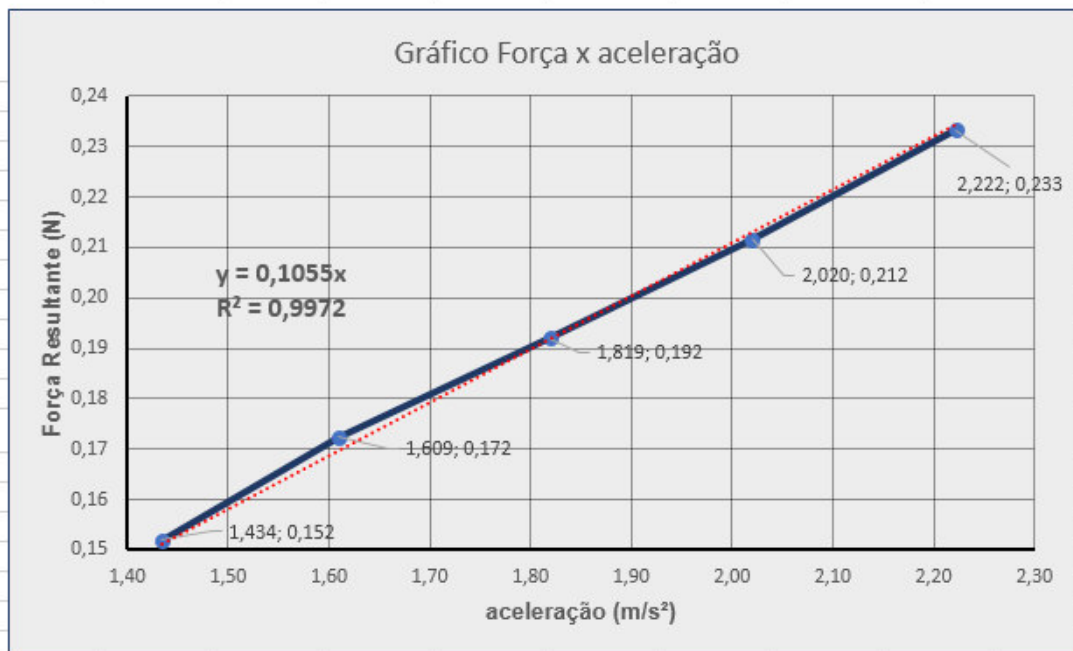


Gráfico gerado a partir das colunas "aceleração" e "resultante" com a linha de tendência linear, a função interpoladora linear e o R².

APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL

INTRODUÇÃO

A busca por uma metodologia de ensino que supere as dificuldades que se apresentam, especialmente no ensino da Física, é uma constante na prática docente. Reflexões sobre o assunto multiplicam-se na busca do *como fazer* a fim de tornar o estudo mais acessível e atraente a um perfil discente atual inserido em um mundo repleto de estímulos de toda natureza, principalmente tecnológica. Naturalmente, nos sentimos atraídos a compreender os fenômenos físicos que nos cercam, especialmente nos períodos iniciais da jornada escolar. Um olhar crítico sobre nós professores nos ajudará a identificar atividades que, sob o olhar do aluno, possam realmente conduzir a construção de um bloqueio entre o aprendiz e o conhecimento fascinante que as Ciências, de modo geral, podem nos proporcionar. Tomando como exemplo a própria Segunda Lei de Newton (Princípio Fundamental da Dinâmica) temos uma teoria apresentada como um fato científico, mas, na vivência diária, não é facilmente constatada pelo aluno. Desse modo, uma teoria passa a ser estudada partindo de uma afirmativa que será constatada por situações hipotéticas.

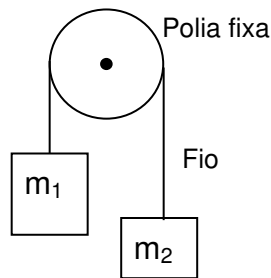
Este trabalho descreve um equipamento de relativa facilidade de construção, dado ao que ele propõe realizar, com o objetivo de se tornar uma ferramenta de suporte para o ensino da Segunda Lei de Newton, o Princípio Fundamental da Dinâmica. Após a descrição dos seus componentes, há sugestões de práticas que podem ser realizadas através dos resultados que o equipamento poderá fornecer. O nível de aprofundamento caberá ao docente definir, usando suas percepções, uma vez que dependerá de vários fatores como o próprio objetivo, nível cognitivo peculiar à turma, tempo disponível e contexto da aplicação (aula prática, disciplina de laboratório ou curso de laboratório). Evidentemente que as técnicas de construção e materiais poderão ser adaptados ao que se tem disponível. A funcionalidade da peça não depende da sua estética. Obviamente, por se tratar de um trabalho feito com maior dedicação de tempo, ele apresenta uma aparência mais elaborada e executada. Entretanto, ele pode ser montado de uma forma mais simplificada preservando o principal: sua funcionalidade. Considerando o movimento como MRUV (Movimento Retilíneo Uniformemente Variado) os resultados obtidos

pela Cinemática podem ser comparados aos resultados obtidos pela Dinâmica. Mas tudo isso se desenvolve considerando o movimento com aceleração constante.

A MÁQUINA DE ATWOOD

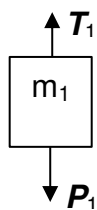
A Máquina de Atwood é um equipamento simples cujo objetivo principal é o estudo do Princípio Fundamental da Dinâmica. Ela consiste em duas massas diferentes ligadas por um fio, de preferência com massa muito pequena, passando por uma polia fixa, de pequena inércia rotacional, que gira livremente em relação ao seu centro. Tais condições simplificam a análise teórica e devem conduzir a resultados satisfatórios. A Figura 01 mostra um esquema simples da máquina.

Figura 01 – Esquema da Máquina de Atwood.



Fonte: O próprio autor.

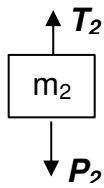
Primeiramente, considera-se $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ a aceleração da gravidade local. Supondo que o corpo 1 acelera para baixo, uma análise dinâmica do sistema, usando a Segunda Lei de Newton, conduz a:



$$F_R = m \cdot a \Rightarrow P_1 - T_1 = m_1 \cdot a; \text{ onde } P_1 = m_1 \cdot g$$

$$m_1 \cdot g - T_1 = m_1 \cdot a \quad (01)$$

Repetindo a análise para o corpo 2, lembrando que a aceleração suposta é para cima, temos:



$$F_R = m \cdot a \Rightarrow T_2 - P_2 = m_2 \cdot a; \text{ onde } P_2 = m_2 \cdot g$$

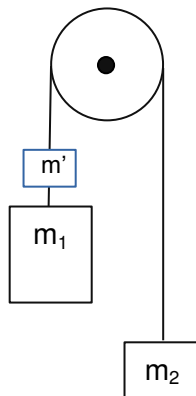
$$T_2 - m_2 \cdot g = m_2 \cdot a \quad (02)$$

Quando combinadas, as equações 01 e 02 resultam em:

$$(m_1 + m_2)a = (m_1 - m_2) \cdot g + T_1 - T_2 \quad (03)$$

O termo $T_1 - T_2$ precisa ser anulado uma vez que T_1 é diferente de T_2 devido ao atrito da polia no seu eixo e o momento de inércia da polia. Nesse caso, basta acrescentar uma massa de compensação, geralmente pequena. Na Figura 02 é possível perceber a presença da massa extra junto à massa m_1 .

Figura 02 – Máquina de Atwood com massa m' de compensação.



Fonte: O próprio autor.

Acrescentando a massa m' ao sistema, a equação 03 ficará da seguinte forma:

$$(m_1 + m_2 + m')a = (m_1 - m_2 + m')g - (T_1 - T_2)$$

Retirando m' do parêntesis do lado direito da equação:

$$(m_1 + m_2 + m')a = (m_1 - m_2)g + m'g - (T_1 - T_2)$$

Fazendo $m'g$ igual ao termo $T_1 - T_2$, eles se anulam.

$$(m_1 + m_2 + m')a = (m_1 - m_2)g + \underbrace{m'g - (T_1 - T_2)}_{\text{Termos que se anulam}}$$

Portanto, a equação a usar será:

$$(m_1 - m_2)g = (m_1 + m' + m_2)a$$

$$a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2 + m')} \cdot g$$

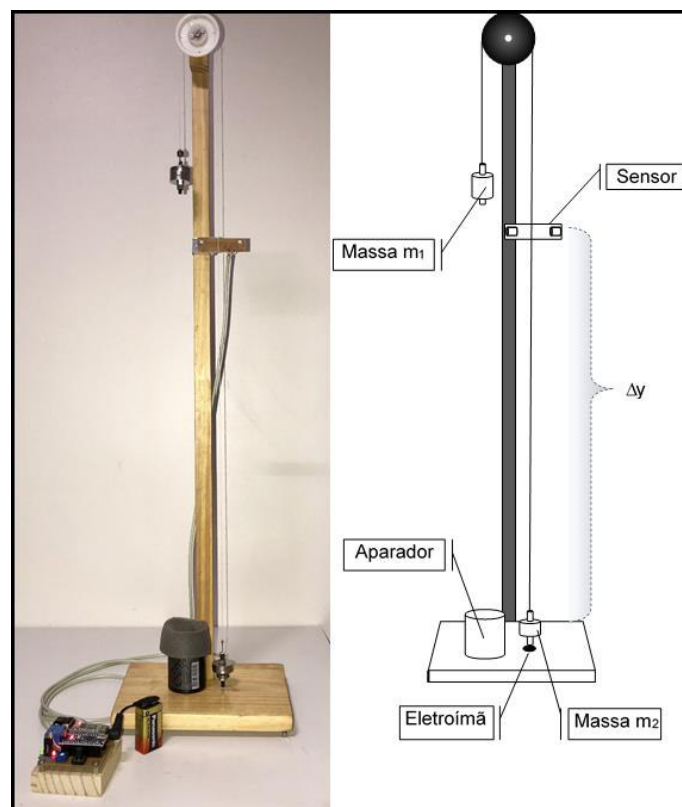
O valor de m' pode ser obtido experimentalmente igualando m_1 à m_2 e iniciando um movimento para baixo, no lado que contém a massa extra, até ocorrer algo próximo a um Movimento Retilíneo Uniforme.

Como a massa total do sistema está sobre o eixo da polia, o peso total do sistema provocará uma normal aplicada na polia pelo seu eixo. Dessa forma, qualquer alteração na massa total implicará alteração no atrito. Por isso, simplifica bastante trabalhar com sistemas de massas totais constantes, evitando ajustes na massa m' .

CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

A partir desse momento será descrita, com alguns detalhes, a construção do equipamento usado para o estudo da Máquina de Atwood. Uma parte dos materiais usados podem ser adaptados de acordo com o que estiver disponível. Algumas peças poderão ser substituídas por outras de dimensões aproximadas. Portanto, o que segue deve ser visto como um parâmetro orientador. A Figura 03 mostra um equipamento já montado e alimentado por uma fonte de tensão. No lado direito há um esquema com suas partes principais sem o circuito.

Figura 03 – Equipamento montado e esquema.



Fonte: O próprio autor.

O circuito está alimentado por uma bateria de 9 V. Um aplicativo disponível para sistemas *Android*, chamado *Bluetooth Terminal HC-05*¹⁶, deve ser instalado no *smartphone*. O emparelhamento entre o *smartphone* e o módulo *bluetooth* ocorre de forma rápida. Estando o *bluetooth* acionado no dispositivo móvel e o módulo ligado, basta iniciar o aplicativo que ocorre o emparelhamento. Além dele, um aplicativo para tratamento de dados e construção de gráficos, como o *Graphical Analysis*, deve ser instalado. Um circuito gerenciado por uma placa *Arduino* controla as ações de acordo com o comando. O comando pode ser dado pressionando um botão instalado na própria placa de circuito ou digitando no terminal do aplicativo o caractere “s”. Pressionando a primeira vez o botão **INICIAR** ou digitando **s** no terminal do aplicativo e enviando via *bluetooth*, o eletroímã é acionado e retorna à tela do aplicativo a mensagem **Ligado**, estando pronto para prender a massa m_2 em sua posição inicial (ver Figura 03). Após prender a massa m_2 ao eletroímã, pressionando o botão **INICIAR**, ou enviando novamente o caractere **s**, o eletroímã será desligado iniciando o movimento e a contagem do tempo. Como a massa m_1 é maior que m_2 , o sistema adquire aceleração de modo que a massa m_2 irá subir enquanto m_1 irá descer. Quando m_2 passar pelo fotossensor, a contagem de tempo para e o *Arduino* irá enviar para a tela do aplicativo o intervalo de tempo desde o início do movimento até o momento de passagem de m_2 pelo sensor. Medindo a distância Δy , conforme a Figura 03, que corresponde ao deslocamento da massa m_2 , e conhecendo o intervalo de tempo, pode-se aplicar a equação da Cinemática para o Movimento Retilíneo Uniformemente Variado que relaciona deslocamento, velocidade inicial (que no caso é nula) e tempo para calcular a aceleração da massa m_2 , que é a própria aceleração do sistema.

Segue uma descrição sobre a montagem desse equipamento:

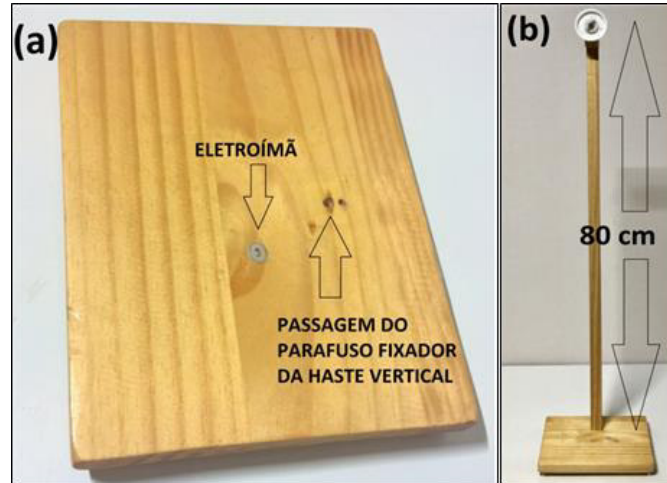
1 – Base, haste e aparador.

Iniciando com a parte estrutural, o equipamento necessita de uma base para sustentar toda estrutura, uma haste para fixação da polia e sensor e um copo aparador para capturar a massa quando a mesma atingir a base.

¹⁶ Disponível para instalação gratuita na loja de aplicativos *Google Play*.

A Figura 04-a mostra uma base de madeira que servirá como plataforma para fixação da haste de sustentação mostrada na Figura 04-b.

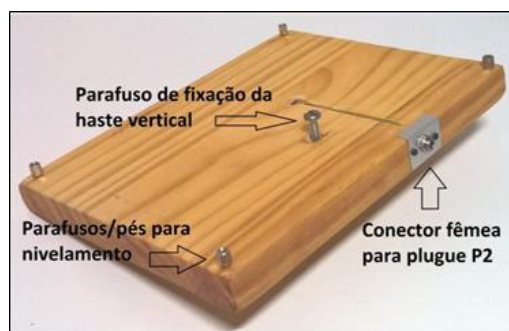
Figura 04 – Base em madeira com eletroímã (a) e conjunto base-haste de sustentação já montado (b).



Fonte: O próprio autor.

Um eletroímã foi introduzido para prender inicialmente o sistema e solta-lo sob o controle do Arduino. Retornando à Figura 03, é possível ver o equipamento ligado e pronto para iniciar o experimento. A massa que está na posição junto à base está presa magneticamente ao eletroímã. Ao receber o comando de início, o Arduino desliga o eletroímã e a massa se desprende, iniciando o movimento. Na parte inferior da base, mostrada na Figura 05, é visível a conexão do eletroímã e o parafuso de fixação da haste. Nos cantos foram inseridos parafusos/pés para nivelamento. As medidas da base são 20 cm x 15 cm. A haste tem 2 cm x 2 cm com 80 cm de altura.

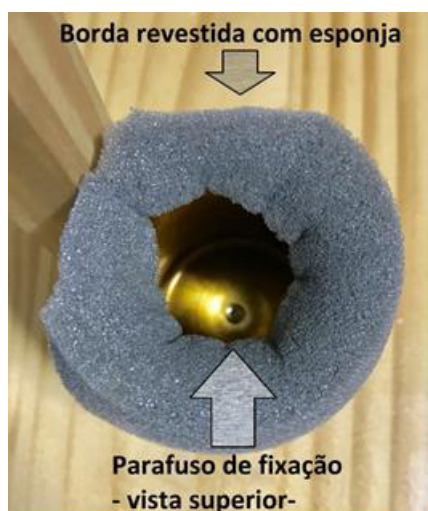
Figura 05 – Vista inferior da base.



Fonte: O próprio autor.

Quando a massa atingir a base é necessário que haja um aparador que possa amortecer o impacto. Esse aparador pode ser construído a partir de uma lata de spray de 125 ml (desodorante) cortada aproximadamente ao meio.

Figura 06 – Vista superior do aparador fixado à base.



Fonte: O próprio autor.

A borda deve ser revestida com esponja para que, ao colidir com o fundo do recipiente, a massa não seja lançada para fora. A esponja na borda evita esse efeito indesejado. Além disso, o fundo do recipiente deve ser forrado com uma camada de esponja em torno de 2,5 cm de espessura. Medir exatamente onde a massa irá atingir e fixar usando um parafuso no seu centro. A Figura 06 apresenta uma visão superior do copo, sem a esponja de amortecimento interno, com o parafuso, ao centro, para fixação.

Se for usar lata de *spray* é importante se certificar que ela esteja despressurizada. Isso pode ser feito acionando sua válvula até que não haja mais saída de gás. Perfurar uma lata, mesmo vazia, pode gerar algum efeito indesejável se ainda houver pressão em seu interior. Outros vasilhames com diâmetro compatível também podem ser usados. Latas de refrigerante, copos de plástico ou qualquer outro recipiente cujas medidas se encaixem no projeto. A Figura 07 mostra o copo aparador, feito com lata de *spray* de desodorante; a borda, feita com esponja de 1 cm de espessura, aproximadamente, colada com adesivo instantâneo e a

esponja amortecedora da base, sem colagem, para permitir acesso ao parafuso de fixação.

Figura 07 - Componentes do aparador: Esponja amortecedora de impacto e tubo de lata de *spray* com a borda revestida com esponja. No centro do tubo o parafuso de fixação.

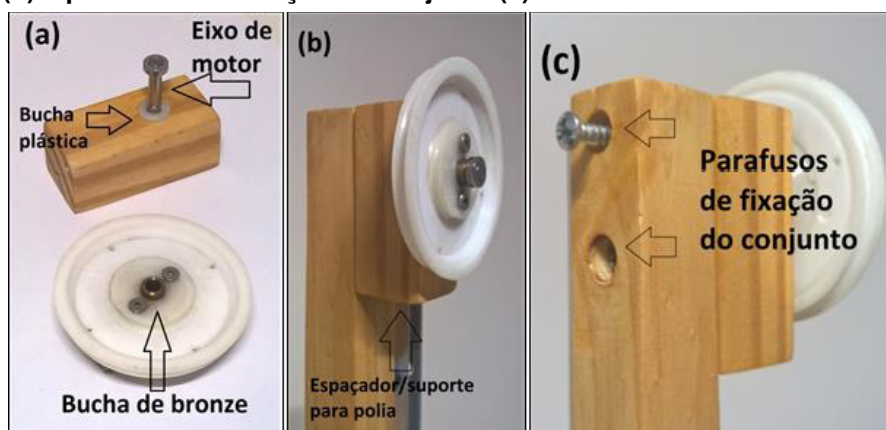


Fonte: O próprio autor.

2 – Polia.

Formada por um disco plástico, leve, com 52,5 mm de diâmetro, e um pino retirado de motor de disco rígido (HD) com bucha de bronze de equipamento eletrônico/mecânico (pode ser usado a estrutura do motor do disco como bucha ou utilizar os rolamentos do braço que faz a leitura do disco). A polia e sua montagem constitui uma das partes mais importantes do equipamento. Ela deve girar livremente, com baixo atrito, e bem centralizada. Para que haja espaço para as massas não tocarem a haste foi colocado mais uma peça de madeira (Figura 08-b) para receber o pino da polia e deixá-la mais distante do suporte. A bucha plástica (Figura 08-a) foi inserida sob pressão na madeira para receber o eixo da polia, também sob pressão.

Figura 08 – Polia e suas partes: Pino e buchas (a); suporte espaçador (b) e parafusos de fixação do conjunto (c).

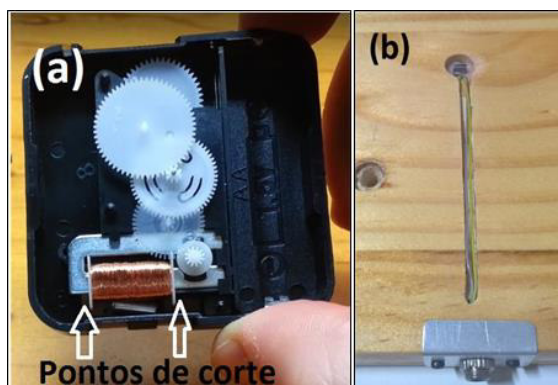


Fonte: O próprio autor.

3 – Eletroímã.

Eletroímã é a bobina junto com a estrutura metálica que compõe o motor do relógio despertador mostrado na Figura 09-a. A estrutura metálica foi cortada para que apenas a parte que passa por dentro da bobina permanecesse. A Figura 09-b mostra a parte inferior da base com os fios saindo da bobina em direção ao conector. A ligação elétrica é simples. Cada terminal da bobina está ligado a um fio e os dois fios ligados diretamente aos terminais do conector. Para minimizar as chances de erro e problemas de contato na ligação é preferível usar conector mono e solda em todos os contatos.

Figura 09 – Relógio contendo eletroímã (a) e sua ligação ao conector (b)

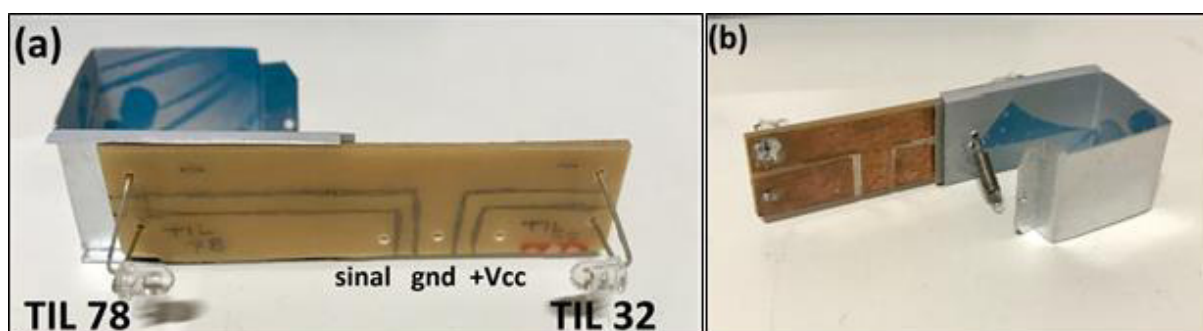


Fonte: O próprio autor.

4 – Sensor óptico

O sensor é formado por um par emissor de IR (TIL 32) e um receptor fototransistor (TIL 78) montados em uma placa de circuito de fenolite, de acordo com o esquema da Figura 10.

Figura 10 – Estrutura do sensor (a) vista de frente e (b) vista por trás.

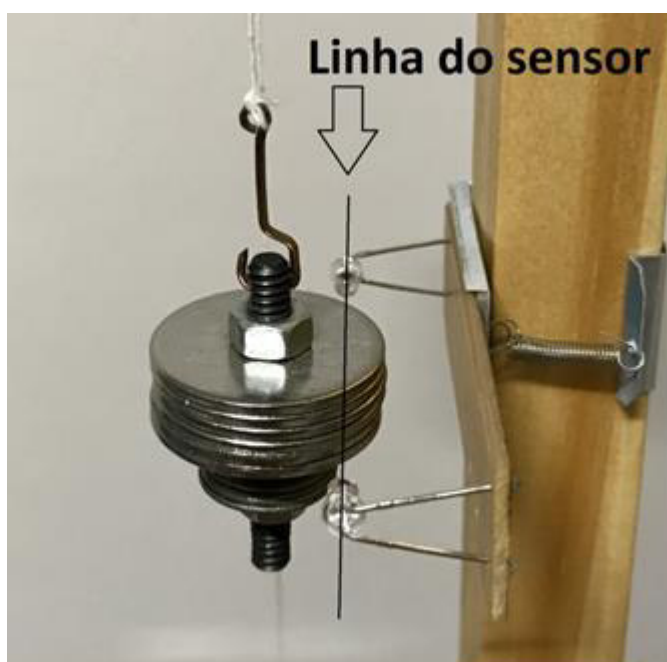


Fonte: O próprio autor.

Os componentes devem ser soldados à placa e ajustados de tal maneira que fiquem direcionados um ao outro. O isolamento elétrico deve ser suficiente para que não haja curto circuito na placa se seus trilhos condutores entrarem em contato com o suporte. Lixar as soldas evitará que pontas dos terminais dos componentes atravessem o isolante e entrem em contato com o suporte metálico.

Antes de definir a distância do sensor à placa é importante verificar onde exatamente passará a massa. Um sensor mal posicionado poderá realizar medidas imprecisas. A Figura 11 mostra o que seria um posicionamento correto da massa em relação à linha de leitura do sensor. Se a linha do sensor estiver mais à esquerda o sensor poderá perceber a passagem de estruturas como o próprio nó da linha, o suporte que sustenta o conjunto, o parafuso e a porca. Como as medidas de distância são feitas com base nas anilhas, qualquer leitura que ocorra antes das anilhas atingirem o nível do sensor geraria uma imprecisão na medição.

Figura 11 – Posição correta dos componentes.

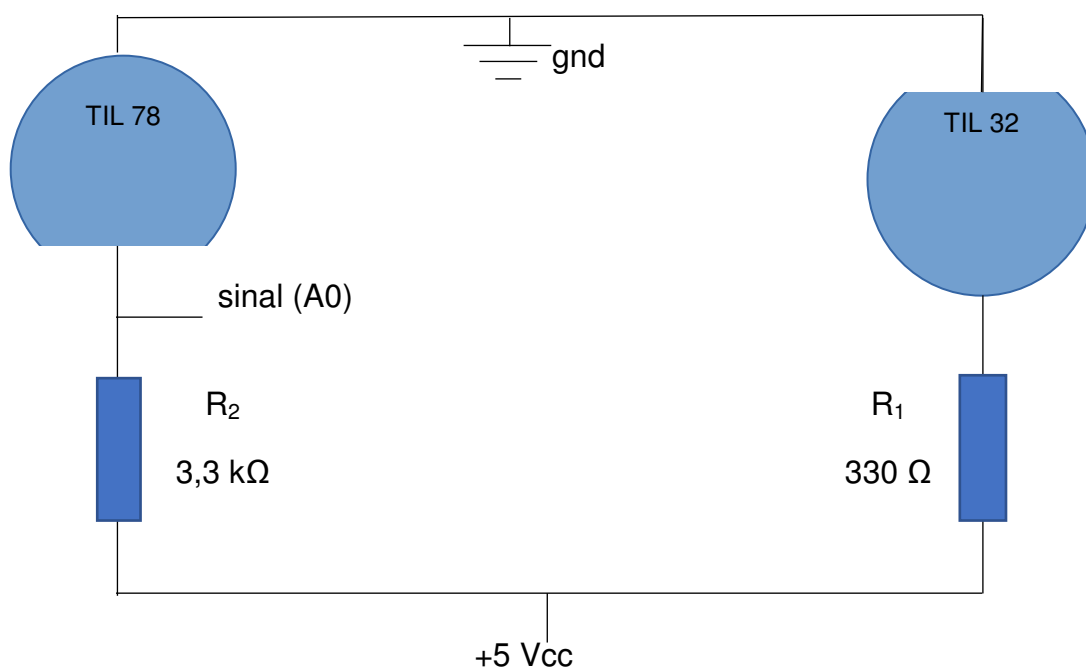


Fonte: O próprio autor.

Nessa mesma figura é possível ver o suporte simples de alumínio que sustenta a estrutura. A placa foi fixada usando fita adesiva dupla face e o suporte enlaça a haste pressionada por uma mola. No entanto, essa estrutura poderá ser parafusada na haste em uma posição fixa pré-definida. Caso não use fita adesiva, ter o cuidado para inserir um isolante elétrico entre a placa e o suporte metálico para evitar curto-circuito. É recomendável que os componentes sejam soldados após esse ajuste de posicionamento. Atenção especial à polaridade dos componentes eletrônicos. As cápsulas dos componentes possuem um dos lados marcados por um corte. Para o TIL 32 (infravermelho), esse lado indica o terminal que deve ser ligado ao gnd (negativo). No TIL 78 (fototransistor) ocorre o inverso. O lado que não possui o corte (terminal mais longo) deve ser ligado ao gnd (negativo). Caso ocorra inversão de qualquer componente não haverá variação significativa na leitura do sensor caso haja obstáculo entre eles. Se isso ocorrer, a polaridade deve ser verificada e o componente retirado e invertido caso seja necessário. Muitas câmeras fotográficas, inclusive de celular, são sensíveis ao IR do TIL 32 fornecendo um teste rápido para o mesmo.

A Figura 12 apresenta o esquema de ligação do emissor (TIL32) e do receptor (TIL78). Como se trata de componentes com terminais polarizados, a cápsula possui um “corte”, perceptível com grande facilidade, para identificação dos polos. No emissor, o terminal junto ao “corte” é o negativo (gnd) enquanto no receptor ocorre o inverso: o lado sem o “corte” é o negativo (gnd).

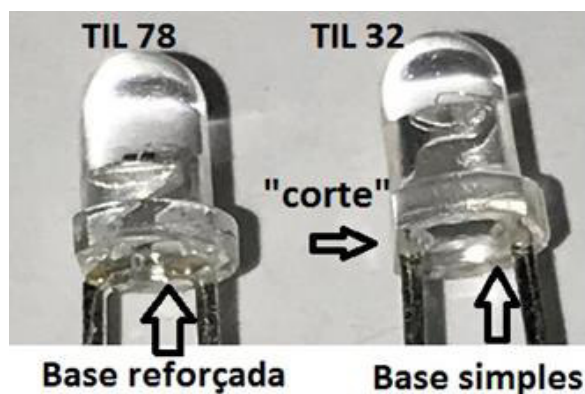
Figura 12 – Visão superior do infravermelho e fototransistor e o esquema de ligação. As cápsulas possuem um dos lados “cortado” para identificar os terminais.



Fonte: O próprio autor.

Embora pareçam iguais em alguns encapsulamentos, o TIL 32 e o TIL 78 apresentam diferenças. A Figura 13 mostra que é possível diferenciar pelas bases dos terminais ou pelas estruturas internas.

Figura 13 – TIL 78 (fototransistor) e TIL 32 (IR).

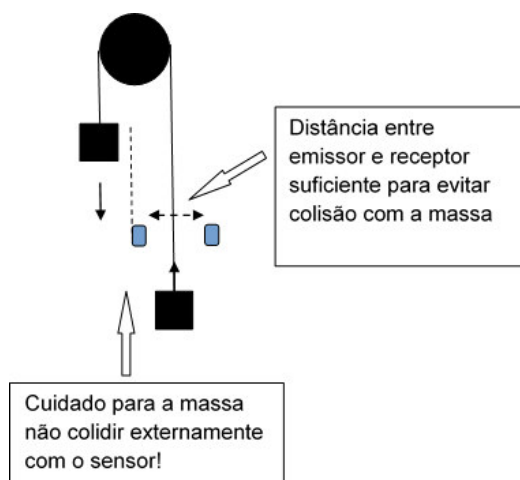


Fonte: O próprio autor.

O TIL 78 tem as bases dos terminais mais reforçadas em relação ao TIL 32. O TIL 32 tem sua estrutura interna mais próxima da parte superior da cápsula enquanto o TIL 78 tem sua estrutura interna mais próxima a sua base. Ainda na Figura 13 é perceptível o “corte” identificador de terminais no lado esquerdo.

Finalizando essa consideração sobre o sensor, a Figura 14 mostra um cuidado extra para que o mesmo não seja tão longo a ponto de colidir com a massa à esquerda (que se desloca para baixo). O diâmetro das massas usadas é de 25 mm sendo que a distância entre emissor e receptor é de 40 mm. Por isso o cuidado para não exagerar na distância entre eles a ponto de a massa que passa por fora bater no sensor.

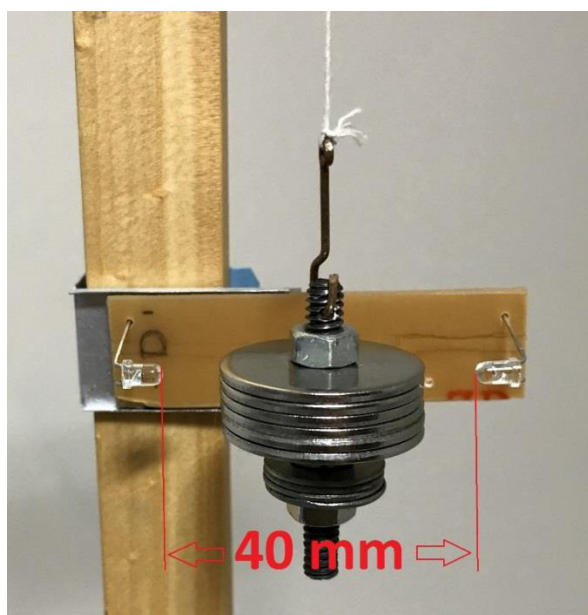
Figura 14 – Espaços para passagem livre das massas.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 15 mostra o espaço entre os componentes do sensor e a massa entre eles. Percebe-se uma folga consideravelmente segura para evitar colisões que produziriam desalinhamento do sensor.

Figura 15 – Vista frontal do sensor com a massa entre os componentes.

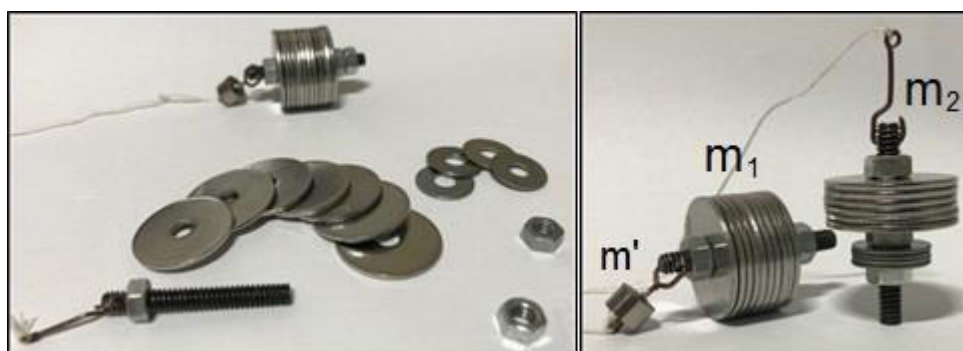


Fonte: O próprio autor.

05 – Massas

Como sugestão podem ser usadas arruelas de aço inox de 25 mm de diâmetro externo com massa de 5 gramas, arruelas menores, com massas de 1 grama, e dois parafusos com porcas para fixação. Os componentes dos conjuntos de massas são mostrados na Figura 16. A vantagem desse sistema é a possibilidade de transferir massa de um lado para outro com certa facilidade.

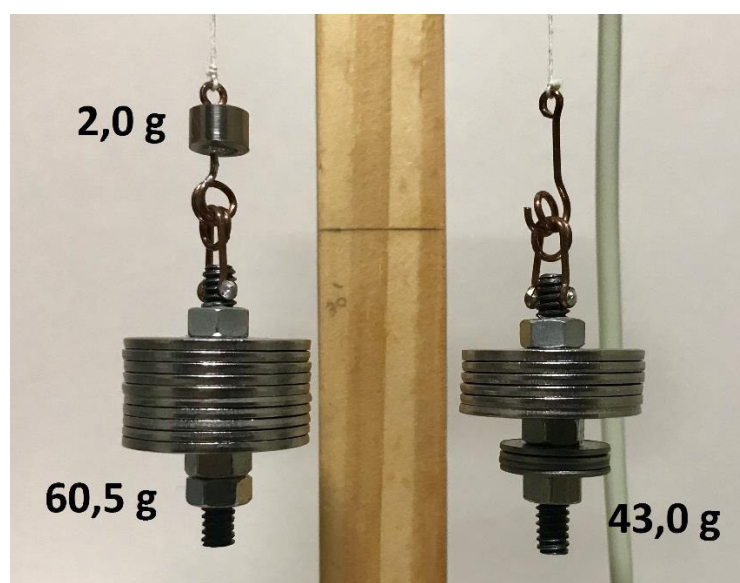
Figura 16 – Massas e suportes.



Fonte: O próprio autor.

Em um dos conjuntos está inserida a massa m' destinada a compensar o atrito e a inércia da polia. Por se tratar de uma massa obtida por experimento, cada conjunto de massas e polia terá sua própria massa m' . Nesse caso, a massa ficou em 2 gramas fixada na parte superior do suporte. O conjunto completo possui 103,7 gramas já incluso a massa m' . Para melhores resultados usar uma diferença de massa próxima a 15 gramas, obtida com m_1 montado com 10 discos e m_2 montado com 6 discos fixos e 4 discos pequenos de 1 grama cada. A Figura 17 mostra os conjuntos de massas montados em sua configuração inicial.

Figura 17 – Massas m' , m_1 e m_2 .



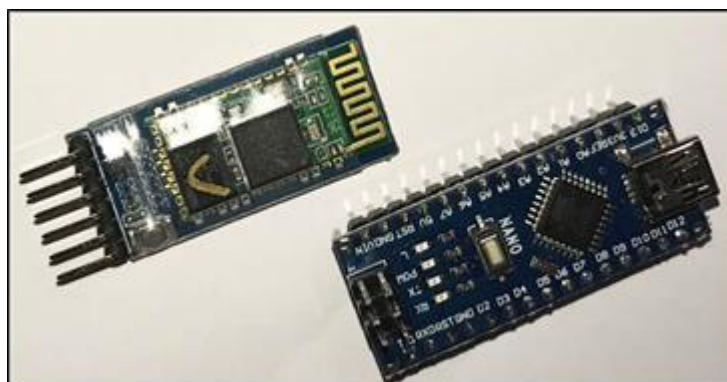
Fonte: O próprio autor.

A massa de compensação foi feita cortando um eixo trilho de impressora. Polido e perfurado com uma broca de 1 mm em uma furadeira de bancada, foi passado o suporte de cobre feito de fio rígido pelo orifício e aplicada solda de estanho. A massa de compensação pode ser feita com anilhas (arruelas), massa plástica epóxi, pedaços de fios e outros materiais. Ela deve ficar bem fixa para não se desprender nos impactos ao final de movimento.

6 – O Arduino, componentes e circuito.

Existem modelos diferentes do Arduino que podem ser usados no projeto. Para montagem em placas de circuito o ideal é usar o modelo Nano (Figura 18).

Figura 18 – Arduino Nano (a direita) comparado ao módulo *bluetooth* (a esquerda).



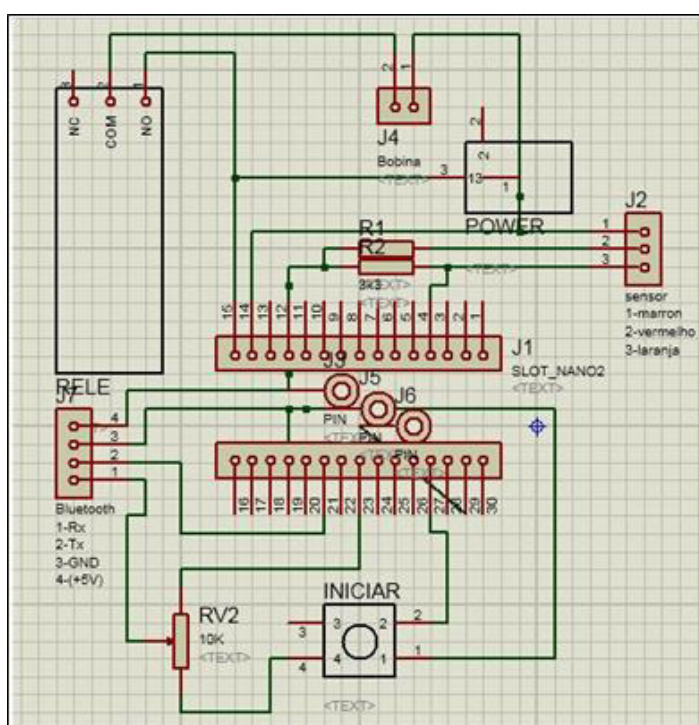
Fonte: O próprio autor.

O Arduino Nano possui dimensões bem reduzidas em relação aos demais (Uno, Leonardo e Duemilanove). Pode ser montado em uma placa de ensaio¹⁷ (para quem não deseja construir placa de circuito impresso) e ocupa pouco espaço. Ele possui 1,8 cm de largura por 4,4 cm de comprimento. Ele vem com pinos soldados à placa (normalmente se adquire com os pinos já fixos à placa) ou pode ser adquirido sem os pinos. Nesse projeto recomenda-se a aquisição da placa com os pinos já

¹⁷ Placa de ensaio, ou *breadboard*, são placas feitas de material plástico, com orifícios, onde são encaixados os componentes e ligados, para teste de funcionamento, sem a necessidade de solda.

fixados. Por essas características ele é ideal para uso em placas de circuito ou placas de ensaio. Caso seja mais conveniente a aquisição de outro modelo do Arduino não há nenhuma objeção ao seu uso. Outros componentes importantes são o módulo relé, para o eletroímã, e o módulo *bluetooth* para conexão. O relé é um acessório importante para se trabalhar com correntes elétricas mais elevadas (acima de 40 mA) uma vez que o Arduino não deve alimentar circuitos que exijam cargas nesse nível. De baixo custo, pode ser facilmente adquirido em lojas virtuais. Por ser um produto já pronto facilita a montagem e ligação no projeto. O módulo *bluetooth* permite estabelecer conexão com dispositivos móveis (*smartphone*, *tablet* e *notebook*) tanto para receber como para enviar comandos ao Arduino. Também disponível em lojas virtuais. Embora o módulo *bluetooth* seja fabricado para uso com Arduino, a tensão de operação nos pinos R_x e T_x são de, no máximo, 3,3 V. Sua alimentação pode ser feita com 5 V fornecida pelo Arduino, mas a transmissão de dados deve ser adequada a tensão do módulo. Existe no mercado um conversor de tensão para ser ligado entre o Arduino e o módulo. Fica como opção a aquisição. No entanto, um divisor de tensão pode resolver a questão. Por isso foi acrescentado um trimpot de 10 kΩ no pino R_x do módulo. A Figura 19 mostra um esquema do circuito.

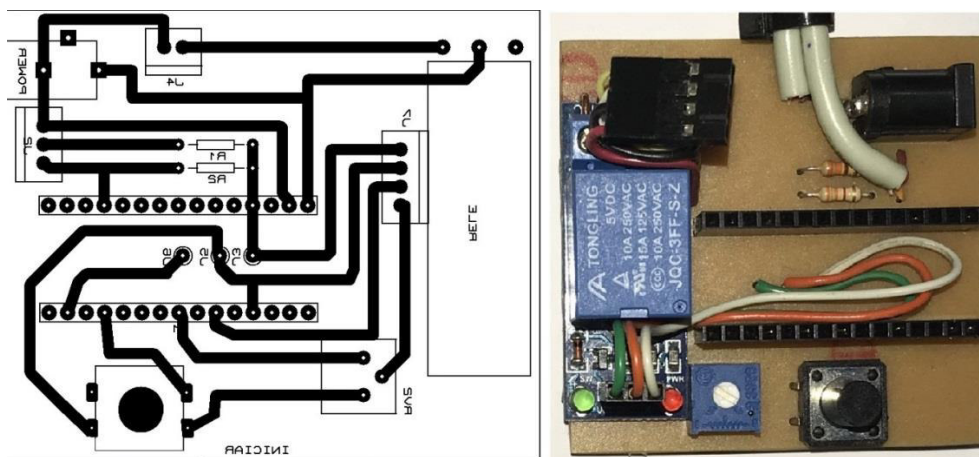
Figura 19 – Esquema do circuito.



Fonte: O próprio autor.

Aqui cabe uma breve explicação do circuito: J1 são duas barras de pinos fêmea de 2,54 mm para encaixe do Arduino. J4 é o ponto de ligação do cabo de duas vias que vai alimentar o eletroímã. Não se trata de conector e sim de dois pontos de solda de fios. Em J2 será ligado o sensor com 1(gnd); 2(+Vcc) e 3(sinal). De J3 (+5 V), J5 (gnd) e J6 (D11 do Arduino) saem a ligação da tomada de alimentação e controle do módulo relé. De J7 sai a tomada do *bluetooth*. “Power” é a entrada de alimentação para plugue P4. “INICIAR” é um botão táctil, cujos pinos 1 e 4 são ligados entre si, e RV2 é um trimpot de 10 K Ω regulado para que o pino do centro forneça 3,3 V em relação ao gnd. R1 é o resistor do infravermelho e tem 330 Ω e R2 está em série com o fototransistor formando um divisor de tensão. Ele tem 3,3 K Ω . A Figura 20 mostra o esquema para placa de circuito e, ao lado, a placa sem o Arduino e o *bluetooth*.

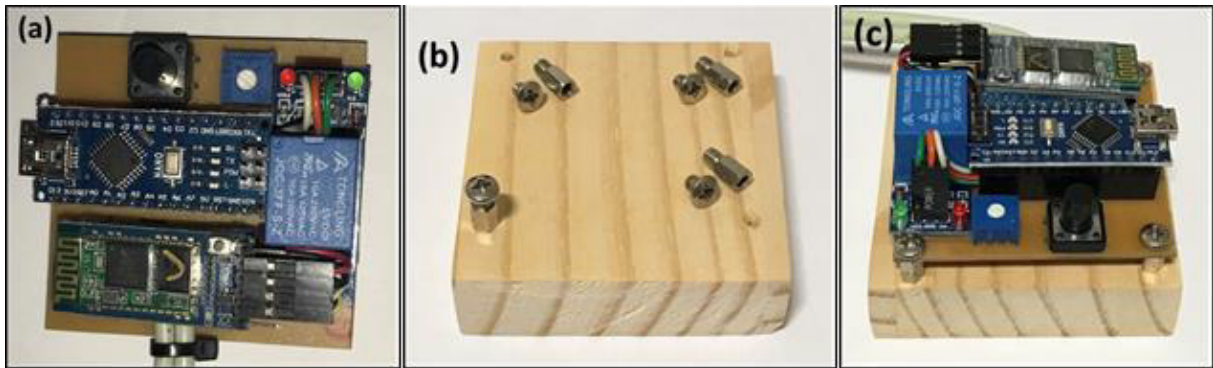
Figura 20 – Esquema de ligação para placa de circuito.



Fonte: O próprio autor.

No APÊNDICE C há esse esquema disponível, em tamanho real, para ser usado como gabarito para as marcações dos furos dos componentes e trilhas de ligações. Ele se apresenta invertido em relação à placa por ser a visão de que observa a placa por baixo. A Figura 21 mostra a placa de circuito completa (a), a base de madeira (b) e o circuito montado (c).

Figura 21 – Circuito completo (a); base madeira (b) e circuito montado (c).



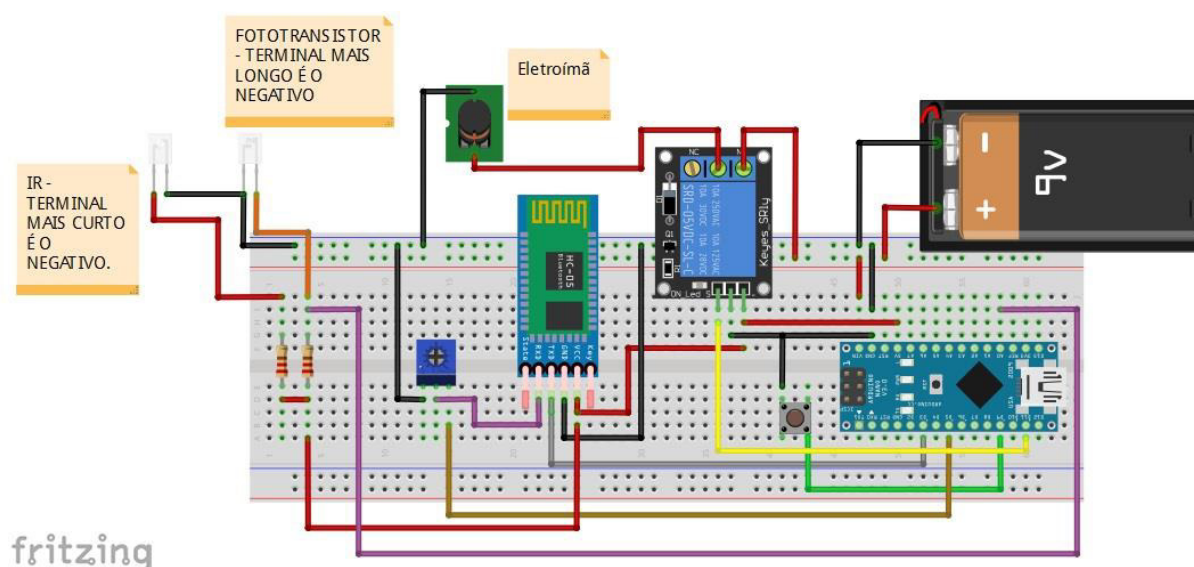
Fonte: O próprio autor.

Os parafusos/porcas que prendem a placa na base foram extraídos de computadores descartados.

Reconhecendo que poucos possuem alguma familiaridade com confecção de placas ou mesmo com técnicas de soldagem de componentes, é recomendável, nesses casos, a montagem do mesmo circuito usando uma placa de ensaio. Uma vantagem da placa de circuito impresso é o menor risco a mau funcionamento por problemas de contato, especialmente por se tratar de equipamento que será manuseado. O que poderia ser uma desvantagem – a fixação de componentes da placa – pode ser contornado com o uso de tomadas e barras de pino fêmea para o Arduino que facilitam, caso haja necessidade, a troca de peças. A Figura 22 mostra todo esquema de ligação para o circuito feito em um *software* chamado *Fritzing*¹⁸. Nele, podemos ilustrar como seria a ligação desse mesmo circuito, agora montado em uma placa de ensaio.

¹⁸ *Software* gratuito que pode ser baixado e instalado no computador.

Figura 22 – Circuito montado em uma *breadboard*.



Fonte: O próprio autor.

Os resistores possuem valores de $330\ \Omega$ e $3,3\ \text{K}\Omega$ sendo que o de menor valor está à esquerda ligado ao infravermelho. O de maior valor está ligado ao fototransistor. O trimpot de $10\ \text{K}\Omega$ atua como divisor de tensão e deve ser regulado de tal modo que no terminal do centro tenhamos $3,3\ \text{V}$ (em relação ao gnd) quando nas extremidades a tensão for de $5,0\ \text{V}$. Para isso basta desconectar o fio do pino D5 e ligar ao pino 5 V do Arduino. Desconectar o fio lilás do Rx do bluetooth e ligar ao voltímetro com a outra ponta de teste do voltímetro ligado ao negativo (gnd). Ligar o Arduino e girar o trimpot até obter algo próximo a $3,3\ \text{V}$. Obtido o valor desejado desligar o Arduino e retomar a ligação de acordo com o esquema. Esse procedimento serve para ajustar o trimpot inclusive antes de fixá-lo à uma placa de circuito.

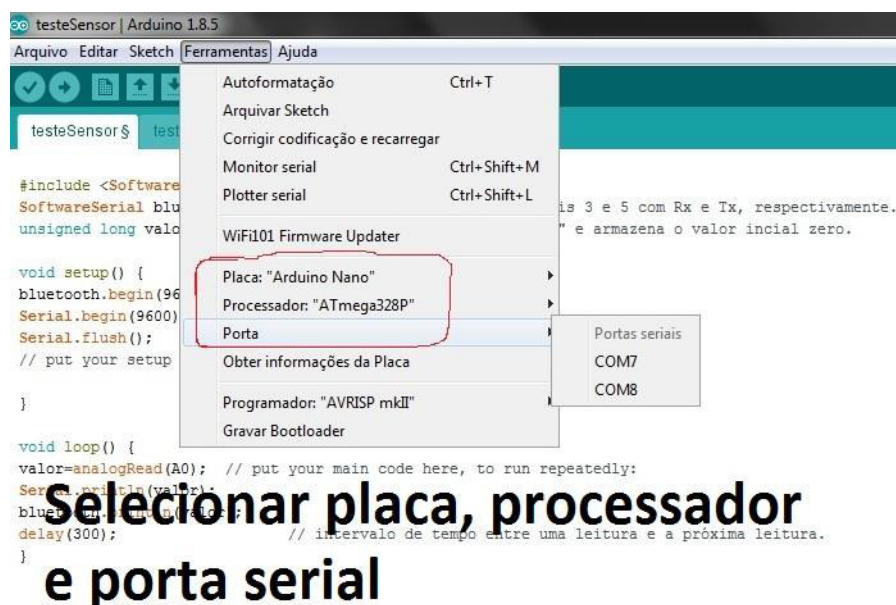
7 – Ajustes no equipamento

Primeiramente carregar o Arduino com o programa “testeSensor”¹⁹ e abrir o monitor serial disponível no próprio *software* de programação do Arduino. Lembrando que, para carregar um programa do Arduino, deve-se ligar o mesmo por

¹⁹ Os dois programas usados nesse trabalho estão disponibilizados em apêndice. Basta copiá-los para o programador do Arduino e transferir via cabo usb.

meio de um cabo usb ao computador que possui instalado o *software* do Arduino²⁰. A Figura 23 mostra a tela do programa e as configurações que devem ser feitas.

Figura 23 – Tela do programa Arduino para escrita, compilação e transferência de programas à placa Arduino.



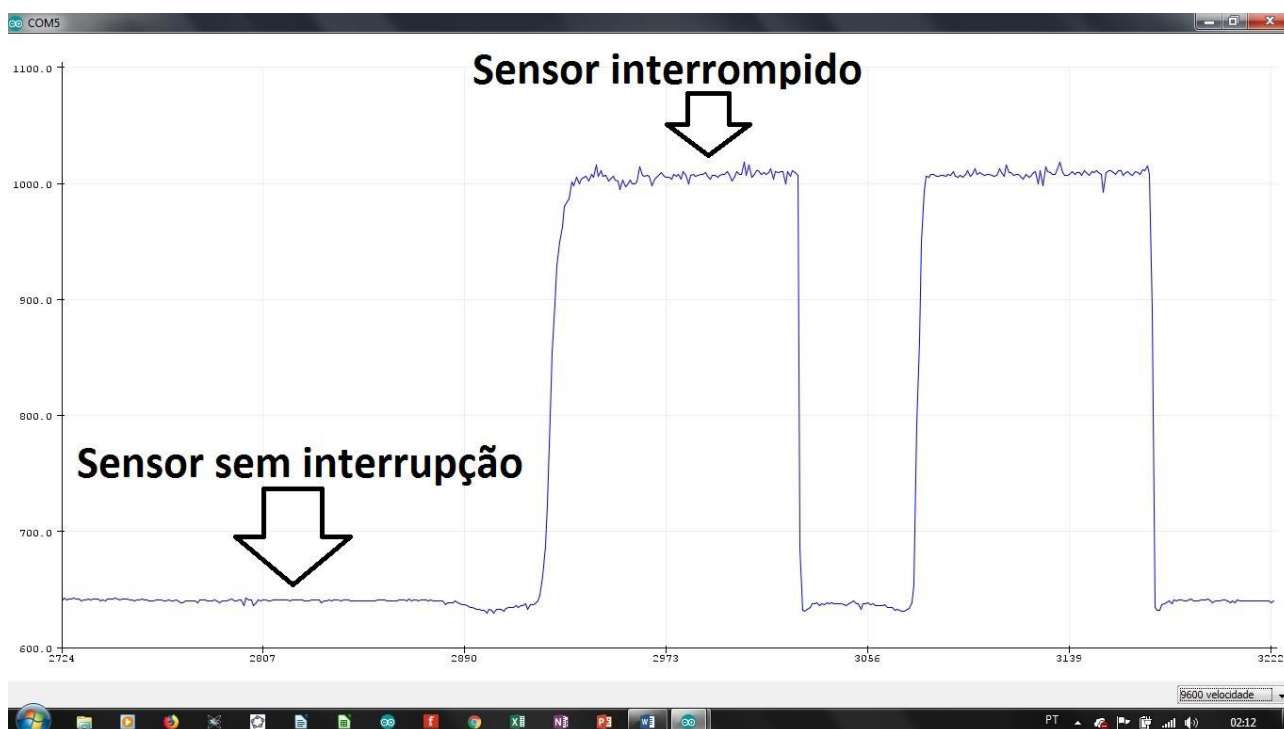
Fonte: O próprio autor.

O *software* é gratuito e pode ser baixado pelo sitio www.arduino.cc. Escolher qual plataforma e iniciar o *download*.

Com o programa já transferido ao Arduino, o monitor serial deverá exibir a leitura do sensor, atualizando a cada 30 ms. A Figura 24 mostra a tela do “*Plotter Serial*” que é um monitor serial gráfico disponível no *software*. Nela está indicado o gráfico com o sensor obstruído e sem a obstrução.

²⁰ O *software* é o Arduino 1.8.5, versão disponível no período de escrita deste trabalho.

Figura 24 – Tela do “Plotter Serial” mostrando o gráfico da leitura do sensor com e sem obstrução.



Fonte: O próprio autor.

O valor medido varia entre 650 e 1000. Escolher um valor intermediário (800, por exemplo) e usar como referência no programa “MaquinaAtwood” inserindo na linha 44, conforme ilustra a Figura 25. O programa usará esse valor para identificar a passagem do objeto naquele ponto e realizar as ações programadas. Valores muito próximos do inferior podem tornar o equipamento muito sensível ao passo que valores muito próximos do superior podem tornar o equipamento mais lento nas respostas. Como o fototransistor capta infravermelho do emissor e do próprio ambiente, em cada local e em diferentes situações é recomendável fazer essa calibração. Em locais muito iluminados, inclusive com incidência de raios solares, o valor inferior chegou a ficar próximo de 200. Por isso o cuidado de sempre, ao preparar o equipamento para uso, verificar se o parâmetro de leitura do sensor e o parâmetro inserido no programa são compatíveis.

Figura 25 – Ajuste no programa “MaquinaAtwood”.

```

delay(20); // atraso na contagem do tempo devido a histerese do eletroimã
tempo=millis(); // função que inicia a contagem de tempo
do{
  sensor=analogRead(A0); // laço executado enquanto o sensor nao detectar a passagem do
  | if(sensor>800){ // armazena a leitura do sensor optico na variavel sensor
    tempo=millis()-tempo; // calcula o intervalo de tempo desde o acionamento da função
    bluetooth.println(); // salta uma linha desde a ultima impressao
    bluetooth.print(tempo/1000); // imprime o valor inteiro do tempo em segundos
    bluetooth.print(","); // imprime uma vírgula separadora entre inteiro e decimal
    bluetooth.print(tempo%1000); // imprime a parte decimal do tempo
    bluetooth.print(" seg"); // imprime "seg" logo apos o valor do tempo
    Serial.println(); // salta uma linha desde a ultima impressao
    Serial.print(tempo/1000); // imprime o valor inteiro do tempo em segundos
  }
}

```

Fonte: O próprio autor.

Por último, ajustar o *delay* (linha 40). Esse ajuste ocorre realizando o experimento e variando o seu valor até que a precisão da medida esteja adequada aos valores esperados (em torno de 5% de erro). O *delay* tem a função de gerar um pequeno atraso entre o desligamento do eletroímã e o início da contagem do tempo. O valor inserido está em milissegundos (milésimos de segundo). Concluído o ajuste o equipamento está pronto para ser usado.

PROPOSTA DE ATIVIDADE

O objetivo do equipamento é, primariamente, comprovar a validade da Segunda Lei de Newton gerando uma formação conceitual alicerçada em fatos experimentais. Para isso, comparamos as medidas realizadas usando a Cinemática com o resultado previsto pela Segunda Lei de Newton e comparamos os resultados. Espera-se não encontrar discrepâncias acima de cinco por cento (5%). Outra proposta é mostrar a linearidade da relação entre a força resultante em um sistema de massa constante e sua aceleração. O roteiro do procedimento trabalha em duas etapas: (1) Consideração da Segunda Lei de Newton e sua aplicação na Máquina de Atwood e (2) a realização do procedimento experimental e comparação com as previsões teóricas.

Primeira etapa: Considerações sobre a Segunda Lei de Newton e aplicação a Máquina de Atwood.

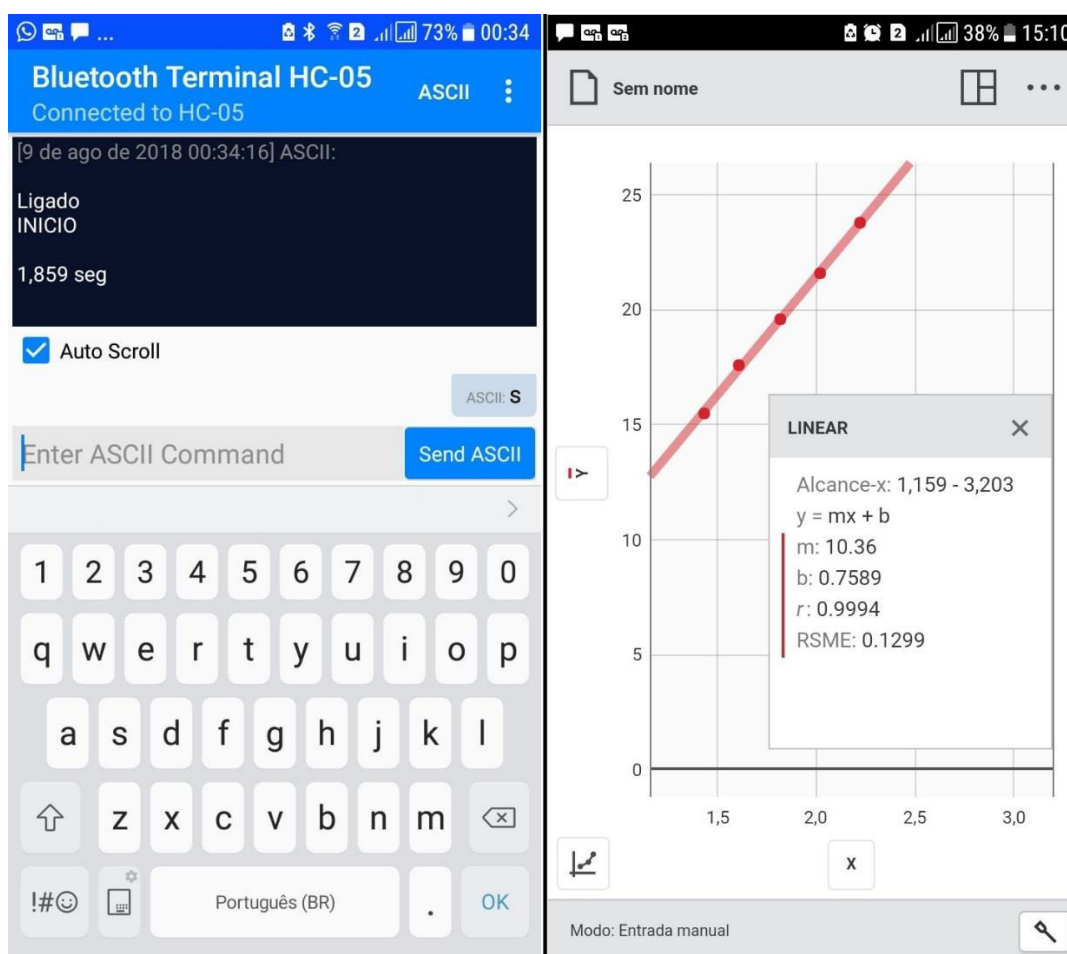
Nesse momento é importante o docente fazer uma análise da equação $F_R = ma$ comparando-a com a equação de uma reta que passa pela origem do sistema: $Y = ax$. O foco é mostrar que a relação entre a força resultante e a aceleração do sistema é proporcional e linear. Em seguida, mostrar que a aceleração pode ser obtida tanto pela Cinemática quanto pela Segunda Lei de Newton se forem conhecidos o tempo, o deslocamento, a aceleração da gravidade local e as massas.

Segunda etapa: Sugestão de roteiro para a parte prática

O roteiro a seguir é uma sugestão de como usar o equipamento em uma abordagem de Dinâmica de uma forma simplificada. O foco consiste em dois aspectos: (1) mostrar que a aceleração obtida pela Segunda Lei de Newton e pela equação da Cinemática pode ser considerada igual dentro de uma margem de

diferença pequena e, (2) a relação entre a força resultante em um sistema de massa constante e sua aceleração é linear. Novamente fica a critério do aplicador do procedimento determinar se a análise de dados será feita por meio de *software* ou manualmente. O uso de *software*, principalmente de aplicativos para *smartphones* possuem grandes vantagens, por isso são fortemente recomendados. Antes da atividade, os alunos poderão instalar os aplicativos denominados “*Bluetooth Terminal HC-05*” e “*Graphical Analysis*”, que podem ser adquiridos gratuitamente na loja de aplicativos da *Google* para *Android*. Por meio desses aplicativos o celular, conectado ao equipamento via *bluetooth*, será capaz de receber dados das medidas realizadas na própria tela e enviar comando para execução da medição. O aplicativo para análise de gráficos, cuja tela é mostrada na Figura 26, permite inserir pares de pontos, traçar gráfico e ajustar curva.

Figura 26 – Tela dos aplicativos *Bluetooth Terminal HC-05* e *Graphical Analysis*.



Fonte: O próprio autor.

Se o equipamento for controlado pelo botão INICIAR será possível visualizar na tela do aplicativo os valores das medidas de tempo. Ainda pelo aplicativo é possível controlar o experimento por ligar o eletroímã e iniciar o movimento até que o sensor capte a passagem da massa, gerando um valor de tempo exibido em sua tela.

ROTEIRO

MÁQUINA DE ATWOOD

INTRODUÇÃO:

A Máquina de Atwood é um sistema simples formado por uma polia de massa muito pequena e com baixo atrito no seu eixo de rotação e duas massas diferentes, presas por um fio de massa muito pequena e inextensível, que acelera quando há diferença de massas. Esse mecanismo tem como objetivo comprovar a validade da Segunda Lei de Newton – O Princípio Fundamental da Dinâmica.

Analisando esse sistema, usando a Cinemática e a Dinâmica, obtêm-se os seguintes resultados:

De acordo com a Cinemática:

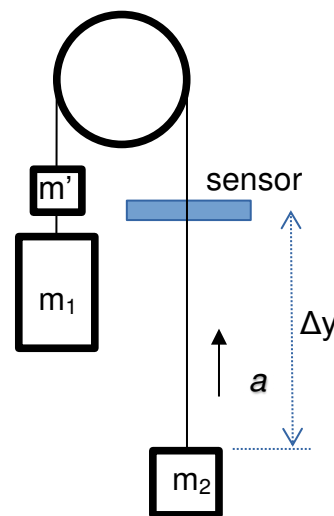
$$\Delta y = v_0 t + \frac{a}{2} t^2$$

Como o sistema parte do repouso temos que $V_0 = 0$:

$$\Delta y = \frac{at^2}{2}$$

Finalmente, a aceleração será:

$$a = \frac{2\Delta y}{t^2} \quad (01)$$



De acordo com a Dinâmica:

$$F_R = m \cdot a$$

Para esse sistema a força resultante é a diferença dos pesos:

$$P_1 - P_2 = m \cdot a$$

Usando a aceleração da gravidade (g) para calcular os pesos:

$$m_1 g - m_2 g = (m_1 + m_2 + m') \cdot a$$

$$a = \frac{g \cdot (m_1 - m_2)}{m_{TOTAL}} \quad (02)$$

Procedimento 01 – Mostrar a relação entre força resultante e aceleração.

01 – Ligar o equipamento e conectar via *bluetooth* ao *smartphone*. Acionar o botão “INICIAR” ou digitar “s” no terminal de comandos do aplicativo. Deve ser ouvido um

“estalo” do acionamento do relé do eletroímã. A mensagem “Ligado” aparece no monitor. O eletroímã está pronto para prender a massa m_2 .

Com os dados a seguir, preencher a tabela 01.

02 – Medir a massa (em gramas) total do conjunto e as massas m_1 e m_2 . Preencher a primeira linha da Tabela 01. Os quatro discos menores (1 grama) devem estar na massa m_2 para iniciar o procedimento.

Obs: valor de m_1 não deve incluir a massa m' .

03 – Realizar cinco medições de tempo e fazer a média aritmética. Calcular a aceleração usando a equação (01) prevista pela Cinemática e inserir na Tabela 01. Preencher a força resultante em Newton. Repetir o procedimento para as cinco diferentes massas obtidas transferindo os discos pequenos de um lado a outro. Completar a Tabela 01.

Tabela 01 – Medidas

	m_1 (g)	m_2 (g)	$m_1 - m_2$ (g)	Massa total ($m_1 + m_2 + m'$)	Aceleração m/s^2	Força Resultante (N)*
Medida 1						
Medida 2						
Medida 3						
Medida 4						
Medida 5						

*obs: Para calcular a força resultante em Newton basta multiplicar a diferença de massa, em gramas, por 9,8 e dividir o resultado por 1000.

04 – Construa um gráfico com os dados **Aceleração x Força Resultante**. Poderá usar uma planilha ou qualquer outro *software* ou app de construção de gráficos.

05 – Comparar o gráfico obtido com os gráficos nos livros de funções polinomiais de grau zero, um, dois e três respondendo ao questionário:

1. Qual dos gráficos mais se assemelha ao obtido no experimento?

2. Explique como o resultado desse experimento mostra que a Segunda Lei de Newton foi comprovada.

Procedimento 02 – Comparar os valores de aceleração obtidos pela Cinemática e pela Dinâmica.

06 – Com a balança digital com precisão de 0.1 grama medir a massa total do sistema e depois medir m_1 e m_2 .

07 – Ligar o experimento acionando o botão “INICIAR” ou digitando “s” no terminal. Após ouvir o “click” do relé, prender a massa m_2 ao eletroímã e posicionar o sensor a 0,5 m de altura da massa. Repetir o experimento cinco vezes e calcular a média aritmética dos tempos medidos.

08 – Preencher a tabela 02.

Tabela 02 – Medições.

	Δy (m)	$t_{\text{médio}}$ (s)	a_{Cin} (m/s^2)	$m_1 - m_2$	Massa total ($m_1 + m_2 + m'$)	a_{Din} (m/s^2)
Medidas	0,5					

09 – Calcular a_{Cin} (aceleração pela Cinemática), usando a equação 01, e calcular a_{Din} (aceleração pela Dinâmica) usando a equação 02.

10 – Preencher a Tabela 03.

Tabela 03 – Comparação de resultados.

a_{Cin}	a_{Din}	$ a_{\text{Cin}} - a_{\text{Din}} $	$e = \frac{(a_{\text{cin}} - a_{\text{din}}) \times 100}{a_{\text{cin}}} (\%)$

11 – Analisando os resultados:

- 1. Por que há diferença, se houver, entre as acelerações obtidas pelos dois métodos?**
- 2. Podemos usar o método da Dinâmica (Lei de Newton) para calcular corretamente a aceleração de um sistema? Justifique a sua resposta.**

CONSIDERAÇÕES

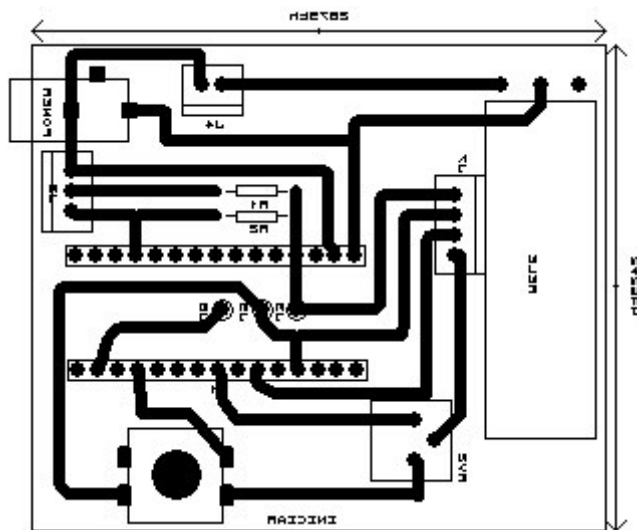
A proposta de prática experimental deve sempre ser ajustada às necessidades particulares de cada caso. Os dois procedimentos descritos são relativamente longos, o que torna praticamente inviável serem aplicados no mesmo dia. Não apenas fatores como o tempo para realização da prática, mas, também, o próprio “tempo do aluno”, ou seja, o tempo que o aluno consegue produzir, limitam a aplicação total. Assim, sugere-se que o procedimento prático seja dividido em dois ou mais momentos.

Outro aspecto a ser visto é o uso do celular para obtenção dos dados e controle do equipamento. Apenas a pessoa que irá controlar o equipamento estará conectada via *bluetooth* com o Arduino. Uma vez conectado outro não poderá conectar. Portanto, ao terminar o experimento, o usuário deve desligar o *bluetooth* de seu *smartphone* para permitir que outro colega possa estabelecer a conexão. O experimento pode ser conduzido pelo terminal do próprio compilador do Arduino via cabo *usb*. Vale lembrar que o módulo *bluetooth* usado não é compatível com *Iphone* e *Ipad* por usarem protocolos diferentes. Existem módulos disponíveis no mercado que suportam conexão com os aparelhos citados. Como exemplo temos o módulo HC-08. Como a grande maioria tem acesso ao sistema *Android* provavelmente essa limitação do HC-05 não será um problema.

O sucesso de um experimento deve-se muito ao tempo dedicado ao ajuste do equipamento. Portanto, sempre fazer testes antes de aplicar a aula prática! Cabe ao professor, com sua experiência no manuseio, ajustar o nivelamento, verificar se as massas se deslocam livres de colisão, se o eixo da polia está livre, se a massa de compensação do atrito precisa ser ajustada, se o *delay* entre o desligamento do eletroímã e a contagem do tempo precisa de ajuste... tudo para evitar que as medidas sejam extremamente inexatas.

APÊNDICE C – PLACA DE CIRCUITO

Gabarito para construção da placa de circuito. A imagem serve para marcar na placa os pontos onde serão feitas as perfurações para fixação dos componentes. A imagem está invertida em relação ao esquema do circuito por se tratar de um gabarito que deve ser usado sobre a parte do cobre da placa de fenolite. As linhas escuras intensas são as ligações entre os pontos que devem ser feitas com caneta marcadora para placas. Após a corrosão do cobre, as partes pintadas permanecerão intactas formando as ligações do circuito. Uma limpeza com esponja de aço ou lixa muito fina prepara a superfície para receber as soldas.



APÊNDICE D – PROGRAMAS

1. Programa para teste do sensor

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial bluetooth(3, 5); //configura as portas digitais 3 e 5 com Rx e Tx, respectivamente.
unsigned long valor=0; // declara a variável "valor" e armazena o valor inicial zero.

void setup() {
  bluetooth.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  Serial.flush();
}
void loop() {
  valor=analogRead(A0);
  Serial.println(valor);
  bluetooth.println(valor);
  delay(30); // intervalo de tempo entre uma leitura e a próxima leitura.
}
```

2. Programa “MaquinaAtwood” para execução do experimento.

```

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial bluetooth(3, 5); // portas digitais 3 e 5 serão Rx e Tx para conexão serial bluetooth
int s; // armazena leitura recebida pela serial
int x; // informa fase do programa
int y; // informa se o sensor optico foi acionado pelo objeto ou não
int i; // informa ordem de pressionamento do botão
int botao; // armazena estado do botão
int sensor; // declara variável sensor para armazenar leitura do fotodiodo
unsigned long tempo; // declara variável tempo para altos valores

void setup() { // configurações
  pinMode(8, INPUT_PULLUP); // porta do botão
  pinMode(11, OUTPUT); // porta de controle do módulo relé
  digitalWrite(11, HIGH); // estado alto = relé desligado
  bluetooth.begin(9600); // inicia comunicação serial bluetooth pelas portas 2 e 3.
  Serial.begin(9600);
  i=0; // valor inicial
  x=0; // fase inicial
}

void loop() { // é executado em ciclos enquanto não reinicializar o Arduino
  botao=digitalRead(8); // armazena na variável botão o estado da porta.
  s=bluetooth.read();
  if(botao==0 && i==0 || s == 's' && i==0){ // se o botão for pressionado pela primeira vez ou
  o caractere "s" for enviado pela serial
    i=1; // atribuir valor 1 a variável i
    if(x==0){ // executa se o LED estiver desligado (x=0)
      x=1; // atribui valor 1 à variável mudando para segunda fase.
      digitalWrite(11, LOW); // porta em LOW aciona o relé
      bluetooth.println(); // salta uma linha de impressão
      bluetooth.println("Ligado"); // imprime "Ligado" no monitor
      Serial.println(); // salta uma linha de impressão
      Serial.println("Ligado"); // imprime "Ligado" no monitor
    }
    else { // executa se o if não for verdadeiro
      if(x==1){ // executa se o LED estiver ligado
        x=0; // atribui valor 0 a variável x retornando a fase inicial
        digitalWrite(11, HIGH); // sinal HIGH no IN do relé desliga o contato
        bluetooth.println("INICIO"); // imprime no monitor a palavra INICIO
        Serial.println("INICIO"); // imprime no monitor a palavra INICIO
        delay(20); // atraso na contagem do tempo devido a histerese do eletroímã
        tempo=millis(); // função que inicia a contagem de tempo
        do{ // laço executado enquanto o sensor não detectar a passagem do objeto
          sensor=analogRead(A0); // armazena a leitura do sensor optico na variável sensor
          if(sensor>800){ // condição quando o sensor optico detecta a passagem do objeto
            tempo=millis()-tempo; // calcula o intervalo entre o acionamento da função e a passagem do objeto
            pelo sensor optico.
            bluetooth.println(); // salta uma linha desde a última impressão
            bluetooth.print(tempo/1000); // imprime o valor inteiro do tempo em segundos
            bluetooth.print(","); // imprime uma vírgula separadora entre inteiro e decimal
            bluetooth.print(tempo%1000); // imprime a parte decimal do tempo
            bluetooth.print(" seg"); // imprime "seg" logo após o valor do tempo
            Serial.println(); // salta uma linha desde a última impressão
            Serial.print(tempo/1000); // imprime o valor inteiro do tempo em segundos
            Serial.print(","); // imprime uma vírgula separadora entre inteiro e decimal
            Serial.print(tempo%1000); // imprime a parte decimal do tempo
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

```
Serial.print(" seg");           // imprime "seg" logo após o valor do tempo

y=1;
}
else{
y=0;           // mantem a execução do laço enquanto a condição if não for satisfeita
}
}while(y==0); // condição que mantem no laço enquanto não houver obstrução do
sensor alterando o valor de y
}
}
}
if(botao==1){ // executa se o botão não for pressionado a primeira vez
i=0;         // atribui valor a variável i
delay(50);   // pausa para releitura da porta digital 6 (botão)
}
}
```

OBS: O código do programa a ser copiado se encerra no último colchete. Todas as explicações precedidas por // são comentários explicativos e não são lidos pelo compilador ao transferir para o Arduino. Portanto, é desnecessária a cópia desses comentários para o programa.

APÊNDICE E – TABELAS COM RESULTADOS DE TESTES

Testes realizados com *delay* de 20 ms

t (s)	t _{MÉDIA} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m _{Total} (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,811										
0,816										
0,819										
0,809	0,813	0,661	0,5	1,513	68,8	49,7	9,55	2,52	120,5	19,1
0,815										
0,808										

t (s)	t _{MÉDIA} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m _{Total} (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,769										
0,769										
0,766										
0,77	0,768	0,590	0,5	1,694	69,8	48,5	9,58	2,29	120,3	21,3
0,771										
0,765										

t (s)	t _{MÉDIA} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m _{Total} (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,73										
0,733										
0,726										
0,722	0,729	0,531	0,5	1,883	70,7	47,5	9,77	0,35	120,2	23,2
0,726										
0,735										

t (s)	t _{MÉDIA} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m _{Total} (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,671										
0,671										
0,674										
0,67	0,671	0,450	0,5	2,220	72,8	45,5	9,79	0,10	120,3	27,3
0,669										
0,672										

t (s)	t _{MÉDIA} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m _{Total} (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,647										
0,647										
0,644										
0,648	0,648	0,419	0,5	2,385	73,82	44,5	9,80	0,04	120,32	29,32
0,648										
0,651										

Fonte: O próprio autor

Esses testes apontam a diferença entre as massas m_1 e m_2 como um fator de erro que deve ser levado em conta na construção do experimento e da prática de

laboratório. Pequenas diferenças de massas tendem a elevar o erro relativo, como já havia sido previsto na equação 20.

Medições realizadas para os mesmos conjuntos de massas e mesmo deslocamento.

Erros nas medidas das massas e intervalo de tempo										
t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,756										
0,754										
0,749	0,752	0,565	0,5	1,770	68,8	47,1	9,62	1,88	117,9	21,7
0,752										
0,746										
0,753										

t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,74										
0,759										
0,754	0,753	0,568	0,5	1,762	68,7	47,2	9,67	1,40	117,9	21,5
0,755										
0,758										
0,754										

Fonte: O próprio autor.

Obs:

1 – Variação de 1 ms na média do tempo.

2 – Variação de 0.1 g na medida de cada conjunto de massa levando a uma variação na diferença de massa de 0,2 g.

Diferença no erro devido à diferença na média do tempo.

Erro na medida do intervalo de tempo para a mesma medida da massa										
t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,756										
0,754										
0,749	0,752	0,565	0,5	1,770	68,8	47,1	9,62	1,88	117,9	21,7
0,752										
0,746										
0,753										

t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,74										
0,759										
0,754	0,753	0,568	0,5	1,762	68,8	47,1	9,57	2,31	117,9	21,7
0,755										
0,758										
0,754										

Fonte: O próprio autor.

Obs: Para o mesmo experimento anterior, supondo mesma diferença de massa e mantendo a diferença de 1 ms na média dos tempos a diferença de erro na medida é de **0,43%** (2,31% - 1,88%).

Diferença no erro devido à diferença na medida das massas.

Erro na medida das massas para o mesmo intervalo de tempo										
t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,756										
0,754										
0,749	0,753	0,568	0,5	1,762	68,8	47,1	9,57	2,31	117,9	21,7
0,752										
0,746										
0,753										

t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,74										
0,759										
0,754	0,753	0,568	0,5	1,762	68,7	47,2	9,66	1,40	117,9	21,5
0,755										
0,758										
0,754										

Fonte: O próprio autor.

Obs: Para a mesma média de tempo, a diferença de 0,1 g em cada conjunto de massas gera uma diferença no erro percentual de **0,91%** (2,31% - 1,40%).

Diferença no erro devido à diferença na medida das massas.

Erro na medida da massa para o mesmo intervalo de tempo										
t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,756										
0,754										
0,749	0,752	0,565	0,5	1,770	68,8	47,1	9,62	1,88	117,9	21,7
0,752										
0,746										
0,753										

t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,74										
0,759										
0,754	0,752	0,565	0,5	1,770	68,7	47,2	9,71	0,96	117,9	21,5
0,755										
0,758										
0,754										

Fonte: O próprio autor.

Obs: Caso a média de tempo usada seja 0,752 s, a diferença entre os erros será de **0,92%** (1,88% - 0,96%).

Diferença no erro devido à uma diferença de 2 mm na medida de y.

Variação de 2 mm na medida y										
t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,756										
0,754										
0,749	0,752	0,565	0,5	1,770	68,7	47,2	9,71	0,96	117,9	21,5
0,752										
0,746										
0,753										

t (s)	t _{média} (s)	t ²	y (m)	a (m/s ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	g (m/s ²)	Erro %	m ₁ +m ₂ (g)	m ₁ -m ₂ (g)
0,74										
0,759										
0,754	0,752	0,565	0,502	1,777	68,7	47,2	9,74	0,57	117,9	21,5
0,755										
0,758										
0,754										

Fonte: O próprio autor.

Obs: Se a medida do deslocamento y da massa m₁ apresentar variação de 2 mm o erro percentual varia em 0,39%.

O valor da diferença usada no teste é, aproximadamente, a folga do sensor na haste que faz ele se deslocar verticalmente em uma amplitude de 2 mm.