

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

THEO FERNANDO CARPES DE SOUZA

**INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO BASEADO NA
POSE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO**

Porto Alegre

2019

THEO FERNANDO CARPES DE SOUZA

**INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO BASEADO NA
POSE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO**

**Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica na Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.**

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre

2019

THEO FERNANDO CARPES DE SOUZA

**INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO BASEADO NA
POSE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO**

Este trabalho de conclusão de curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo André Perondi – UFRGS _____

Prof. Dr. Ivan Müller – UFRGS _____

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores – UFRGS _____

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo instrumentar um protótipo de veículo elétrico desenvolvido para competições universitárias de eficiência energética e testar o impacto de diferentes estratégias de pilotagem sobre o consumo de energia do mesmo. As estratégias adotadas para a análise e comparação de resultados se referem ao controle da velocidade de condução e a execução de dois traçados diferentes: minimizando a distância percorrida no circuito e outro suavizando a execução das curvas. O algoritmo que gera o traçado da rota de suavização de curvas foi desenvolvido neste trabalho, tendo como base a aplicação de conceitos de geometria analítica sobre as dimensões da pista e do protótipo. A instrumentação desenvolvida visou mensurar e coletar dados a respeito da posição e orientação do veículo, bem como as grandezas elétricas de tensão e corrente pertinentes a suas medidas de consumo. Os dados coletados a respeito da pose do veículo, inclinação lateral, inclinação frontal e orientação em relação ao norte geográfico da terra, tiveram por objetivo identificar comportamentos do piloto e características de relevo da pista que pudessem estar relacionados a características do consumo do veículo. Registros em vídeo dos ensaios por meio de uma câmera embarcada também complementaram a análise por meio da identificação de padrões de condução e adversidades nos percursos. O algoritmo de traçado de pista que visa suavizar as curvas foi ensaiado em circuitos similares aos circuitos de prova do protótipo, e a influência deste traçado sobre a eficiência energética do veículo foi relacionada com o traçado de menor distância usualmente executado durante as competições de eficiência.

Palavras-chave: Consumo, Instrumentação, Inclinação, Orientação.

ABSTRACT

The objective of this work is to instrument an electric vehicle prototype developed for energy efficiency competitions, it also aims to test the impact of different driving strategies on energy consumption. The strategies adopted for the analysis and comparison of results will explore different vehicle speeds and the execution of two different traces: minimizing the traveled distance in the circuit and smoothing the execution of the curves. The algorithm that generates the smoothed curves route was developed in this work based on the application of analytic geometry concepts on the track and prototype dimensions. The instrumentation developed is capable to measure and collect data regarding the position and orientation of the vehicle, as well as the consumption values, based on voltage and current measurements. The data collected on vehicle pose, lateral inclination, frontal inclination and orientation in relation to geographic north of the earth, had the objective to identify pilot behaviors and characteristics of relief of the track that could influence consumption of the vehicle. Video footage of the trials was taken using an onboard camera that was used to improve the analysis by identifying driving patterns and adversities on the routes. The track layout algorithm developed to smooth the curves was tested in circuits similar to circuits of the prototype competition. The energy efficiency of this tracing was compared to the energy efficiency of the smaller distance trace usually executed during the efficiency competitions.

Keywords: Energy consuming, Instrumentation, Inclination, Orientation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Veículo elétrico Taura.	10
Figura 2 – Diagrama do sistema elétrico do protótipo.	11
Figura 3 – Rotações de uma aeronave.	12
Figura 4 – Comparativo de consumo entre rotas 1.	16
Figura 5 – Comparativo de consumo entre rotas 2.	16
Figura 6 – Rotas de menor consumo em desníveis.	17
Figura 7 – Trajetória de maior raio possível para uma curva de 90°.	19
Figura 8 – Coordenadas de centro do arco de trajetória de raio máximo.	21
Figura 9 – Nova referência do plano cartesiano da curva.	22
Figura 10 – Exemplo de curva para cálculo do traçado ótimo.	24
Figura 11 – Projeto do case dos sensores.	29
Figura 12 – Tampas do case dos sensores.	30
Figura 13 – Calibração da IMU.	31
Figura 14 – Dados de calibração do voltímetro.	36
Figura 15 – Dados de calibração do amperímetro.	37
Figura 16 – Eletrônica embarcada para instrumentação.	39
Figura 17 – Fluxograma do código desenvolvido.	39
Figura 18 – Instalação dos instrumentos no veículo.	41
Figura 19 – Instrumentação acoplada a bicicleta.	43
Figura 20 – Ensaio de offset para ângulo de <i>roll</i> na bicicleta.	43
Figura 21 – Ensaio de offset para ângulo de <i>pitch</i> na bicicleta.	44
Figura 22 – Mapa do trajeto 1.	45
Figura 23 – Dados de <i>roll</i> do ensaio 1 do trajeto 1.	45
Figura 24 – Movimento de contra-esterço no início de curva.	47
Figura 25 – Dados de <i>azimuth</i> do ensaio 1 do trajeto 1.	48
Figura 26 – Mapa do trajeto 2.	49
Figura 27 – Dados de <i>pitch</i> do ensaio 3 do trajeto 2.	49
Figura 28 – Local dos ensaios.	52
Figura 29 – Planta do estacionamento.	53
Figura 30 – Trajeto 1.	53

Figura 31 – a) Traçado de distância mínima no circuito 1. b) Traçado de raio máximo do circuito 1.	54
Figura 32 – Ensaio de distância mínima no circuito 1.	55
Figura 33 – <i>Azimuth</i> no ensaio 3 de traçado de distância mínima.	57
Figura 34 – <i>Azimuth</i> para ensaio 2 de traçado de raio máximo.	57
Figura 35 – Característica de <i>roll</i> no traçado de distância mínima.	58
Figura 36 – Característica de <i>roll</i> no traçado de raio máximo.	58
Figura 37 – Ensaio de raio máximo no circuito 1.	59
Figura 38 – a) Traçado de distância mínima no circuito 2. b) Traçado de raio máximo do circuito 2.	61
Figura 39 – Dados dos ensaios no circuito 2.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do MPU-6050.....	27
Tabela 2 – Características do HMCL5883L.....	28
Tabela 3 – Dados de calibração de <i>roll</i>	32
Tabela 4 – Dados de calibração de <i>pitch</i>	33
Tabela 5 – Dados de calibração de <i>azimuth</i>	34
Tabela 6 – Características do ACS712.	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	DESCRIÇÃO DO VEÍCULO	9
2.1.1	Mecânica do Veículo	9
2.1.2	Sistema Elétrico de Propulsão	10
2.2	MEDIDA DE POSE	12
2.3	CONSUMO DE ENERGIA	15
2.3.1	Dissipação de Energia em Curvas	15
2.3.2	Dissipação de Energia em Desníveis	16
3	OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADO DE CURVAS	18
3.1	RAIO MÁXIMO DE TRANSPOSIÇÃO DE CURVAS	18
3.2	ALGORITMO DE GERAÇÃO DO TRAÇADO DE RAIOS MÁXIMOS	20
4	INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO	27
4.1	IMU	27
4.2	MEDIDAS DE POTÊNCIA	35
4.3	DATALOGGER.....	38
5	ENSAIOS E RESULTADOS	42
5.1	VALIDAÇÃO DOS INSTRUMENTOS	42
5.2	ANÁLISE DE CONSUMO DO VEÍCULO EM DIFERENTES TRAÇADOS ...	51
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	APÊNDICE A – Dados do ensaio 1 do trajeto 1 com a bicicleta	68
	APÊNDICE B – Dados do ensaio 3 do trajeto 2 com a bicicleta	69
	APÊNDICE C – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 1, em vel. alta	70
	APÊNDICE D – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 1, em vel. baixa	71
	APÊNDICE E – Ensaio 1, traç. de raio máximo, circuito 1, em vel. alta	72
	APÊNDICE F – Ensaio 1, traç. de raio máximo, circuito 1, em vel. baixa	73
	APÊNDICE G – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 2, em vel. alta	74
	APÊNDICE H – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 2, em vel. baixa	75

APÊNDICE I – Ensaio 1, traç. de raio máximo, circuito 2, em vel. alta.	76
APÊNDICE J – Ensaio 1, traç.de raio máximo, circuito 2, em vel. baixa.	77

1 INTRODUÇÃO

Carros elétricos ainda são novidades nas ruas e no mercado automobilístico são vistos como apostas de um futuro breve em razão das poucas opções de modelo. Porém, no meio acadêmico e nos setores de P&D destas mesmas montadoras, os veículos elétricos de passeio são alvos de diversas pesquisas e uma aposta forte como alternativa aos combustíveis fósseis (RODRIGUES e RIBEIRO, 2019).

Vistos como solução promissora para o balanço da matriz energética do planeta, os carros elétricos ainda possuem alguns desafios científicos que os distanciam de serem uma solução consolidada no mercado, sendo o maior destes o aumento da autonomia desses veículos. Pontos de recarga de veículos elétricos ainda são restritos, mesmo em países onde a frota é mais expressiva, e o longo tempo necessário para recarregar os bancos de bateria ainda consistem em um desafio a esta tecnologia.

As pesquisas e projetos na área de eficiência energética realizadas pelas universidades são ações práticas a fim de solucionar este desafio da revolução dos meios de transporte elétricos, e as competições de eficiência energética automobilística são uma oportunidade de apresentação do andamento destes trabalhos.

O desenvolvimento de ferramentas matemáticas que geram rotas de navegação mais eficientes para sistemas automatizados e a instrumentação do veículo a fim de registrar a influência de diversas variáveis sobre o consumo energético agregam muito os estudos sobre eficiência energética em aplicações automotivas (GUPTA et al, 2016).

Este trabalho tem como objetivos gerais e específicos os seguintes tópicos:

Objetivo geral: Desenvolver um sistema de instrumentação da pose de um veículo elétrico de competição e analisar a sua influência no consumo energético.

Objetivos específicos:

- Propor um método de otimização do traçado do circuito que reduza a dissipação de energia cinética nas curvas.

- Instrumentar o veículo a fim de obter a sua pose (inclinação lateral, inclinação frontal e orientação em relação ao norte geográfico da terra), velocidade, potência elétrica e dados de inclinação da pista durante a movimentação do veículo.
- Verificar as relações do consumo do protótipo com as variáveis dinâmicas dos ensaios, como a sua velocidade, duração e inclinação da pista.
- Testar os métodos e modelos desenvolvidos em circuitos de testes conhecidos.
- Comparar o consumo do modelo de otimização desenvolvido em relação à estratégia de pilotagem.
- Disponibilizar instrumentos que possam contribuir com o desenvolvimento dos protótipos da equipe Bagual Racing, equipe de desenvolvimento de veículos supereconômicos da UFRGS fundada em 2012.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o veículo utilizado para a realização do projeto, bem como a apresentação do embasamento teórico necessário ao desenvolvimento do trabalho, a respeito de medida de pose e dissipação de energia em curvas.

2.1 DESCRIÇÃO DO VEÍCULO

O trabalho foi desenvolvido em parceria com a equipe Bagual Racing de desenvolvimento de veículos supereconômicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O veículo utilizado foi o protótipo elétrico de competições universitárias de eficiência, batizado com o nome de Taura.

A Bagual Racing foi fundada em 2011 por alunos dos cursos de Engenharia Mecânica e Controle e Automação com o intuito de participar das edições anuais da Maratona da Eficiência Energética, com a primeira participação na edição de 2013 com um veículo na categoria de protótipo elétrico. Em 2014 a equipe alcançou o 6º lugar nacional na categoria elétrico dentre os 34 protótipos participantes e estreou na categoria para protótipos à gasolina. A partir da extinção da Maratona da Eficiência Energética no ano de 2015, a equipe vem participando das edições da *Shell Eco-marathon Brazil*, uma competição pioneira mundialmente nesta modalidade e que realiza edições anuais para as universidades brasileiras desde 2016.

2.1.1 Mecânica do Veículo

O desenvolvimento do protótipo de veículo elétrico baseou-se no projeto de um chassi tipo triciclo invertido construído em tubos de alumínio, com o objetivo de obter-se uma estrutura que fosse tão robusta quanto os chassis de aço, porém mais leve. Foram utilizados tubos de alumínio de 1,5" com 2mm de espessura de parede, soldados, para a construção do chassi e chapas maciças de 5mm de espessura para os pontos de fixação do cinto de segurança e das rodas. O cinto de segurança utilizado possui cinco pontos de fixação, sendo homologado para prática de esportes automobilísticos *on-road* e *off-road*. O veículo construído, sem sua carenagem, é exibido na Figura 1.

Vários elementos mecânicos do veículo são peças utilizadas em diversas categorias dos esportes de velocidade, pelo fato de já serem projetadas para a

utilização em condições similares de carga, vibração e também visando a redução de peso e fácil montagem dos conjuntos. Este é o caso das rodas e dos sistemas de freio, utilizados em modalidades ciclísticas, e dos elementos do sistema de direção do veículo, projetados originalmente para uso em karts.

Figura 1 – Veículo elétrico Taura.



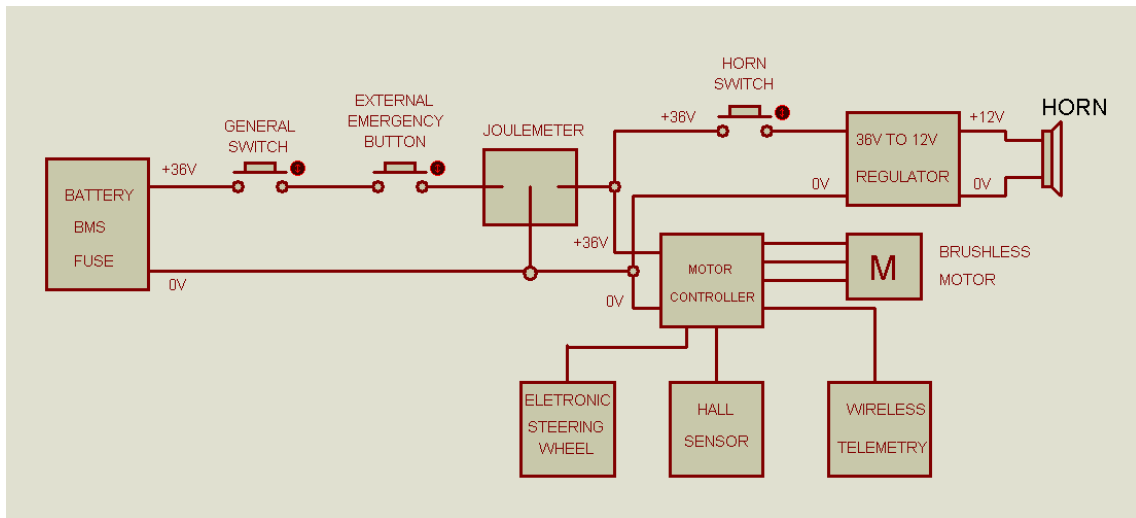
Fonte: Bagual Racing.

2.1.2 Sistema Elétrico de Propulsão

O sistema elétrico de propulsão do veículo é composto, principalmente, por uma bateria de corrente contínua, um motor tipo *brushless* de corrente contínua, uma unidade controladora para o motor e um volante com botões de acionamento eletrônico.

A bateria de lítio utilizada opera com tensão de 36V em corrente contínua e é capaz de fornecer uma corrente máxima de 10A. A bateria já contém internamente em seu invólucro um fusível de 15A circuito de BMS (*Battery Management System*) interno, responsável por evitar sobretensão e sobrecorrente durante os ciclos de carga ou descarga da mesma. Um diagrama explicativo do sistema elétrico pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama do sistema elétrico do protótipo.



Fonte: Bagual Racing.

O motor utilizado no veículo trata-se de um motor *brushless* DC *outrunner* de 350W. Este é adaptado para bicicletas elétricas, pois sua carcaça externa já possui furação padrão para a fixação de uma roda, substituindo um cubo convencional e eliminando a necessidade de um sistema mecânico de transmissão. O motor pode ser visto na roda traseira do protótipo na Figura 1.

Para gerenciar o motor *brushless* utilizado na propulsão do veículo, foi desenvolvida pelos integrantes da equipe uma placa controladora de velocidade. De maneira simplificada, esta controladora é responsável por transformar a tensão de 36VDC da bateria em três sinais trapezoidais idênticos defasados de 120° entre si e de frequência ajustável.

Esta placa tem a função gerar os sinais de excitação do motor a partir da interpretação dos dados recebidos de um circuito de leitura dos botões acionados pelo piloto. Este circuito de leitura está acoplado ao volante, também projetado pelos integrantes da equipe exclusivamente para o protótipo elétrico.

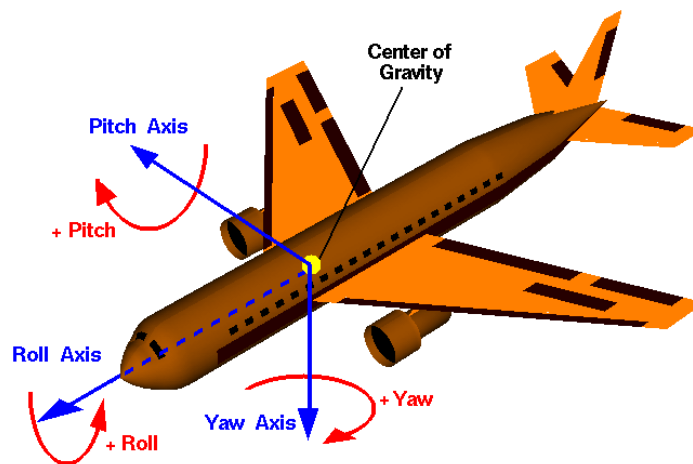
Do ponto de vista de instrumentos, está disponível apenas a contagem de revoluções da roda de tração do carro. Esta informação é relevante para a definição da estratégia de pilotagem dentro das normas das competições, como velocidade instantânea do carro, velocidade média a cada volta e também a sua distância total percorrida. O protótipo já dispunha de um sensor tipo chave magnética *reed switch*

para leitura desta informação, sendo necessária apenas a adaptação deste sensor ao circuito de aquisição de dados a ser desenvolvido.

2.2 MEDIDA DE POSE

Entende-se pelo termo pose a união de referências de posição e de orientação de um corpo em um espaço. Uma das maneiras mais recorrentes de descrever a orientação de um corpo no espaço é a utilização dos ângulos de Euler (CABRAL, E. L. L.). Estes ângulos, ilustrados na Figura 3, descrevem as rotações de um objeto em relação a um sistema de coordenadas fixas ao corpo do objeto.

Figura 3 – Rotações de uma aeronave.



Fonte: www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/rotations.html.

Os ângulos de Euler são muito utilizados na aviação para referenciar a posição da aeronave em relação a seu próprio corpo: rotação em torno de seu eixo longitudinal, chamado de *roll* (rolamento); rotação em torno do eixo transversal, chamada de *pitch* (arfagem); e rotação em torno de seu eixo perpendicular, chamado de *yaw* (guinada).

Com a utilização de uma Unidade de Medições Inerciais (IMU) orientada com o sistema de coordenadas do objeto, é possível obter os ângulos de *roll* e *pitch* pela decomposição da aceleração da gravidade sobre os três eixos de um acelerômetro MEMS (ZAMBERLAN, 2013). Baseado em Ruiz (2015), assumindo ϕ e θ as variáveis que representam, respectivamente, os ângulos de *roll* e *pitch*, denotando de a_x , a_y , e a_z as variáveis que representam as acelerações nos respectivos eixos X, Y, e Z da

IMU, segue que os ângulos de Euler podem ser calculados através da seguinte maneira:

$$\phi = \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \quad (2)$$

O ângulo de *yaw* apresenta a particularidade de não poder ser calculado corretamente através da resposta de apenas acelerômetros e giroscópios. Considerando uma situação inicial em que a IMU esteja com o eixo Z normal à gravidade, independente do ângulo de rotação em torno de Z (*yaw*) que o sensor apresentar, ambos os outros eixos X e Y estarão perpendiculares à gravidade e apresentariam valor nulo de leitura. Esta particularidade impede que apenas acelerômetros e giroscópio possam obter o valor de *yaw* inicial do objeto. Para uma leitura plena de orientação deve-se incluir magnetômetros nos três eixos de leitura da IMU, de forma que a decomposição do vetor de campo magnético do planeta forneça dados suficientes para estimar o *yaw* na situação de perpendicularidade dos eixos X e Y em relação a gravidade.

Existem outros sistemas de referência de objetos que não utilizam coordenadas referentes ao corpo do próprio objeto, mas sim a um referencial fixo. Este é o caso do sistema Azimutal, que utiliza do ângulo de azimute (do inglês *azimuth*) para mensurar a diferença de ângulo entre a direção apontada pelo eixo longitudinal de um corpo (frente do objeto) e a direção que aponta para o norte geográfico da terra (CARVALHO e ARAÚJO, 2008). O sistema de coordenadas Azimutal é utilizado para referenciais cartográficas e instrumentos de navegação, como as bússolas de agulha magnética.

Considere um magnetômetro que dispõe de 3 eixos sensíveis, denominados B_x , B_y , e B_z , sendo os eixos B_x e B_y ortogonais entre si, e ambos ortogonais em relação ao eixo B_z . Denominando as leituras da intensidade do campo magnético da terra sobre cada eixo, respectivamente de b_x , b_y , e b_z , então o ângulo de *azimuth* pode ser definido como:

$$az = \operatorname{atan2} \left(\frac{\sqrt{b_y^2 + b_z^2}}{\sqrt{b_x^2 + b_z^2}} \right) + 180^\circ + \text{declinação} \quad (3)$$

A função *atan2* refere-se à função de arco-tangente quatro-quadrantes, a qual é similar a função arco-tangente, porém com a particularidade ser definida de -180° até 180° invés de ser definida apenas entre -90° e 90° . Como o ângulo de *azimuth* é definido entre 0° e 360° (contados no sentido horário a partir da direção do norte magnético da terra) é necessário que se some 180° ao termo correspondido pela função arco-tangente quatro-quadrantes. A segunda correção necessária para obtenção da informação de *azimuth* é a compensação da declinação magnética do local em que se realiza a medição. Como o norte magnético da terra não é alinhado com o norte geográfico, esta correção é necessária, e o valor de declinação magnética a ser corrigido varia de acordo com a posição da medição sobre o globo terrestre. Aplicativos de bússolas para *smathphones*, por exemplo, realizam os cálculos de *azimuth* considerando os dados do magnetômetro interno do aparelho juntamente com a correção de declinação informada pelo sistema de GPS do mesmo.

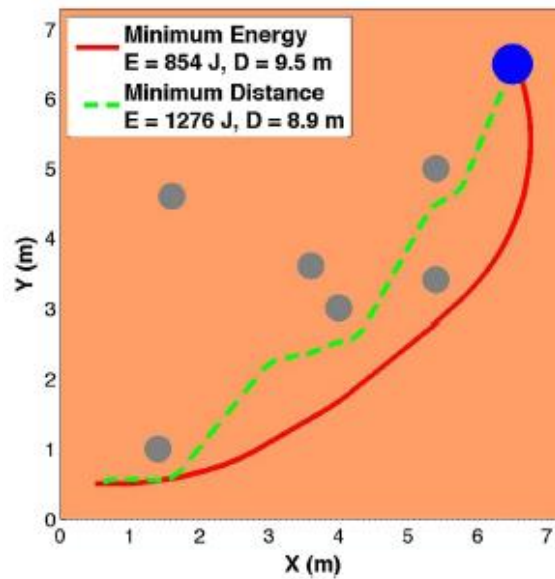
Cabe aqui uma observação importante: como os ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* compõem um sistema de referência de corpo, estes ângulos se referem a rotações em relação ao próprio corpo do objeto a partir de um estado inicial de referência. Como toda a aeronave parte do solo, os ângulos de *roll* e *pitch* são referenciados ao plano da terra, porém, o ângulo de *yaw* é referenciado em relação a direção em que aponta a aeronave. Neste fato reside um ponto de confusão entre *azimuth* e *yaw*. *Azimuth* fornece uma referência de direção em relação ao norte geográfico da terra, enquanto *yaw* fornece uma referência de rotação em relação uma posição inicial aleatória do objeto. Por este fato é possível referenciar a pose de um objeto (posição e orientação) utilizando sistemas de referências misto composto por *roll*, *pitch* e *azimuth* a fim de se obter um sistema de coordenadas mais claras, desde que se informe que as coordenadas de *roll* e *pitch* são relativas ao plano do solo.

2.3 CONSUMO DE ENERGIA

2.3.1 Dissipação de Energia em Curvas

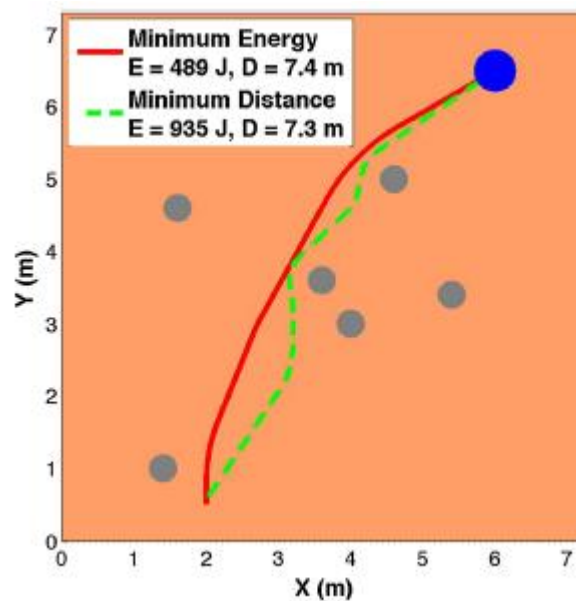
O trabalho (GUPTA et al, 2016) teve como objetivo criar um sistema de controle para um robô autônomo que calcule a rota de menor consumo energético para o veículo. No artigo também são realizadas comparações entre o consumo da rota mais eficiente com o consumo obtido na rota que minimiza a distância percorrida. Os autores destacam que controladores que visam a calcular a rota mais curta nem sempre geram uma rota factível para o robô, tendo em vista que as limitações de potência dos motores não são consideradas quando o controle observa apenas a distância relativa entre objeto e alvo. Isto pode acarretar em falhas na execução de tarefas, um desgaste excessivo do seu sistema de propulsão ou uma baixa autonomia. O sistema de controle do robô gera a rota mais eficiente através da implementação de um algoritmo SBMPO (*Sampling-Based Model Predictive Optimization*), o qual realiza leitura de amostra das variáveis do sistema, calcula o custo de cada ação possível para o robô, e opta pela ação de menor custo, iterativamente. Para gerar uma rota energeticamente eficiente, a função de custo atribuída ao algoritmo SBMPO é a potência necessária para cada ação e as entradas observadas pelo sistema em cada amostra são elementos dinâmicos do veículo como velocidade dos motores e torque, grandezas elétricas do sistema como corrente de cada motor e tensão da bateria, as limitações de potência do sistema de propulsão para evitar uma rota a qual o robô não consiga percorrer, e a posição relativa do local alvo. Com os testes de implementação do sistema no robô em uma pista plana com obstáculos, o controlador se mostrou eficiente, atingindo ganhos de em média 30% em relação aos trajetos de mínima distância, e com apenas um acréscimo da ordem de 7%, em média, da distância do percurso. Exemplos dos ensaios realizados podem ser vistos nas figuras 4 e 5.

Figura 4 – Comparativo de consumo entre rotas 1.



Fonte: GUPTA et al, 2016.

Figura 5 – Comparativo de consumo entre rotas 2.



Fonte: GUPTA et al, 2016.

2.3.2 Dissipação de Energia em Desníveis

É compreensível que uma trajetória que apresente acíves tenha um maior consumo energético, pois, além de converter a energia cinética em energia potencial

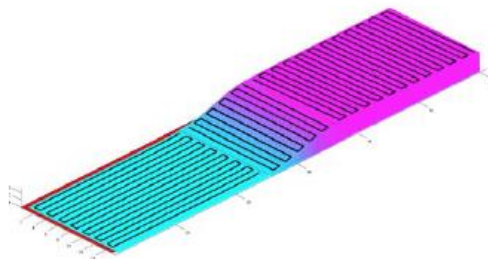
gravitacional, as subidas e descidas aumentam a distância percorrida entre dois pontos de mesma altura.

Em Dogru e Marques (2015) foi criado método de planejamento da rota energeticamente mais eficiente para um robô móvel responsável por mapear uma área tridimensional com obstáculos. Este planejamento visa a incrementar o alcance de robôs de mapeamento de solos para fins agrícolas de maneira mais eficaz que os métodos de planejamento aleatórios implementados em robôs de limpeza doméstica, ou dos métodos de trajetória padronizada como os utilizados em robôs de corte de gramado.

O algoritmo implementado trabalha em três etapas, sendo a primeira a etapa em que se calculam os gradientes do mapa tridimensional do terreno sem considerar os obstáculos e calcula a rota mais eficiente nesse mapa. A segunda etapa do algoritmo utiliza uma representação bidimensional do mapa contendo a posição dos obstáculos, e calcula os desvios mais eficientes para as eventuais colisões na rota obtida da primeira etapa. E num terceiro momento é, então, otimizada a rota resultante obtida do cruzamento dos passos anteriores através de um algoritmo genético.

A apresentação dos resultados obtidos com o algoritmo de planejamento de rota eficiente comparado com os resultados obtidos por algoritmo de varredura mostra que em situações de desníveis no terreno as rotas mais eficientes se dão ao tangenciar as direções de maior gradiente de inclinação do terreno. Esta rota tangente ao gradiente pode ser observada pela trajetória resultante exibida na Figura 6, onde o robô percorre a rampa do circuito longitudinalmente evitando uma rota com subidas e decidas consecutiva.

Figura 6 – Rotas de menor consumo em desníveis.



Fonte: DOGRU; MARQUES, 2015.

3 OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADO DE CURVAS

Em todas as categorias automobilísticas, as curvas possuem um papel importante na estratégia de ultrapassagem e na diferenciação de desempenho dos pilotos em provas de velocidade. Em competições de eficiência energética, nem sempre é tão clara a importância do traçado de pista, mas a maneira em que o piloto transpassa as curvas de um trajeto é fundamental para minimizar a dissipação da energia cinética do veículo.

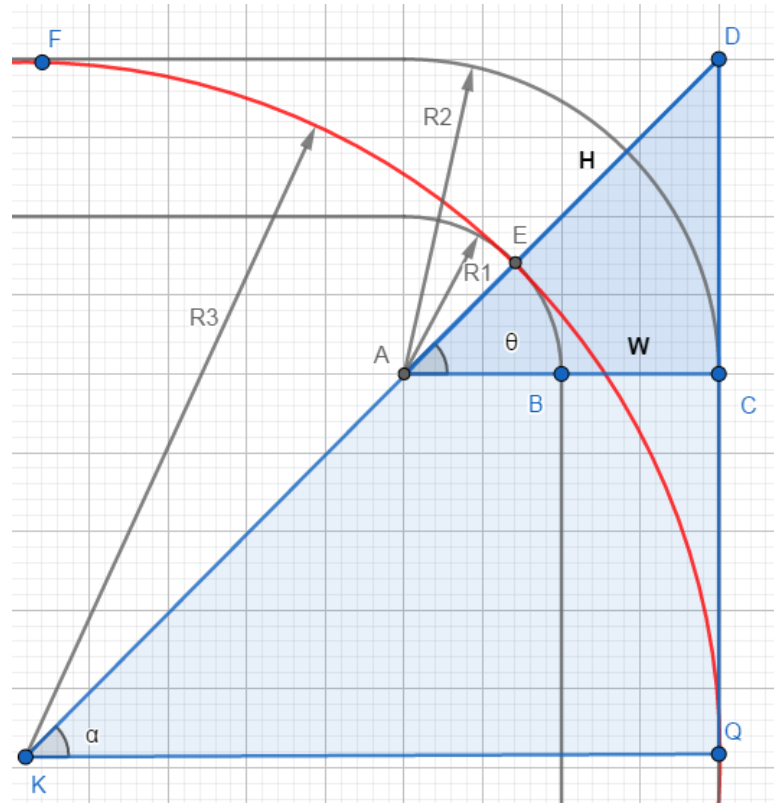
3.1 RAIOS MÁXIMOS DE TRANSPOSIÇÃO DE CURVAS

Uma das técnicas de maximização de desempenho dos pilotos em competições automobilísticas é traçar as curvas do circuito percorrendo a trajetória de maior raio possível. O arco de maior raio proporciona uma rota com menor esterçamento e, conseqüentemente, menos fricção lateral dos pneus e menos dissipação de energia cinética.

Como demonstrado por Pessoa (2013) em seu trabalho de otimização de traçado de curvas para minimizar o tempo de percurso de um circuito, é possível determinar o raio máximo de curvatura possível para transpor uma curva conhecendo alguns parâmetros que descrevem matematicamente este trajeto, como raio interno, raio externo e comprimento (em graus) da curva, conforme ilustrado na Figura 7.

Nesta figura, denomina-se o raio interno da curva como R_1 , raio externo como R_2 e o maior raio possível para transpor a curva como R_3 . Observe que o traçado do círculo de raio R_3 que compreende a trajetória otimizada de menor esterçamento (traçada em vermelho) tangencia a borda externa da pista na entrada da curva (ponto F), a borda interna no ápice (meio geométrico, ponto E) e novamente a borda externa, já na saída da curva (ponto Q). A partir desses pontos a medida H, correspondente à distância entre os pontos D e E, e a medida W, referente à largura do circuito, podem ser determinadas pela distância entre os pontos B e C, ou de maneira mais simples, pela diferença entre os raios R_1 e R_2 .

Figura 7 – Trajetória de maior raio possível para uma curva de 90°.



Utilizando de princípios de geometria analítica, pode-se chegar à seguinte equação para os ângulos α e θ :

$$\cos(\theta) = \frac{(R1 + W)}{(R1 + H)} \quad (4)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{R3}{(R3 + H)} \quad (5)$$

Por semelhança de triângulos, observa-se que os ângulos α e θ são iguais. Assim, pode-se encontrar o raio ótimo $R3$ isolando-o da igualdade das expressões (4) e (5):

$$\frac{R3}{(R3 + H)} = \cos(\theta) = \frac{(R1 + W)}{(R1 + H)} \quad (6)$$

$$R3 = \frac{W}{(1 - \cos(\theta))} + R1 = \frac{(R2 - R1)}{(1 - \cos(\theta))} + R1 \quad (7)$$

Observa-se que a equação que define R3 ainda permite a adição de condição de contorno, como, por exemplo, a largura do veículo W_{car} . A ponderação deste elemento na equação garante que o veículo não sai da pista em nenhum momento ao executar o traçado gerado pela curva de raio R3. Assim, a definição de R3 é dada por:

$$R3 = \frac{\left(R2 - \frac{W_{car}}{2}\right) - \left(R1 + \frac{W_{car}}{2}\right)}{(1 - \cos(\theta))} + \left(R1 + \frac{W_{car}}{2}\right) \quad (8)$$

$$R3 = \frac{(R2 - R1 - W_{car})}{(1 - \cos(\theta))} + \left(R1 + \frac{W_{car}}{2}\right) \quad (9)$$

Para qualquer curva de ângulo φ graus, a variável θ será definida como $\theta = \varphi/2$.

3.2 ALGORITMO DE GERAÇÃO DO TRAÇADO DE RAIOS MÁXIMO

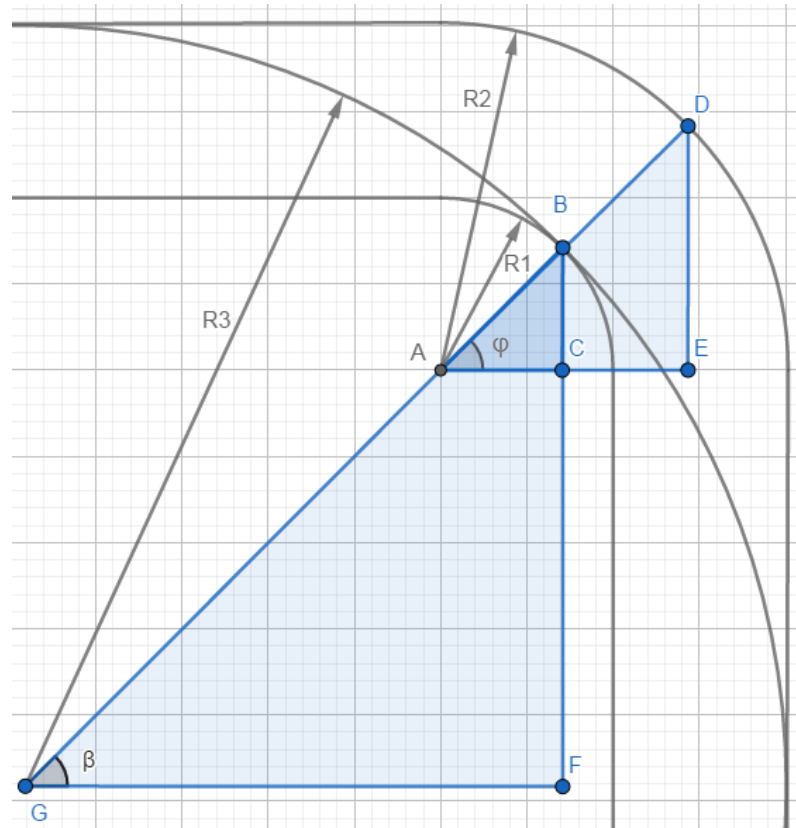
Baseando-se no desenvolvimento matemático de (PESSOA, 2013) apresentado na Seção 3.1, pode-se descrever matematicamente uma pista de corrida como um conjunto de equações de suas retas e curvas. Partindo destas equações, é possível calcular os raios máximos de curvatura para cada curva do circuito separadamente, e unificando estes raios máximos pode-se obter a rota que minimiza as perdas de energia cinética na pista.

Para representar corretamente o traçado otimizado em relação à dissipação de energia cinética em curvas, além de se conhecer o raio máximo de transposição de uma curva, também é preciso conhecer as coordenadas do centro do arco correspondente a este raio máximo de curvatura. De posse da descrição matemática do circuito e utilizando conceitos fundamentais de geometria analítica, buscou-se uma maneira de determinar as coordenadas de centro destes arcos correspondentes ao traçado ideal de raio máximo possível para transposição de cada curva. Considerou-se a situação representada na Figura 8 para desenvolver essa análise.

Considere os triângulos ABC, ADE e GBF. Para obter a representação gráfica do circuito, deve-se conhecer os raios R1 e R2, bem como as coordenadas de seu ponto central comum A e o comprimento de sua trajetória angular φ . Por semelhança de triângulos, observa-se que o ângulo formado pelos pontos BAC é idêntico ao ângulo entre os pontos BGF, denominado beta (β) na figura em questão. Pela definição de

que o ponto B corresponde ao ponto médio da trajetória angular do arco de raio R1, conclui-se que $\beta = \varphi/2$.

Figura 8 – Coordenadas de centro do arco de trajetória de raio máximo.



Sabe-se que o arco de raio R1 compreende uma fração de um círculo de mesmo raio, cuja equação pode ser escrita como:

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = R1^2 \quad (10)$$

onde as variáveis x_A e y_A referem-se, respectivamente, as coordenadas em x e y do ponto A.

Fazendo uso do mesmo raciocínio para encontrar a equação que descreve o círculo que contém o arco de raio máximo R3, tem-se a seguinte expressão:

$$(x - x_G)^2 + (y - y_G)^2 = R3^2 \quad (11)$$

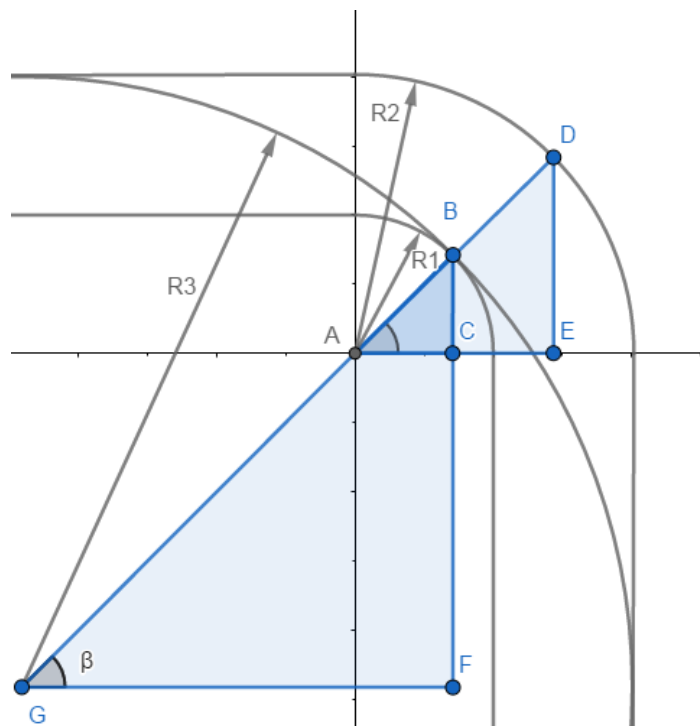
onde R3 é o raio máximo de curvatura da trajetória e x_G e y_G são as coordenadas do centro G do arco, sendo estas variáveis desconhecidas e alvos de interesse dessa manipulação algébrica. Note que o círculo de raio R1 tangencia a curva de raio R3 em

seu ponto médio B, evidenciando que este ponto é comum às soluções das duas equações (10) e (11). Assim, substituindo as coordenadas x e y pelas coordenadas do ponto B na equação que define o círculo de raio R3, tem-se:

$$(x_B - x_G)^2 + (y_B - y_G)^2 = R3^2 \quad (12)$$

Em (12), nota-se a existência de termos desconhecidos, x_G e y_G , porém, relacionados com a reta G, A e B. A partir de uma mudança de referência no plano cartesiano, de forma que a origem desse novo sistema seja o ponto central A dos arcos de curvatura R1 e R2, novamente pela semelhança entre os triângulos ABC e GBF e pela colinearidade das hipotenusas destas figuras geométricas, pode-se concluir que há uma proporcionalidade entre as dimensões dos catetos destes dois triângulos e que essa taxa de proporcionalidade é a mesma entre as coordenadas x_G e y_G em relação à nova origem do plano. Isto somente se dá em função de que as hipotenusas são colineares sobre a reta GAB. Esta nova referência do plano cartesiano em que se está representando o traçado da pista e a proporcionalidade entre os catetos do triângulo ABC e as coordenadas x_G e y_G são exemplificadas na Figura 9.

Figura 9 – Nova referência do plano cartesiano da curva.



Utilizando da proporcionalidade entre os catetos AC e CB do triângulo ABC, e igualando esta taxa à taxa de proporcionalidade entre as coordenadas x_G e y_G do novo sistema de referência, segue que:

$$\frac{x_B}{y_B} = \frac{x_G}{y_G} \quad (13)$$

$$y_G = x_G \left(\frac{y_B}{x_B} \right) \quad (14)$$

Substituindo o termo y_G da Equação (12) pela expressão obtida na Equação (14), obtém-se a seguinte equação:

$$(x_B - x_G)^2 + \left(y_B - x_G \left(\frac{y_B}{x_B} \right) \right)^2 = R3^2 \quad (15)$$

Com apenas uma variável na equação resultante (15) é possível isolar a variável x_G e calcular o seu valor. A grandeza y_G , então, é obtida da substituição do valor de x_G na Equação (14). Desta forma é conhecida as coordenadas do ponto central G da trajetória ótima de curvatura R3.

Para validar o método matemático desenvolvido, foi suposta uma curva como a representada na Figura 10. No exemplo foi utilizado $R1 = 20\text{m}$ e $R2 = 40\text{m}$, ambos os arcos já centrados na origem, e uma curva de ângulo $\varphi = 90^\circ$. O raio máximo de curvatura pode ser obtido através da Equação (7), onde ao substituir os valores de R1 e R2, tem-se que:

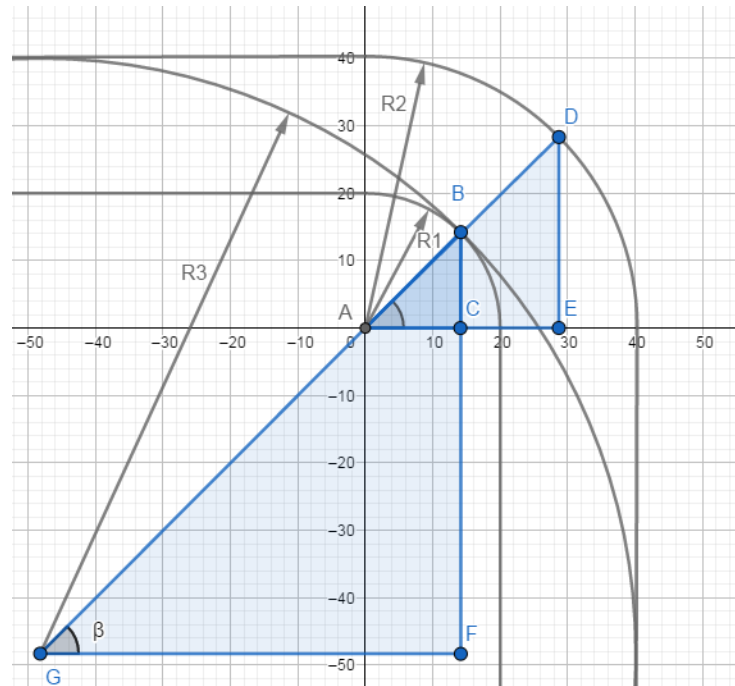
$$R3 = \frac{(R2 - R1)}{(1 - \cos(\theta))} + R1 = \frac{(40 - 20)}{\left(1 - \cos\left(\frac{90}{2}\right)\right)} + 20 = 88,2843\text{m} \quad (16)$$

Para encontrar o centro do arco de raio R3, faz-se uso da Equação (15), resultando em:

$$(x_B - x_G)^2 + \left(y_B - x_G \left(\frac{y_B}{x_B} \right) \right)^2 = R3^2 \quad (17)$$

$$(14,1421 - x_G)^2 + \left(14,1421 - x_G \left(\frac{14,1421}{14,1421}\right)\right)^2 = 88,2843^2 \quad (18)$$

Figura 10 – Exemplo de curva para cálculo do traçado ótimo.



$$x_G = -48,2843m \text{ ou } x_G = 76,5685m \quad (19)$$

Analisando a imagem da Figura 10, pode-se observar que x_G não pode assumir um valor positivo no plano cartesiano, pois G está localizado no 3º quadrante. Desta forma, conclui-se que $x_G = -48,2843m$. Substituindo esta variável na Equação (14), calcula-se o valor da coordenada y do ponto G como sendo:

$$y_G = x_G \left(\frac{y_B}{x_B}\right) = -48,2843 \left(\frac{14,1421}{14,1421}\right) = -48,2843m \quad (20)$$

Analisando os valores obtidos para as coordenadas do ponto central G do arco R3 observa-se que os métodos, tanto de cálculo do raio da trajetória ótima, quanto de posicionamento do traçado ideal são coerentes e solucionam situações de circuitos reais.

Para calcular não só o traçado ideal de uma curva, mas de um circuito todo, pode-se utilizar os mesmos métodos anteriormente descritos decompondo o circuito em várias curvas diferentes e calcular os traçados ideais de cada uma separadamente. O

traçado do circuito completo se dá pela união dos traçados individuais, com ressalvas para os seguintes casos específicos:

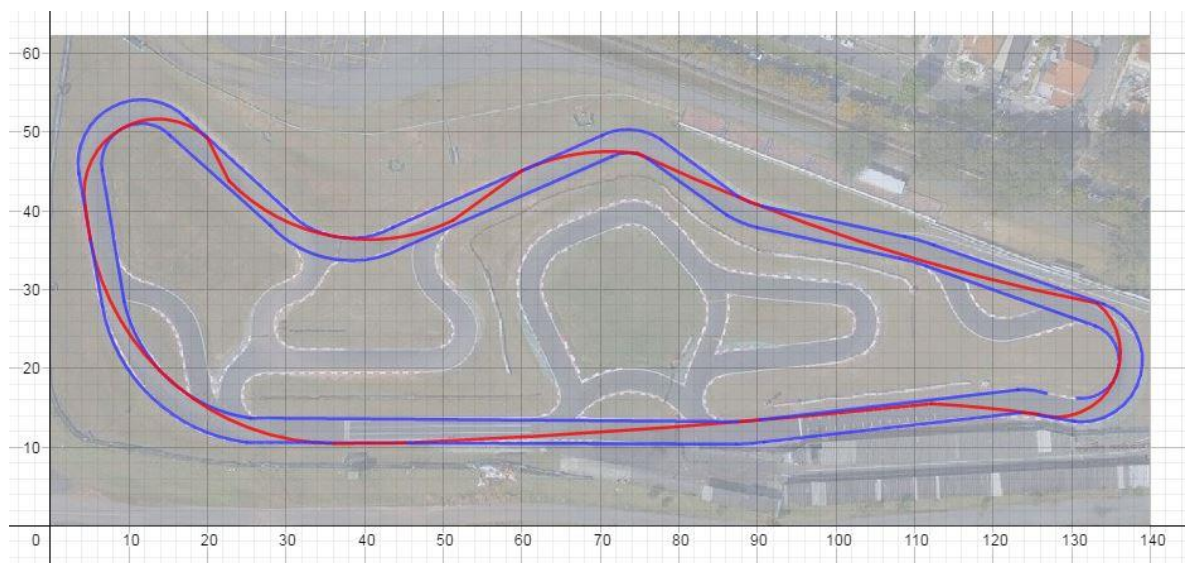
- Curva de Sentidos Opostos
 - Se, ao final do traçado de raio máximo da primeira curva, é possível traçar uma reta até o ápice da segunda curva, realiza-se o traçado de raio máximo da saída da primeira curva e para a entrada da segunda curva, pois estas duas rotas se encontram.
 - Se, ao final do traçado de raio máximo da primeira curva, não for possível traçar uma reta até o ápice da segunda curva sem exceder os limites da pista, realiza-se o traçado de raio máximo da saída da primeira curva e o traçado de menor distância (tangenciando a borda da pista) para a entrada da segunda curva.

- Curvas de Mesmo Sentido
 - Se a saída do traçado de raio máximo da primeira curva intercepta o traçado de raio máximo de entrada da segunda curva, realiza-se o traçado de raio máximo da saída da primeira curva e para a entrada da segunda curva, pois estas duas rotas se encontram.
 - Se a saída do traçado de raio máximo da primeira curva não intercepta o traçado de raio máximo de entrada da segunda curva, realiza-se o traçado de raio máximo para a saída da primeira curva e para a entrada da segunda interligando-os tangenciado a pista por sua borda externa.
 - Se as curvas de sentido opostos forem suaves e seus traçados de raio máximo não se cruzarem, estas duas curvas podem ser transpostas por uma reta.

Estas restrições elaboradas para o algoritmo de geração de traçado de raio máximo foram estipuladas a fim de restringir as possibilidades de execução de curvas pelo método proposto.

Para exemplificar o algoritmo de geração de traçado de raio máximo de curvatura, considere a Figura 11. Nela é exibido o mapa do kartódromo Ayrton Senna, localizado no complexo de Interlagos, na cidade de São Paulo. Nesta figura pode-se ver o circuito externo do kartódromo destacado pelas linhas de cor azul. Em vermelho é exibido o traçado de raio máximo obtido para este circuito através da aplicação do algoritmo desenvolvido para cada curva que o compõem e aplicando as restrições de rota em razão da direção de cada sequência de curvas.

Figura 11 – Algoritmo desenvolvido aplicado ao kartódromo Ayrton Senna.



4 INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento dos instrumentos utilizados no projeto. Estes itens se referem a um case para acomodação dos sensores e de duas placas de circuito impresso: uma placa dispoendo de circuito voltímetro e amperímetro outra contendo o circuito *datalogger*.

4.1 IMU

Para desenvolvimento da instrumentação foi considerado que as rotações serão mensuradas em *roll*, *pitch* e *azimuth*, sendo os ângulos de *roll* e *pitch* referenciados em relação ao nível do solo. A medida de *azimuth* é sempre referenciada em relação ao norte geográfico da terra.

As medidas de acelerações necessárias para o equacionamento de *roll* e *pitch* descritas nas equações (1) e (2) na Seção 2.2 podem ser obtidas através dos dados de um acelerômetro combinados com os dados de um giroscópio. Para tais tarefas, foi feito uso de um módulo eletrônico baseado no MPU-6050, que contém em um único chip um acelerômetro e um giroscópio tipo MEMS (*Microelectromechanical systems*). São 3 eixos para o acelerômetro e 3 eixos para o giroscópio, sendo ao todo 6 graus de liberdade (6DOF). Além disso, apresenta um *Digital Motion Processor* (DMP) embarcado, capaz de adquirir os dados dos acelerômetros, giroscópios e sensores adicionais (magnetômetros, por exemplo) e realizar a fusão destes dados, retornando a pose do veículo em ângulos de Euler ou quaternions. A Tabela 1 descreve as principais características do MPU-6050 (INVENSENSE).

Tabela 1 – Características do MPU-6050.

Tensão de Operação (V)	Protocolo de Comunicação	Resolução de Acel. e Giro.	Número de Eixos do Giroscópio	Faixas de Oper. Do Giroscópio (°/segundo)	Número de Eixos do Acelerômetro	Faixas de Oper. Do Acelerômetro (g)
2,375 – 3,46	I ² C	16 bits	3	±250	3	±2
				±500		±4
				±1000		±8
				±2000		±16

Fonte: InvenSense.

Já para medir a orientação do protótipo em relação ao norte geográfico da terra através da equação (3) mencionada na seção 2.2, é necessário um sensor capaz de medir a intensidade da força de atração das linhas magnéticas da terra sobre dois ou mais eixos. Estes sensores são denominados magnetômetros e, através do equacionamento das componentes de cada eixo, pode-se obter a orientação do sensor. O processador MPU6050 não conta com um magnetômetro em seu circuito integrado, e por esta razão o magnetômetro adotado para compor a IMU desenvolvida para o projeto foi o HMC5883L (HONEYWELL), cujos dados estão disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do HMCL5883L

Tensão de Operação (V)	Protocolo de Comunicação	Resolução de Acel. e Giro.	Número de Eixos do Giroscópio	Faixas de Oper. Do Magnetômetro (gauss)
2,16 -3,46	I ² C	12 bits	3	±0,88
				±1,3
				±1,9
				±2,5
				±4,0
				±4,7
				±5,6
				±8,1

Fonte: Honeywell

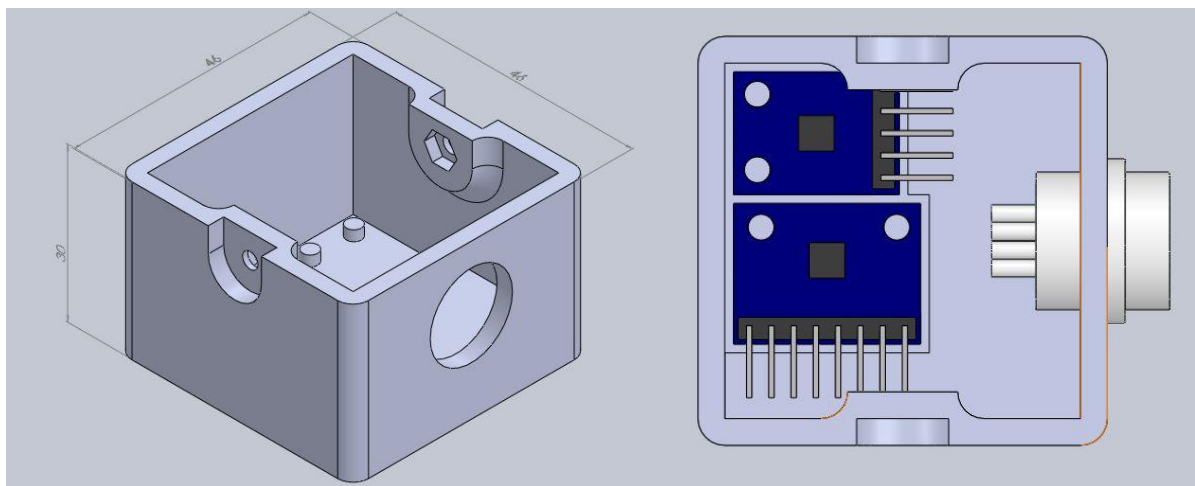
Para a instrumentação do protótipo também foi utilizada a plataforma de prototipagem Arduino® UNO, na qual baseou-se todo o desenvolvimento de *software* embarcado do projeto. Este componente teve por finalidade gerenciar as leituras de dados dos sensores, realizar operações matemáticas de correção e médias dos valores obtidos, bem como organizar e temporizar a gravação destes dados em mídia física para possibilitar a análise e pós processamento dos mesmos.

No código desenvolvido para a aplicação, os instrumentos foram configurados para operarem nas seguintes escalas: acelerômetro em $\pm 2g$, giroscópio em $\pm 2000^{\circ}/s$, e magnetômetro em $\pm 1,3$ gauss.

Para a correta leitura e correlação dos dados do acelerômetro/giroscópio e do magnetômetro é necessário que se garanta o alinhamento preciso de seus eixos de leitura, bem como boa fixação que não permita a movimentação dos sensores em relação a estrutura do veículo. Para garantir estas condições, foi projetado um case

para acomodação dos sensores. O case foi projetado em CAD com o auxílio da ferramenta SolidWorks®. No interior da peça foram previstos os locais de acomodação dos sensores de acordo com medidas das placas disponíveis, aferidas com paquímetro Mitutoyo modelo 530-312B-10 de exatidão $\pm 0,03\text{mm}$, onde os sensores foram fixados com o auxílio de cola quente. Os barramentos de alimentação e comunicação I²C dos sensores foram ligados a um conector MIKE de 6 vias, modelo escolhido por possuir um anel rosqueado para garantir fixação em aplicações suscetíveis a vibração. A peça projetada é exibida na Figura 12.

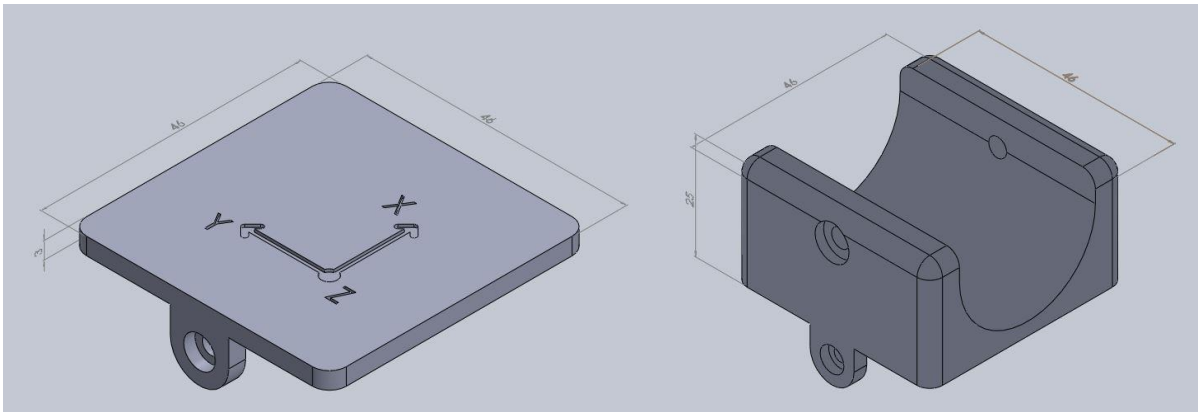
Figura 12 – Projeto do case dos sensores.



Foram previstas duas tampas para o case dos sensores: uma plana contendo a indicação da orientação em que os eixos dos sensores foram acomodados, a fim de facilitar os ensaios em bancada com os sensores e outra tampa côncava com rebaixo de perfil cilíndrico de 2,54cm, com o objetivo de garantir uma boa fixação nos tubos de alumínio que compõem o chassi do veículo. As tampas, exibidas na Figura 13, são fixadas ao case através de dois parafusos padrão M3, cujas porcas foram acomodadas em rebaixos hexagonais no lado interno do case. As placas dos sensores foram fixadas com cola quente.

O case projetado foi construído utilizando a tecnologia de impressão 3D em filamentos de PLA. O material e o serviço de impressão foram gentilmente fornecidos pelo Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia (LIFEELAB).

Figura 13 – Tampas do case dos sensores.



As informações de *pitch* e *roll* podem ser obtidas de duas maneiras: adquirindo os dados brutos de aceleração sob os três eixos do acelerômetro e aplicando estes valores nas equações (1) e (2), ou fazendo uso do DMP, o qual já disponibiliza os dados de inclinação em *roll*, *pitch* e *yaw* após a aplicação de filtros complementares.

Inicialmente foram utilizadas as leituras brutas dos sensores e um filtro complementar para o cálculo das inclinações. Este método validou as equações (1) e (2), apresentando dados condizentes com ensaios estáticos em bancada, mas os sinais resultantes apresentaram um nível de ruído significativo. Além disso, o ajuste do filtro complementar foi empírico, com grande efeito na resposta resultante. Estes dados foram comparados com os dados já filtrados pela DMP.

Para a leitura dos dados oriundos da DMP foi utilizada a biblioteca MPU6050.h (disponível em <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/MPU6050>). A adoção desta biblioteca para o desenvolvimento do projeto foi motivada pela fácil utilização das funções implementadas, a riqueza de detalhes nos comentários dos códigos e a disponibilidade de exemplos de utilização. Durante os ensaios preliminares em bancada, os dados de inclinações obtidos através da leitura direta do DMP se mostraram mais precisos e menos dispersos frente aos dados obtidos de equacionamento de leituras brutas de aceleração. Por esta razão, decidiu-se basear a telemetria do projeto nos dados de inclinação obtidos através do processador interno da IMU.

Para aferir a precisão dos dados de inclinação obtidos do DMP e encontrar as suas equações de calibração, foi realizado o seguinte experimento: em uma placa de vidro plana foram fixados um celular com aplicativo de leitura de inclinação, uma bússola de agulha magnética e o case contendo os sensores. A placa foi colocada em diferentes posições, variando cada grau de liberdade separadamente e os valores obtidos da IMU foram comparados com aqueles informados pelo celular.

Para tal ensaio foi utilizado o aplicativo Bússola, desenvolvido pela empresa Melon Soft e disponível gratuitamente na loja de aplicativos do sistema operacional Android. Este aplicativo foi escolhido por informar as inclinações laterais e frontais do aparelho, além de exibir também os dados de orientação em relação ao norte magnético e a orientação corrigida em relação ao norte real, considerando a declinação magnética do local informado pelo GPS do celular. Para aferir a indicação do norte magnético da terra, foi utilizada uma bússola de agulha magnética fixada junto à placa de vidro. O aplicativo foi executado em um aparelho celular Samsung modelo Galaxy A5 2017. Todos os elementos foram presos a superfície de vidro utilizando fita adesiva dupla face 3M Scotch® de 19mm de largura por 2mm de espessura, com resistência de fixação de 800g/15cm. A Figura 14 mostra um ensaio de calibração dos sensores.

Figura 14 – Calibração da IMU.



No ensaio para calibração de dados de *roll*, a superfície de vidro foi submetida a inclinações laterais até valores próximos de 90° , tanto para a direita quanto para a esquerda em relação ao nível do solo. Já, nos ensaios para calibração de *pitch*, a superfície sofreu inclinações frontais que apontassem para baixo (declive) ou para cima (aclive), também até valores de magnitude próxima a 90° . Os ensaios se deram

nestes limites de inclinação por contemplarem a faixa de valores em que o protótipo está suscetível durante a maioria do tempo de prova, com inclinações entre $\pm 10^\circ$.

Considerando que a IMU está orientada de modo que o eixo X esteja alinhado com a vista do leitor, apontando para um ponto à frente no horizonte, as inclinações laterais para a direita ou as inclinações frontais de auge são sinalizadas como valores positivos, conseqüentemente, as inclinações laterais para a esquerda ou as inclinações frontais de declive são sinalizadas como valores negativos. Os dados obtidos nos ensaios de calibração são exibidos na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3 – Dados de calibração de *roll*.

Celular	IMU	Celular	IMU
0,1	0,27	-0,5	-0,19
1,9	2,22	-1,9	-1,45
4,1	4,46	-4,0	-3,69
8,2	8,53	-7,8	-7,35
10,4	10,58	-10,1	-9,67
12,2	12,41	-11,9	-11,51
15,2	15,32	-16,0	-15,52
20,2	20,29	-19,9	-19,33
24,9	25,01	-25,9	-25,41
30,9	31,05	-30,6	-30,36
35,4	35,37	-35,7	-35,24
41,0	41,06	-40,0	-39,75
44,9	44,96	-46,2	-46,01
60,2	60,07	-61,4	-61,46
73,4	73,23	-74,4	-74,49
81,0	80,87	-80,3	-80,77
84,0	84,03	-83,1	-83,71
86,3	86,34	-86,1	-86,46
88,7	88,73	-89,5	-89,72

Os ensaios para calibração dos dados adquiridos de *azimuth* foram necessários procedimentos experimentais diferentes das demais inclinações. Nestes ensaios, a placa de vidro foi posicionada sobre a superfície plana e nivelada de uma mesa, e submetida a rotações de volta completa no plano da mesa, paralelamente ao plano do chão sem que ocorressem desnivelamento significativos (igual ou maiores que $\pm 1^\circ$, aferidos no aplicativo Bússola).

Tabela 4 – Dados de calibração de *pitch*.

Celular	IMU	Celular	IMU
0,2	0,70	-1,6	-0,80
2,9	3,75	-2,3	-1,30
4,5	5,45	-5,4	-4,71
8,0	8,71	-7,2	-6,96
10,1	10,94	-10,1	-9,29
13,3	13,95	-12,5	-11,39
15,0	15,74	-16,8	-15,67
21,0	21,59	-20,7	-19,53
26,0	26,69	-25,1	-24,25
31,8	32,20	-30,8	-29,89
34,1	34,68	-35,2	-34,35
41,4	41,74	-40,7	-39,91
45,8	46,22	-45,7	-45,46
64,4	64,41	-62,8	-62,44
72,1	72,27	-71,4	-71,25
80,2	80,08	-81,2	-81,31
84,4	84,45	-84,5	-84,49
86,1	86,22	-88,3	-88,62
89,1	88,81	-89,2	-89,94

A bússola de agulha magnética foi utilizada para aferir a coordenada do norte magnético da terra disponíveis no aplicativo em todas as medidas. Já as coordenadas de norte real foram tabeladas com as leituras de dados oriundos do magnetômetro.

Tanto os dados do aplicativo, quanto os dados obtidos do sensor HMC5883L foram corrigidos para cálculo de orientação em relação ao norte real considerando a declinação magnética local da cidade de Porto Alegre de $-17,06^\circ$ (ou $-17^\circ 3'$, na notação grau-minuto). A informação de declinação magnética foi obtida através de pesquisa no site <http://www.magnetic-declination.com/> e se mostrou semelhante à informação de declinação disponível no aplicativo Bússola, considerando as coordenadas de GPS do aparelho no momento da realização dos ensaios. A correção para orientação real é realizada pelo decremento dos $-17,06^\circ$ referentes à declinação da cidade de Porto Alegre, da leitura de orientação magnética obtida das bússolas ou do magnetômetro. A Tabela 5 exhibe as leituras realizadas no ensaio de calibração do sensor.

Tabela 5 – Dados de calibração de *azimuth*.

Celular	IMU	Celular	IMU
0	268,98	180	179,79
3	5,58	190	190,53
10	14,15	200	202,54
23	25,33	210	212,10
32	33,78	220	223,44
41	41,86	229	236,57
48	48,10	241	248,27
61	57,43	251	257,49
71	66,22	260	266,03
82	75,82	270	275,40
90	83,43	280	284,50
101	93,66	290	294,75
112	102,18	300	305,37
123	112,77	310	313,74
131	122,87	321	323,98
140	132,55	330	332,33
150	141,60	339	340,53
160	153,83	350	350,57
171	166,77	357	356,27

Com a realização dos ensaios de calibração da IMU, foi possível verificar que os dados de inclinação de *roll* e *pitch*, oriundos do processador DMP nativo da MPU-6050, apresentaram erro menor que 2° para todas as medidas realizadas, valor este satisfatório de precisão requerida para a aplicação. Os dados de calibração de *azimuth* oriundos do magnetômetro HMC5583L apresentaram erro menor que 11° para todas as medidas (exceto para a leitura de 0° do celular, como discutido no parágrafo anterior), sendo menor que 5° para aproximadamente 50% das leituras. Este grau de precisão nas leituras de orientação geográfica também foi considerado satisfatório para a aplicação.

Em vista de que as leituras brutas de dados da IMU desenvolvida apresentaram precisão e linearidade satisfatórias para as três rotações de interesse à instrumentação do protótipo, optou-se por não utilizar nenhuma equação de calibração ou correção dos dados lidos destes sensores. Esta decisão também levou em consideração a capacidade de processamento da plataforma Arduino® UNO e a frequência de aquisição de dados necessárias.

4.2 MEDIDAS DE POTÊNCIA

Assim como os dados inerciais do protótipo, também foi necessário o desenvolvimento de um circuito capaz de mensurar as grandezas elétricas referentes ao consumo energético do protótipo, para que se relacione estes parâmetros com os dados dinâmicos do mesmo.

Os instrumentos necessários para análise de consumo energético do protótipo se resumem a um amperímetro e um voltímetro. Estes dois instrumentos amostravam a tensão e corrente elétrica da bateria do carro para que se faça o processamento destes dados de consumo e a obtenção do consumo energético.

Por praticidade de utilização, optou-se por um módulo sensor de corrente baseado no circuito integrado ACS712 (ALLEGRO MICROSYSTEMS), um sensor de corrente bidirecional de efeito hall. O módulo permite a leitura de correntes elétricas da faixa de $\pm 30A$. A Tabela 6 apresenta alguns dos parâmetros deste componente.

Tabela 6 – Características do ACS712.

Tensão de Operação (V)	Tipo de Resposta	Faixa de Leitura (A)	Sensibilidade (mV/A)	Tempo de Resposta (us)
5	Tensão Analógica	± 30	66	5

Fonte: Allegro Microsystems.

Para realizar as medidas de tensão foi utilizado um divisor resistivo composto por dois potenciômetros de $100K\Omega$, de encapsulamento 3296 vertical. O divisor resistivo teve seus componentes ajustados em valores de $90K\Omega$ e $9K\Omega$ para que a tensão de saída do circuito se refira a 10% de sua tensão de entrada.

A leitura dos circuitos sensíveis a tensão e corrente elétrica foi realizada em uma placa plataforma Arduino® UNO. O código preliminar implementado realiza a leitura de dois canais analógicos, um para a resposta em tensão oriunda do módulo ACS712

e outro para a leitura da tensão amostrada pelo circuito divisor resistivo. Cada canal analógico é amostrado entre 0V e 5V, com uma resolução de 10 bits, e os valores lidos eram enviados por comunicação serial a um terminal de um notebook.

Os circuitos de voltímetro e amperímetro foram projetados para amostrar valores de 0VDC a 50VDC e 0A a 10A em corrente contínua, respectivamente. Estes valores foram adotados por contemplarem as faixas tensão e corrente da bateria de lítio de 36V e 10Ah que equipa o protótipo elétrico.

Os dados amostrados durante os ensaios de caracterização dos instrumentos desenvolvidos foram condensados em dois gráficos, representados pelas figuras 15 e 16.

Verificou-se que o comportamento pode ser aproximado pelas equações (21) e (22) para correspondência de tensão e corrente em relação à leitura de seus canais analógicos, onde a e b referem-se ao valor em base decimal da conversão analógica-digital dos respectivos canais analógicos.

Figura 15 – Dados de calibração do voltímetro.

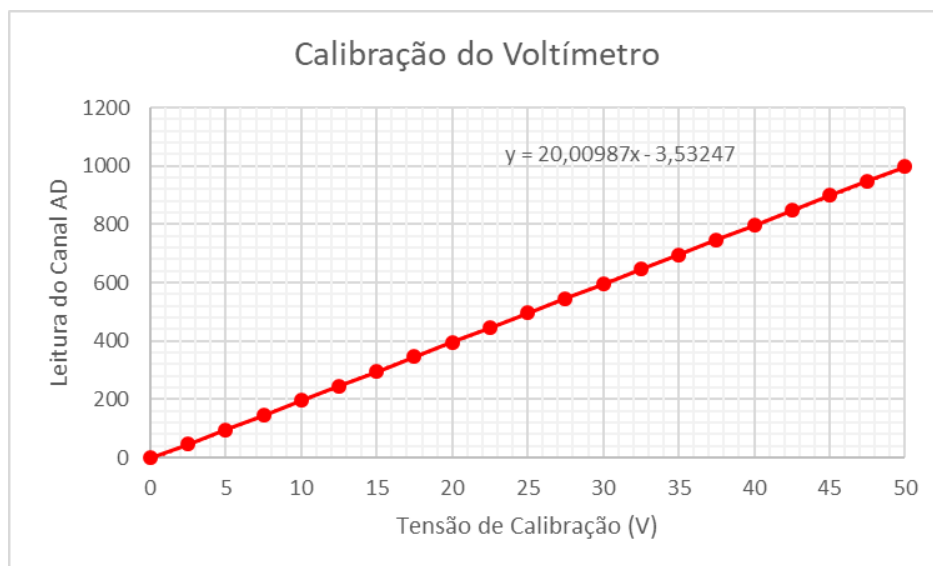
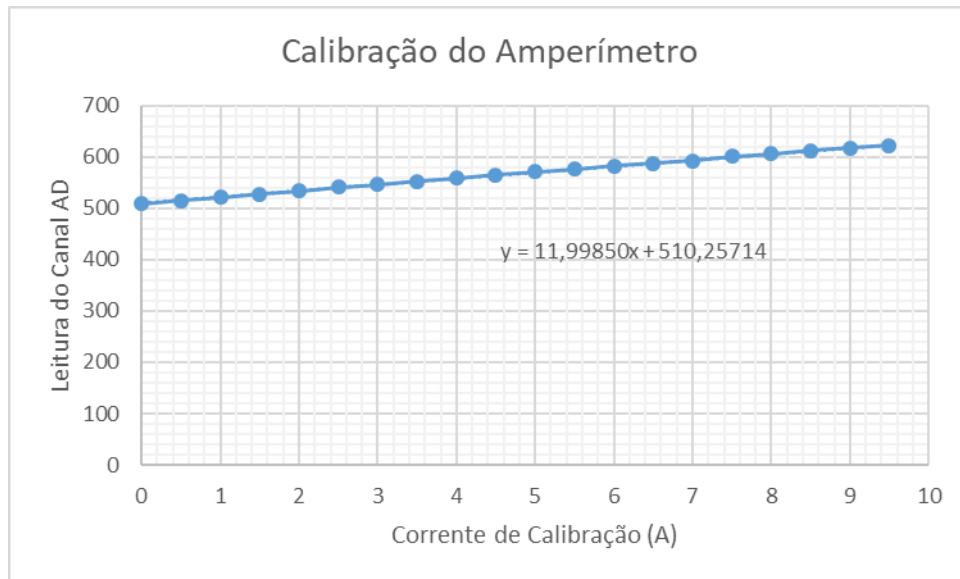


Figura 16 – Dados de calibração do amperímetro.



$$V = \frac{a + 3,53247}{20,00987} \quad (21)$$

$$I = \frac{b - 510,25714}{11,99850} \quad (22)$$

As equações (21) e (22) serviram de base para o cálculo das variáveis elétricas do veículo, e, de posse dos dados de tensão e corrente, também foi possível obter a potência elétrica instantânea e o consumo energético acumulado do protótipo.

Uma vez conhecidos os valores de tensão e corrente elétrica da bateria, pode-se calcular a potência elétrica do veículo como sendo a multiplicação direta destas duas grandezas. Assim, define-se que

$$P = VI \quad (23)$$

sendo P a potência instantânea, V a tensão em volts, e I a corrente elétrica em amperes. Já, para obtenção do consumo energético do protótipo, deve-se considerar o somatório da sua potência no tempo. Desta forma conclui-se que

$$C = \sum (P\Delta t) \quad (24)$$

onde C refere-se ao consumo, medido em watt-hora; P a potência instantânea aparente em watts, e Δt o intervalo de tempo em horas em que o sistema consome

este determinado valor de potência. Apesar de ser mais usual expressar o consumo elétrico de equipamentos utilizando o kilowatt-hora como unidade, optou-se pelo watt-hora em razão do baixo consumo observado no protótipo ser melhor representado nesta ordem de grandeza.

As equações (21), (22), (23) e (24) foram implementadas na rotina do microcontrolador responsável pela aquisição de dados. Cabe a ressalva de que em razão da amostragem de dados ser realizada em intervalos temporais da ordem de segundos, a variável tempo da Equação (24) teve de ser manipulada para atender a esta conversão de unidades.

4.3 DATALOGGER

Para a aquisição e armazenamento dos dados inerciais e de consumo de energia do protótipo, foi desenvolvido um circuito *datalogger*. Este circuito é composto por uma placa Arduino® UNO, a mesma placa responsável pela leitura dos sensores da IMU e medidores de potência desenvolvidos; um módulo de leitura e escrita de mídia microSD compatível com a plataforma Arduino®, uma chave seletora tipo alavanca de dois estágios, e um conjunto de 3 leds para indicação luminosa do estado de operação do sistema. O diagrama esquemático do *datalogger* desenvolvido é exibido na Figura 17.

No código desenvolvido para o *datalogger*, o microcontrolador tem por função configurar e inicializar os sensores da IMU e o leitor de cartão microSD no início da rotina. Durante o loop de operação, o código programado no Arduino® é responsável por verificar o estado da chave seletora e, caso esta esteja em posição gravação de dados, administrar as interrupções de leitura de dados da IMU, amperímetro, voltímetro e odometro; e salvar tais informações na mídia SD. O fluxograma da Figura 18 apresenta um resumo da rotina do microcontrolador.

Figura 17 – Eletrônica embarcada para instrumentação.

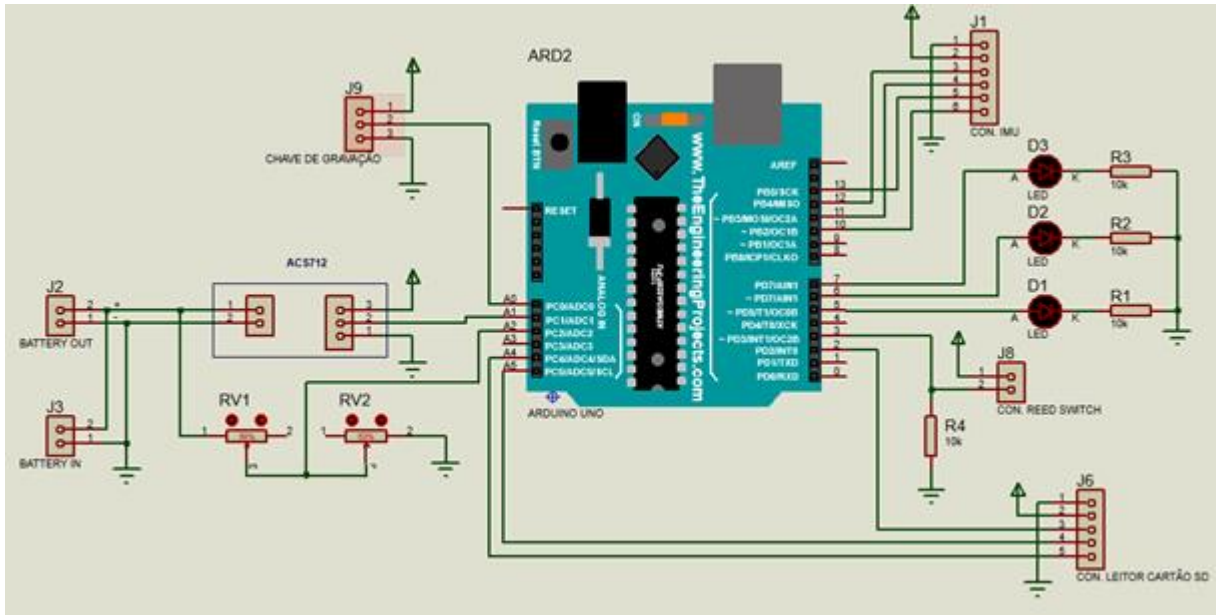
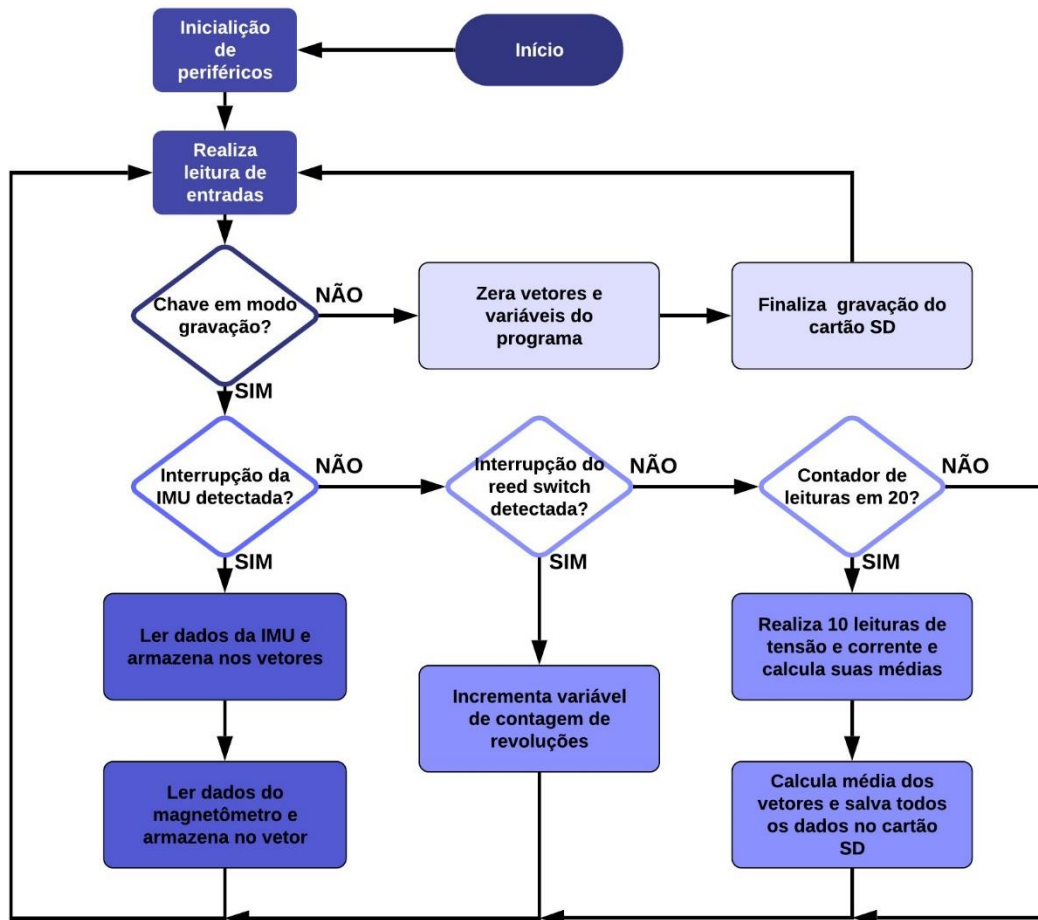


Figura 18 – Fluxograma do código desenvolvido.



A leitura dos dados da IMU é realizada a uma frequência de 20Hz. Os dados lidos são armazenados em 3 vetores de 20 posições, um vetor para cada rotação de interesse. A cada interrupção para leitura de dados inerciais, é incrementada uma unidade da variável inteira chamada *contagem_leituras*, que serve de índice de preenchimento dos vetores. Durante o período entre as interrupções, o microcontrolador monitora esta variável e, ao verificar que foram realizadas 20 leituras de dados inerciais, o microcontrolador realiza a média de todos os valores armazenados nos vetores, salva estes dados no cartão SD e reinicializa o valor da variável *contagem_leituras*. Como as leituras da IMU são realizadas a cada 20Hz e a média dos valores é calculada a cada 20 valores lidos, a gravação de dados no cartão SD é realizada a uma frequência de 1Hz.

A mesma função condicional que calcula as médias dos dados inerciais dos vetores de *roll*, *pitch* e *azimuth* também executa uma função de leitura dos dados de potência. A leitura dos dados de potência é realizada lendo 10 amostras do sensor de corrente e armazenando estes dados em um vetor de 10 posições. O mesmo é realizado para o circuito divisor resistivo de amostragem de tensão. Após a leitura dos sensores, é calculada a média dos valores armazenado em cada vetor, e este valor é inserido nas equações de calibração (21) e (22) de seus respectivos sensores. A partir destes valores, é calculada a potência e o consumo do protótipo elétrico seguindo as equações (23) e (24).

Este mesmo loop condicional de cálculo de média de todos os sensores executa a função de registro de dados no cartão SD. Os dados são armazenados em um arquivo SD no seguinte ordenamento: número sequencial de amostra, *azimuth*, *pitch*, *roll*, corrente, tensão, potência instantânea, consumo, número de rotações completas da roda de tração do protótipo e tempo acumulado de execução da rotina do microcontrolador desde a sua última reinicialização. Toda a análise de consumo do protótipo é realizada com base no pós-processamento e análise destes dados.

A utilização de eletrônica embarcada em uma aplicação sujeita a vibrações, como a aquisição de dados inerciais de um veículo em movimento, requer alguns cuidados e boas práticas na escolha dos componentes eletrônicos. Optou-se por fabricar uma placa de circuito impresso para que toda a eletrônica necessária pudesse

ser soldada a fim de minimizar desconexões por vibração, mesma razão para qual foi adotado o conector com trava externa tipo MIKE de 6 vias.

Foi escolhido utilizar uma chave seletora tipo alavanca de dois estágios por este componente apresentar uma boa resistência mecânica e não gerar interferências no seu sinal elétrico em função de vibração. Os leds escolhidos para a indicação do estado do sistema foram de encapsulamento 5mm furo-passante, alto brilho e de cores diferentes (vermelho para indicação de funcionamento, amarelo para atividade de leitura/gravação de dados, e verde para erro de inicialização de periféricos) a fim de garantir a visibilidade das indicações mesmo a alguns metros de distância e com o veículo em movimento. A Figura 19 mostra a disposição dos instrumentos desenvolvidos instalados ao protótipo.

Figura 19 – Instalação dos instrumentos no veículo.



5 ENSAIOS E RESULTADOS

5.1 VALIDAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Com a finalidade de testar o sistema de aquisição e registros de dados, bem como avaliar a resposta dos dados adquiridos da IMU em condições de movimentação, foram propostos ensaios dinâmicos com a IMU e o *datalogger* acoplados a uma bicicleta durante o percurso de dois trajetos pré-estabelecidos. Decidiu-se por validar a aquisição de dados inerciais em uma bicicleta por apresentar características mecânicas similares ao protótipo (ausência de suspensão e distância entre eixos) e pela praticidade de realizar os ensaios sem a necessidade de utilização da estrutura da equipe Bagual Racing ou da universidade.

O case dos sensores foi fixado ao quadro da bicicleta com a utilização de fita dupla-face e fita isolante. A eletrônica para aquisição e gravação de dados foi acomodada em uma caixa fixa ao guidão da bicicleta e o circuito foi alimentado através de um carregador de celular portátil, popularmente conhecido por *PowerBank*.

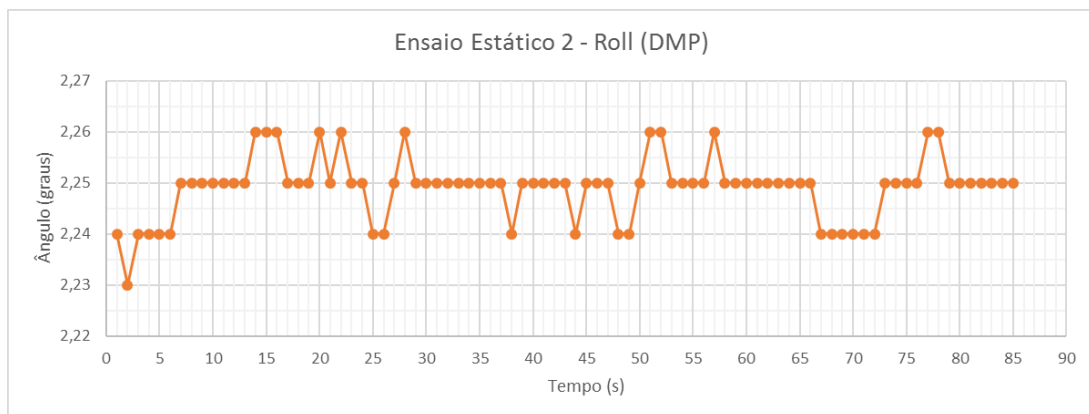
Os ensaios contaram também com uma câmera GoPro Hero 3 acoplada ao guidão da bicicleta. O registro de imagem teve como objetivo identificar ações eventuais do trânsito urbano que pudesse interferir nos dados adquiridos, como frenagem bruscas, desvio dos demais veículos ou até mesmo identificação de buracos na via. Os vídeos também foram utilizados para identificar o início e término da aquisição de dados válidos, desconsiderando dados adquiridos ao subir ou descer da bicicleta, e para a segmentação dos trajetos em trechos a fim de identificar características mais significativas do percurso total. A instalação dos equipamentos na bicicleta é exibida na Figura 20.

Para a caracterização do movimento da bicicleta em relação aos dados adquiridos, foram realizados ensaios estáticos, para mensurar os valores de offset dos referentes a desníveis na fixação dos sensores. Foram realizados três ensaios com duração aleatória onde a bicicleta foi escorada em uma parede em posição similar à postura de pilotagem a fim de registrar os valores de offset dos sensores nesta posição. Os dados de *roll* e *pitch* típicos obtidos neste ensaio podem ser vistos nas figuras 21 e 22, referentes ao segundo ensaio estático realizado.

Figura 20 – Instrumentação acoplada a bicicleta.



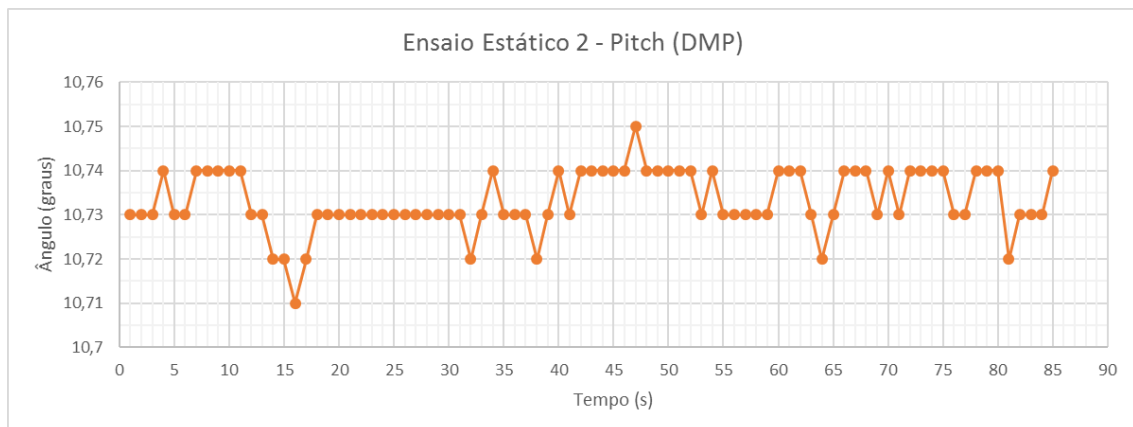
Figura 21 – Ensaio de offset para ângulo de *roll* na bicicleta.



Os ensaios de caracterização de valores de *offset* para *roll* e *pitch* indicaram leituras de $2,25^\circ$ e $10,73^\circ$ para cada uma das respectivas inclinações. Estes valores serão tomados como posições neutras para os demais ensaios dinâmicos. Não foram considerados os dados de *azimuth* nestes ensaios, pois inclinações frontais e laterais não nulas decorrentes do posicionamento da IMU não interferem na leitura de orientação realizada pelo magnetômetro.

Após a obtenção dos valores de *offset* dos dados inerciais, deu-se início aos testes de aquisição de dados dinâmicos da bicicleta. Foram propostos ensaios em dois percursos diferentes, onde um percurso valorizava os movimentos de inclinação lateral da bicicleta e sua orientação em relação ao norte geográfico da terra e o outro ensaio que dava ênfase à inclinação frontal com os desníveis do trajeto.

Figura 22 – Ensaio de offset para ângulo de *pitch* na bicicleta.

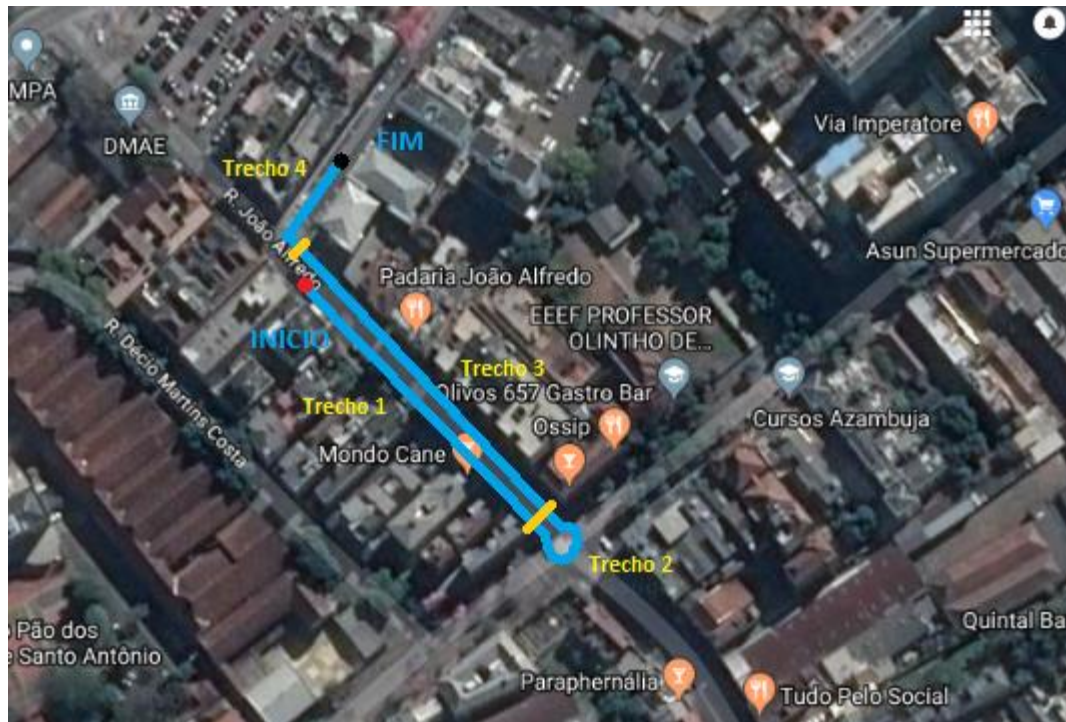


O primeiro trajeto realizado consiste em um percurso em um trecho da rua João Alfredo, de rua plana com uma rótula ao final da quadra por onde o usuário retornava em sentido contrário ao sentido de início e finalizava o trajeto dobrando a direita em uma rua lateral e pedalando durante mais alguns metros. O Trajeto 1 é exibido na Figura 23. O mapa do trajeto é dividido em quatro trechos e os pontos iniciais e finais são identificados pelos pontos vermelho e preto, respectivamente.

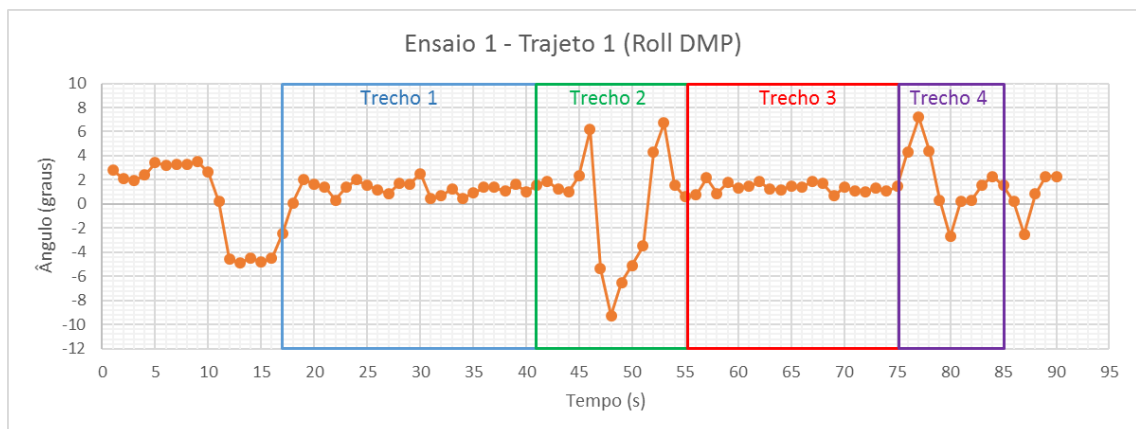
Neste trajeto também foram realizados três ensaios onde foram registrados os ângulos de *roll*, *pitch* e *azimuth* para todos os casos. Por tratar-se de um trajeto majoritariamente plano, a análise de dados se concentrará apenas nos ensaios de *roll* e *azimuth*, uma vez que o trajeto não apresenta características relevantes à análise de *pitch*. O resultado completo de um dos três ensaios realizados no Trajeto 1 pode ser visto no Apêndice A ao final deste relatório. A Figura 24 apresenta os dados de *roll* obtidos durante o Ensaio 1 do Trajeto 1.

Fazendo uso das imagens do ensaio, foi possível identificar o momento de início e fim de movimentação válida para a análise, bem como identificar os instantes de início e término de cada trecho do trajeto. Os dados anteriores ao tempo de 17 segundos se referem à movimentação de subir na bicicleta após o início da aquisição de dados, assim como os dados após o instante 85, referente a movimentação de descida na bicicleta e oscilações causadas pelos movimentos para desligar o sistema de aquisição.

Figura 23 – Mapa do trajeto 1.



Fonte: Google Maps.

Figura 24 – Dados de *roll* do ensaio 1 do trajeto 1.

Essa característica de dados excedentes ao período de interesse está presente em todos os ensaios e decidiu-se por mantê-los nos gráficos com o objetivo de facilitar a relação entre dados e vídeo dos ensaios.

Atentando aos valores exibidos na Figura 24, nota-se que durante os trechos 1 e 3, onde o condutor executava uma trajetória retilínea, observa-se uma inclinação próxima ao valor de 2° , valor este muito próximo aos $2,25^\circ$ observados como posição

de offset de instalação da IMU. Esta característica indica a semelhança entre os ensaios realizados.

Antes de aprofundar a análise das inclinações de *roll*, é necessário que se introduza dois conceitos de técnicas de pilotagem de motocicletas ao leitor:

- 1) Curvas por esterço, utilizado para realizar curvar em baixa velocidade. Pode-se citar como exemplo de curvas por esterço, o ato de girar o guidão para a direita a fim de realizar uma curva devagar para a direita.
- 2) Curvas por contra-esterço, técnica necessária para realização de curvas de alta velocidade. O conceito de contra-esterço é complexo e pode ser melhor explicado através do seguinte exemplo: suponha que um piloto que conduz uma motocicleta em alta velocidade deseje realizar uma curva para a sua esquerda. Ao alterar levemente a direção da roda dianteira para a direita, o desalinhamento das rodas em movimento somado ao efeito giroscópico (tendência de um corpo em rotação manter sua orientação) atuante sobre cada uma das rodas gera uma força de reação que tende a tombar a motocicleta para a esquerda (sentido contrário ao esterço da roda dianteira). Essa tendência de inclinação da motocicleta para a esquerda permite então que o condutor inicie a curva desejada (para a esquerda) apenas retomando o alinhamento do guidão com a motocicleta inclinada. A Figura 25 traz o registro do movimento de contra-esterço, onde o piloto inclina o veículo para esquerda ao esterçar o guidão para direita. O contra-esterço é resultado natural de uma reação mecânica em decorrência do efeito giroscópico que atua sobre um veículo de duas rodas em alta velocidade. Este movimento é realizado intrinsecamente por todo o condutor de motocicletas/bicicletas para que possa realizar curvas estáveis em alta velocidade.

Avaliando os dados registrados para o Trecho 2, observa-se a característica de curva por contra-esterço evidenciada pela instrumentação dos ensaios. Esta característica se manifesta no pico de inclinação nas proximidades do instante 46. Desejando realizar uma curva para a esquerda, o condutor realiza o movimento de contra-esterço efetuando uma pequena inclinação da bicicleta para a direita no instante 46, resultando em uma grande inclinação para a esquerda na entrada da

curva utilizada para alterar a trajetória realizada. A realização de uma curva de baixa velocidade por esterço também pode ser observada no Trajeto 1. Este caso é observado no instante 75 segundos, na curva que marca o início do Trecho 4.

Figura 25 – Movimento de contra-esterço no início de curva.

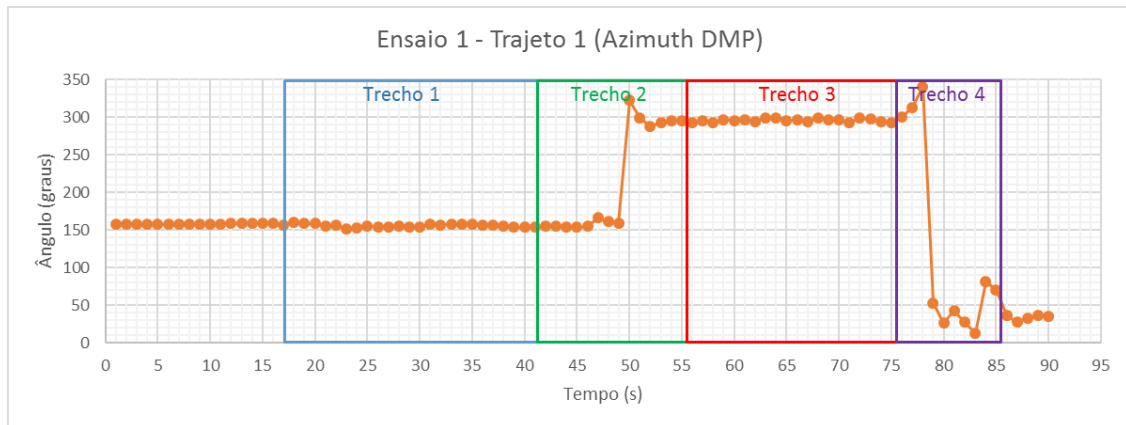


Fonte: <http://www.serrotemotoclube.com.br/dicas-de-pilotagem-curvas/>

Realizadas as considerações das inclinações laterais do Trajeto 1, volta-se as atenções para o registro dos dados de orientação, exemplificados na Figura 26. Nesta figura nota-se uma coerência nos dados de *azimuth*, uma vez que indicam com clareza o início do ensaio em uma orientação de aproximadamente 150° , uma decrescente durante o contorno da rótula no final da quadra, e um retorno com uma orientação de próxima de 320° , indicando uma diferença de 180° em relação a orientação inicial do percurso.

Por fim, os dados de *azimuth* ainda indicam uma curva para a direita com o incremento das leituras do ângulo em questão, e registram a orientação final da bicicleta no encerramento do ensaio.

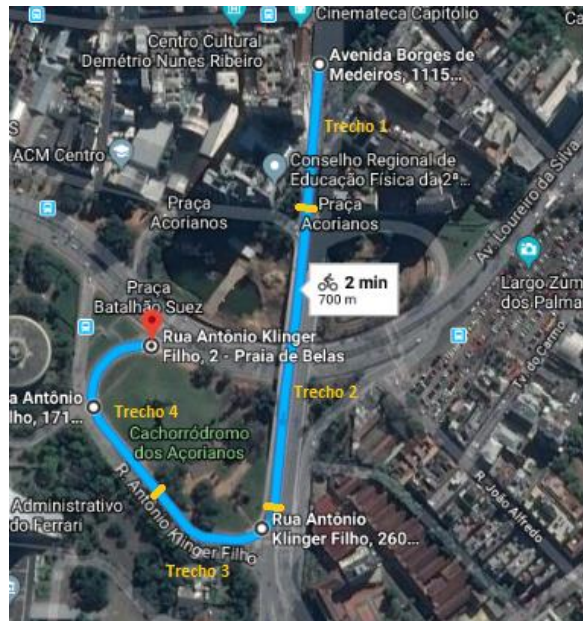
Figura 26 – Dados de *azimuth* do ensaio 1 do trajeto 1.



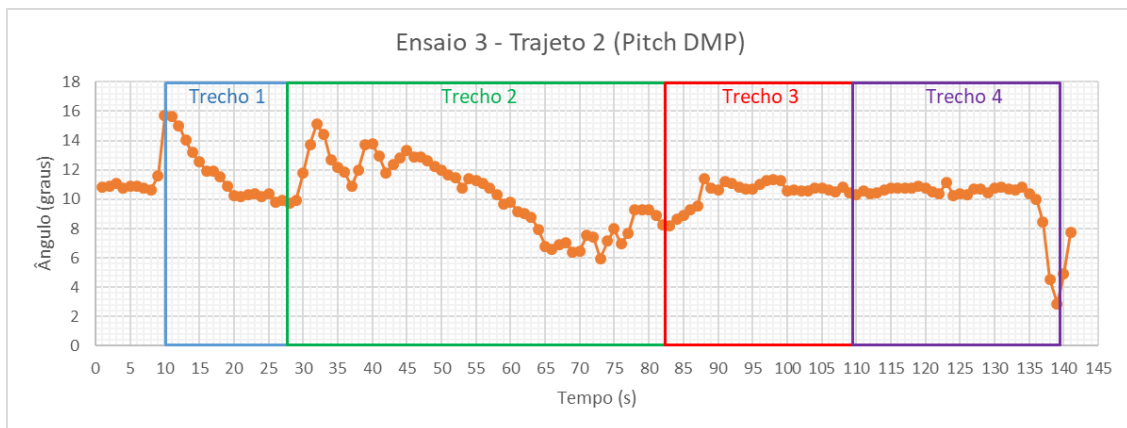
Os dados obtidos nos ensaios do Trajeto 1 validaram o sistema de aquisição de dados implementados no circuito *data logger* bem como a qualidade dos dados de inclinação lateral e orientação da IMU desenvolvida. A fim de verificar a qualidade dos dados de inclinação frontal, foi proposta a realização de ensaios complementares em um outro trajeto que valorizasse estas inclinações. A Figura 27 exibe o segundo trajeto proposto. O trajeto é dividido em quatro trechos e os pontos iniciais e finais são identificados pelos pontos branco e pelo marcador em cor vermelha, respectivamente. A escolha deste percurso escolhido teve como propósito de transpor um desnível da pista ocasionado pela subida e descida de um viaduto da rua Borges de Medeiros. Os dados inerciais mais relevantes a este ensaio foram *pitch* e *azimuth*. Por apresentar um trajeto rápido em função do trânsito local, longas retas e curvas suaves, o trajeto dois não apresentou características relevantes a análise dos dados de *roll*. Os dados adquiridos no terceiro ensaio realizado no Trajeto 2 podem ser vistos integralmente no Apêndice B.

A Figura 28 traz o gráfico dos dados de inclinações frontais obtidos no terceiro ensaio do Trajeto 2, dentre os cinco realizados.

Figura 27 – Mapa do trajeto 2.



Fonte: Google Maps.

Figura 28 – Dados de *pitch* do ensaio 3 do trajeto 2.

A partir dos dados de *pitch* do ensaio realizado no Trajeto 2, juntamente com a análise de vídeo do ensaio realizado, é possível efetuar algumas conclusões pertinentes a respeito do trajeto e da instrumentação embarcada. No início da aquisição de dados ainda antes do início da movimentação válida para o ensaio, antes do instante 10 segundos, observa-se uma proximidade entre os dados obtidos no ensaio de offset ($10,73^\circ$) e do sistema e a inclinação frontal da bicicleta parada, de aproximadamente 11° .

No instante inicial da condução, aproximadamente 10s, observa-se uma descontinuidade nos dados obtidos, seguidos de uma acomodação gradual dos dados

para um valor médio próximo de 10° antes do início do Trecho 2, no intervalo de tempo compreendido entre 20 e 27 segundos. Com a acomodação dos dados, é possível verificar a inclinação neutra esperada para o Trecho 1 condiz com os dados adquiridos antes do início da movimentação do conjunto. A descontinuidade inicial dos dados pode ser explicada pela variação abrupta do estado de repouso do sistema para a condição de vibração da bicicleta em movimento, o que ocasiona leituras com valor considerável de erro. Já a acomodação gradual dos dados é resultado da atuação do filtro implementado no processador DMP da IMU. O filtro tende a suavizar variações abruptas de leitura, porém, com um certo atraso até que os dados voltem a condizer com a inclinação atual da pista. Descontinuidade nos valores iniciais de leitura de sensores de inercial em aplicações dinâmicas são esperadas em situações onde o objeto de interesse é retirado do estado de repouso.

O Trecho 2 do segundo trajeto apresenta os dados mais significativos para a análise de *pitch* do ensaio. O intervalo compreendido entre o tempo 28 e 45 segundos refere-se à subida do primeiro quarto do viaduto. O incremento no valor médio dos dados de inclinação neste trecho comprova a elevação da inclinação do terreno. Cabe também ressaltar a ocorrência de duas variações abruptas nos dados nas proximidades de 30 e 37 segundos. Estas variações são justificadas pela ocorrência de duas falhas no asfalto, uma no início e outra no final da primeira placa que compõem o viaduto, que geram grande choque mecânico nos sensores inerciais. A tendência de acomodação dos dados após estes reflete a novamente a atuação dos filtros da IMU.

No trecho entre os instantes 45 e 70 pode-se notar um decaimento praticamente linear da inclinação da bicicleta. Este comportamento reflete transição gradual do ponto de maior inclinação do viaduto (início do segundo quarto de extensão total), passando pelo seu ápice com a inclinação neutra como o esperado para esse ponto (meio do viaduto representado pelos dados próximos do tempo 57 segundos) e chegando ao ponto de maior declive da via no trecho (meio caminho da descida do viaduto, no início do terceiro quarto da sua extensão total), próximo ao instante 70. Os dados após ao instante 70, ainda no Trecho 2, possuem uma maior variação em relação aos demais segmentos deste trecho por conta da bicicleta maior vibração da bicicleta com o aumento da velocidade durante o trecho de declive.

Os dados compreendidos pelo Trecho 3 representam a descida do quarto e último segmento do viaduto, onde a bicicleta volta a ser conduzida em um trecho de inclinação neutra, como exibido na tendência dos dados deste trecho bem como do Trecho 4.

As curvas realizadas após a descida do viaduto, nos trechos 3 e 4, são realizadas em planos de inclinação nula, não gerando variações na leitura de *pitch*. A perturbação seguinte destes dados é observada ao final do ensaio, sob a condição de frenagem da bicicleta, o que gera um deslocamento do centro de gravidade do conjunto refletido no declive suave da bicicleta até que sua movimentação cesse por completo.

Os ensaios do Trajeto 2 validam o sistema de aquisição de dados e a precisão da leitura dos dados da IMU para a variável de inclinação frontal requerida para o projeto. Apesar de variações abruptas em razão dos buracos da pista causarem uma discrepância visualmente significativa em relação aos demais dados, cabe ressaltar que as magnitudes destas inconsistências não ultrapassaram 6° de aclive e 8° de declive em relação a posição neutra de condução de 10,73°, valores estes considerados toleráveis para a aplicação.

Os ensaios de validação do *datalogger* e da IMU mostraram que a instrumentação desenvolvida para o protótipo apresenta a precisão necessária para ser utilizada como parâmetro de análise do consumo de energia do veículo elétrico alvo deste trabalho. Verificada a confiabilidade do sistema desenvolvido deu-se início aos estudos utilizando a instrumentação instalada no veículo.

5.2 ANÁLISE DE CONSUMO DO VEÍCULO EM DIFERENTES TRAÇADOS

Para adquirir dados do consumo e pose do protótipo em diferentes estratégias de pilotagem, ou seja, condições similares às encontradas durante a prova, foram realizados ensaios em um circuito fechado delimitado na área de um estacionamento. Estes ensaios tiveram por objetivo analisar a diferença de alguns parâmetros relacionados ao consumo do protótipo em função de sua condução, a fim de que se conheça as técnicas de dirigibilidade que impactam na eficiência do protótipo. O local escolhido para os ensaios foi o estacionamento do Colégio de Aplicação da UFRGS, no campus do vale, grifado na Figura 29. Este espaço foi escolhido por questões de

segurança de trânsito, privacidade e versatilidade para compor diferentes trajetos de ensaio.

Figura 29 – Local dos ensaios.



Fonte: Google Maps.

A área do estacionamento foi mapeada e desenhada, com escala em metros, para a elaboração dos diferentes trajetos de ensaio. A Figura 30 ilustra a planta do estacionamento, com régua para comparação de dimensões e com a nomenclatura adotada para cada trecho do espaço disponível.

Dois circuitos foram compostos na área do estacionamento. O primeiro circuito é exibido na Figura 31. O trajeto foi composto, nesta ordem, pelo trecho acesso lateral oeste do estacionamento, pela sua via interna, pelo acesso leste, sendo concluído por um trecho da rua do Colégio de Aplicação.

Figura 30 – Planta do estacionamento.

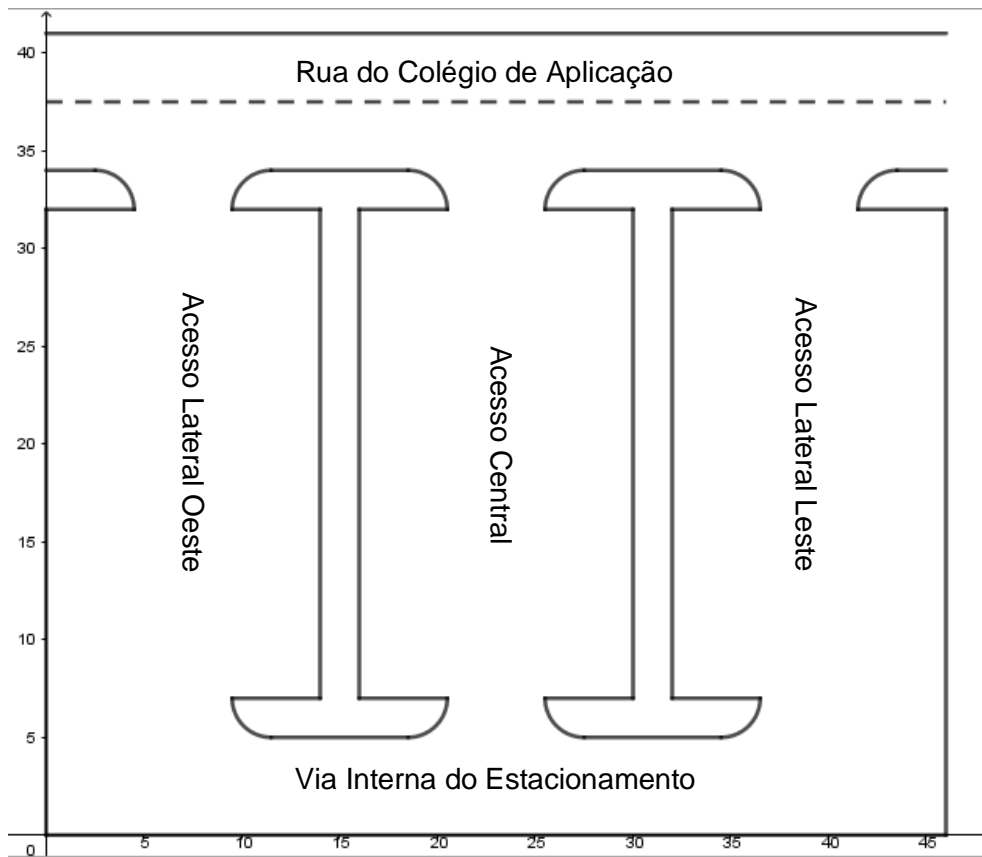
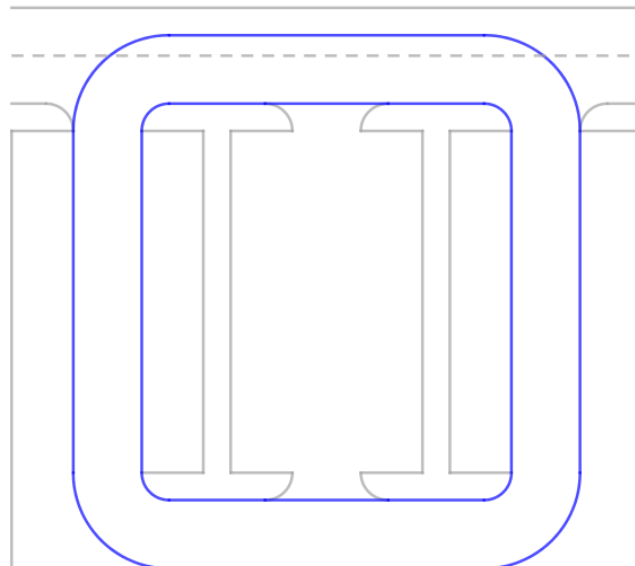


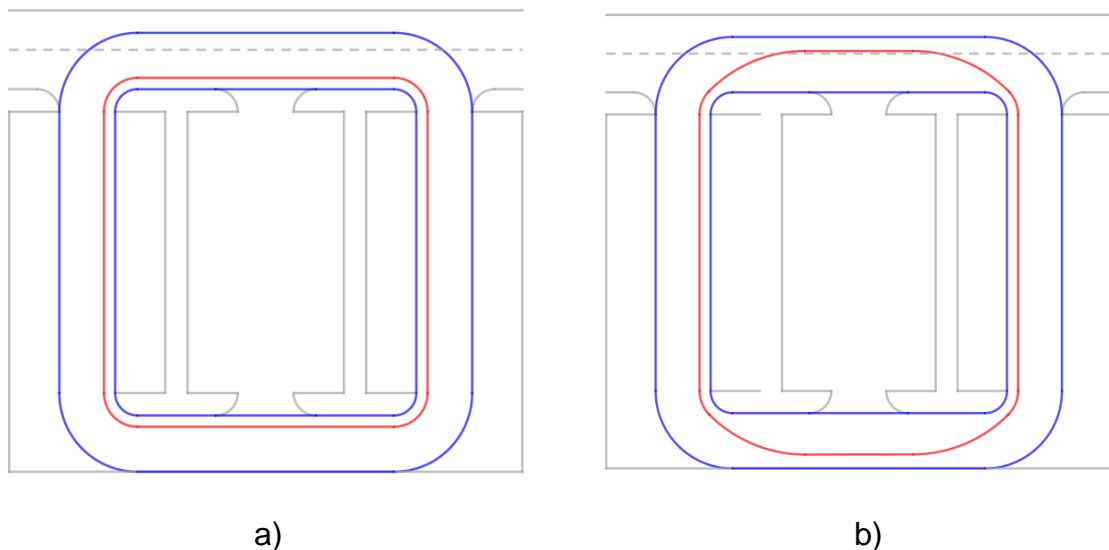
Figura 31 – Trajeto 1.



Para o Circuito 1, foram definidos dois traçados de pilotagem para serem seguidos pelo condutor do veículo durante a aquisição de dados dos ensaios. O primeiro traçado foi denominado “traçado de distância mínima”, exibido na Figura 32-a, por apresentar a rota que minimiza a distância para percorrer o circuito. Já, o segundo

traçado de pilotagem adotado, exibido na Figura 32-b, foi nomeado “traçado de maior raio” por transpor as curvas com o maior raio possível, respeitando as dimensões da pista.

Figura 32 – a) Traçado de distância mínima no circuito 1. b) Traçado de raio máximo do circuito 1.



Ambos os traçados foram gerados levando em conta as dimensões do Circuito 1, bem como as dimensões do protótipo. As linhas que exemplificam o traçado se referem aos infinitesimais pontos ocupados pelo centro geométrico do veículo, respeitando a sua largura e as dimensões da pista.

Cada traçado foi ensaiado em duas estratégias diferentes de pilotagem: uma mantendo velocidade constante baixa, e outra mantendo uma velocidade constante alta durante todo o ensaio. Cada estratégia de pilotagem foi ensaiada três vezes, totalizando 12 ensaios no circuito 1. Em todos os testes, buscou-se respeitar a constância na velocidade do veículo definida para cada tentativa, havendo apenas redução de velocidade por dissipação de energia nas curvas.

Cada ensaio foi composto por três voltas no circuito e, durante essas voltas, foram adquiridos os dados de *roll*, *pitch* e *azimuth*. Complementares aos dados inerciais dos ensaios, foram registrados os dados de corrente e tensão da bateria e a distância percorrida em cada ensaio. Os dados de corrente elétrica e tensão foram manipulados a fim de obter a potência elétrica instantânea consumida pelo veículo, bem como a

totalização do consumo de energia elétrica durante o ensaio. As informações de distância percorrida também foram computadas através da contabilização do número de voltas dada pela roda do motor, levando em consideração o seu perímetro de 1550mm. Independentemente da instrumentação desenvolvida para o projeto, foi utilizada uma câmera acoplada ao chassi, acima da cabeça do piloto, para identificação de manobras que possam gerar impacto nos dados.

O quadro exibido pela Figura 33 traz um resumo dos dados obtidos nestes ensaios, onde foram grifados em cor verde os melhores valores para cada parâmetro. Os dados se mostram consistentes ao observar-se que os melhores resultados para cada parâmetro foram obtidos para a mesma estratégia de pilotagem e em valores de mesma ordem de grandeza.

O Apêndice C exemplifica os dados obtidos nos ensaios de velocidade alta enquanto o Apêndice D exemplifica as medidas realizadas nos ensaios de baixa velocidade, ambos no traçado de distância mínima.

Figura 33 – Ensaio de distância mínima no circuito 1.

Traçado	Estratégia	Ensaio	Voltas	Consumo (Wh)	Distância Percorrida (m)	Duração (s)	Velocidade Média (m/s)	Consumo/ Distância (Wh/m)	Consumo/ Tempo (Wh/s)	Consumo/ Velocidade (Whs/m)
Distância Mínima	Velocidade Alta	1	3	2,67	354,95	96	3,69740	0,00752	0,02781	0,72213
		2	3	2,75	350,3	98	3,57449	0,00785	0,02806	0,76934
		3	3	2,78	351,85	97	3,62732	0,00790	0,02866	0,76641
	Velocidade Baixa	1	3	1,93	345,65	230	1,50283	0,00558	0,00839	1,28425
		2	3	1,86	344,1	257	1,33891	0,00541	0,00724	1,38919
		3	3	1,87	344,1	257	1,33891	0,00543	0,00728	1,39666

Na análise dos dados trazidos na Figura 33, percebe-se o impacto da velocidade média adotada no ensaio sobre o consumo energético do protótipo. Os ensaios de velocidade baixa apresentaram os menores consumos dentre todos os ensaios, sendo em média 31% menor que o consumo de energia médio obtido em ensaios de velocidade alta. Esta característica é esperada, uma vez que se requer mais energia para acelerar um corpo até uma maior velocidade.

A partir desta taxa de redução de consumo energético, é possível afirmar que o motor utilizado no protótipo elétrico não apresenta a mesma eficiência para todas as velocidades de operação. Esta conclusão se dá ao notar que 31% de redução no consumo médio entre os ensaios de velocidade baixa em relação aos ensaios de

velocidade alta não condiz com a taxa de 39% de redução na duração média dos ensaios de velocidade alta quando relacionados com a duração média dos ensaios de velocidade baixa. Se a eficiência do veículo fosse constante, estas duas taxas seriam iguais.

Atentando aos parâmetros de consumo em relação à distância percorrida e à duração do ensaio, observa-se as relações esperadas de melhor consumo por distância nos ensaios de menor velocidade, uma vez que a distância percorrida se mantém a mesma para o mesmo traçado. A mesma tendência é verificada no parâmetro de consumo por tempo, que apresenta os melhores valores para os ensaios de maior duração.

Aprofundando a análise dos dados de consumo em relação à velocidade média imprimida no ensaio, nota-se outra particularidade do veículo: o consumo não é proporcional à sua velocidade, uma vez que a redução de 61% da velocidade média dos ensaios apresentou uma redução de 31% do consumo.

Após os ensaios de distância mínima, foram realizados também seis ensaios adotando o traçado de maior raio. As estratégias de pilotagem em relação à velocidade foram as mesmas, com 3 ensaios em velocidade alta e 3 em velocidade baixa.

Antes das considerações a respeito dos dados de consumo dos ensaios seguindo o traçado de raio máximo, é interessante analisar as diferenças dos dados inerciais típicos adquiridos para estes dois traçados. Os dados típicos adquiridos nos ensaios de traçado de raio máximo são exemplificados por dois testes disponíveis nos apêndices E e F, para um ensaio de velocidade alta e de velocidade baixa, respectivamente. A maior diferença entre os dois traçados é percebida pela disposição dos dados de *azimuth* adquiridos. Para exemplificar essas diferenças, foram utilizados os dados dos ensaios nº 3 para o traçado de distância mínima, e o ensaio nº2 para o traçado de raio máximo, ambos executados em alta velocidade.

As figuras 34 e 35 evidenciam a característica particular de transposição de curvas que difere os dois traçados de pista. Na Figura 34 pode-se observar quatro variações abruptas de orientação do protótipo, seguidas de trechos de orientação espacial constante. Estas variações referem-se às curvas acentuadas do traçado de distância

mínima, seguidas dos trechos paralelos à borda interna do circuito representados pelos segmentos constantes dos dados.

Figura 34 – *Azimuth* no ensaio 3 de traçado de distância mínima.

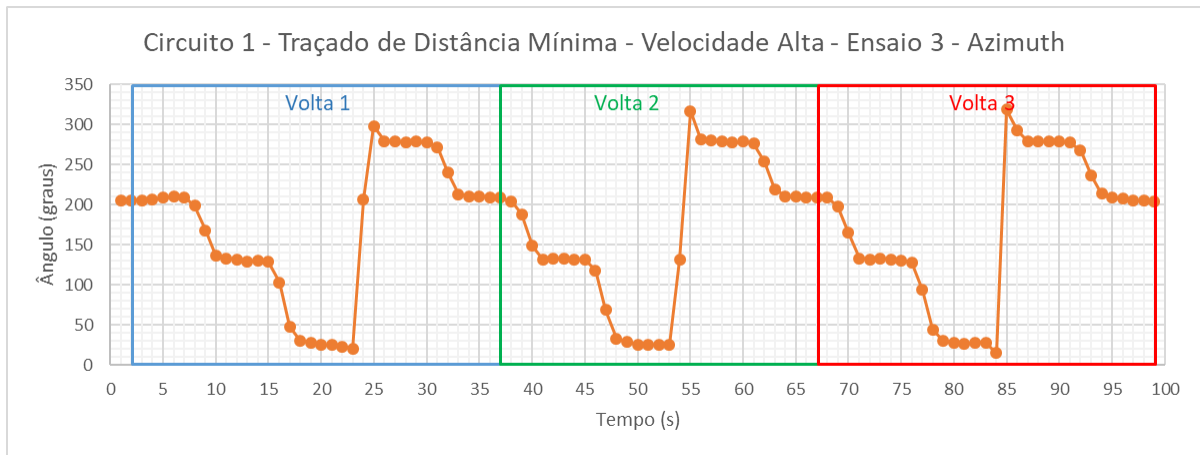
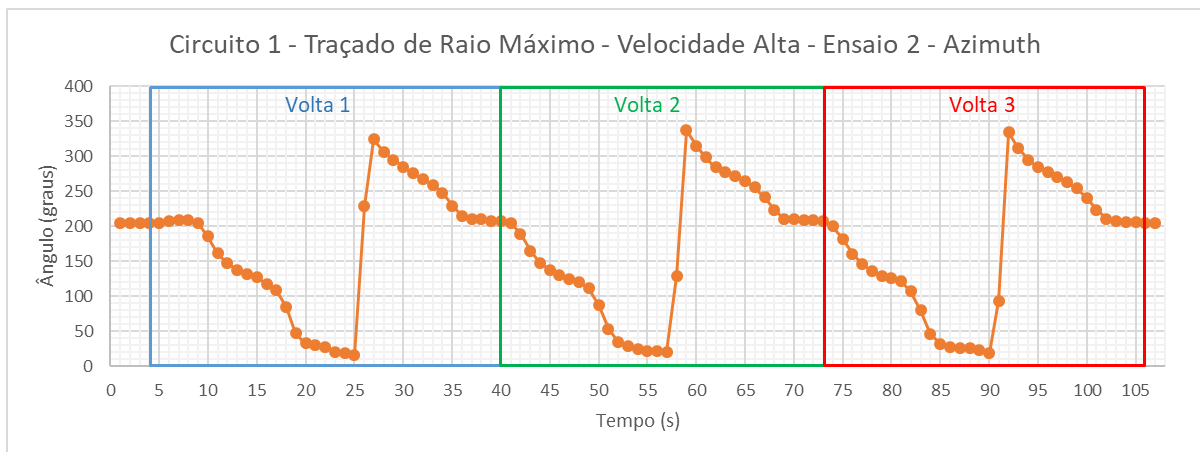


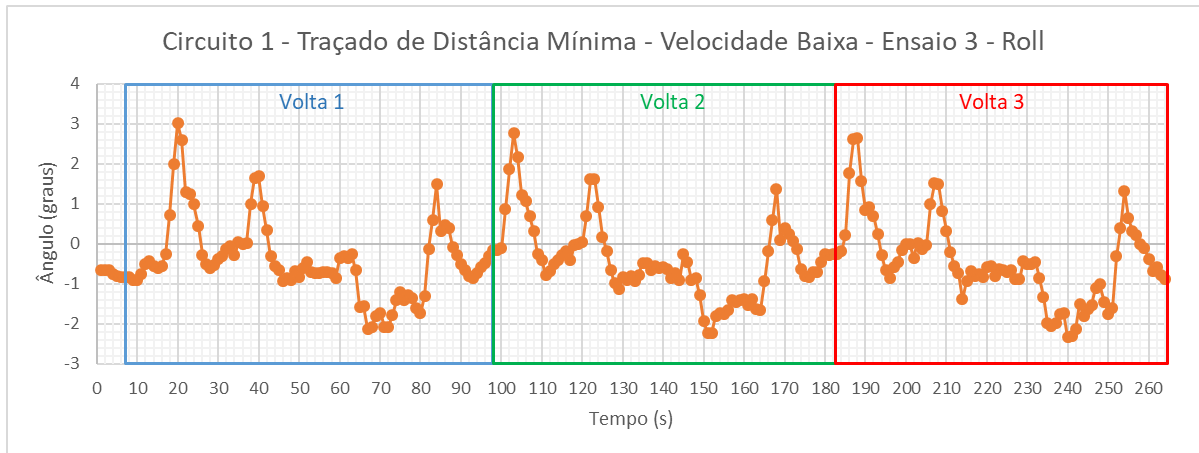
Figura 35 – *Azimuth* para ensaio 2 de traçado de raio máximo.



Analisando os dados da Figura 35, pode-se notar variações mais sutis de direção e trechos de orientação praticamente constante apenas nas proximidades dos instantes 5, 22, 40, 53, 72, 87, e 103 referentes às retas dos acesso leste e oeste comuns aos dois traçados. Esses dados evidenciam a forte característica de suavização de curvas do traçado de raio máximo. Neste traçado, as curvas tendem a ser sutis, de longa duração e pouco espaçadas.

A análise dos dados de *azimuth* traz a principal diferença nos dados inerciais destes dois traçados, porém, os demais dados inerciais também apresentam características interessantes de cada traçado de pista. Nas figuras 36 e 37 podem ser vistos os dados inerciais de rotação lateral do veículo durante o trajeto proposto para o Circuito 1.

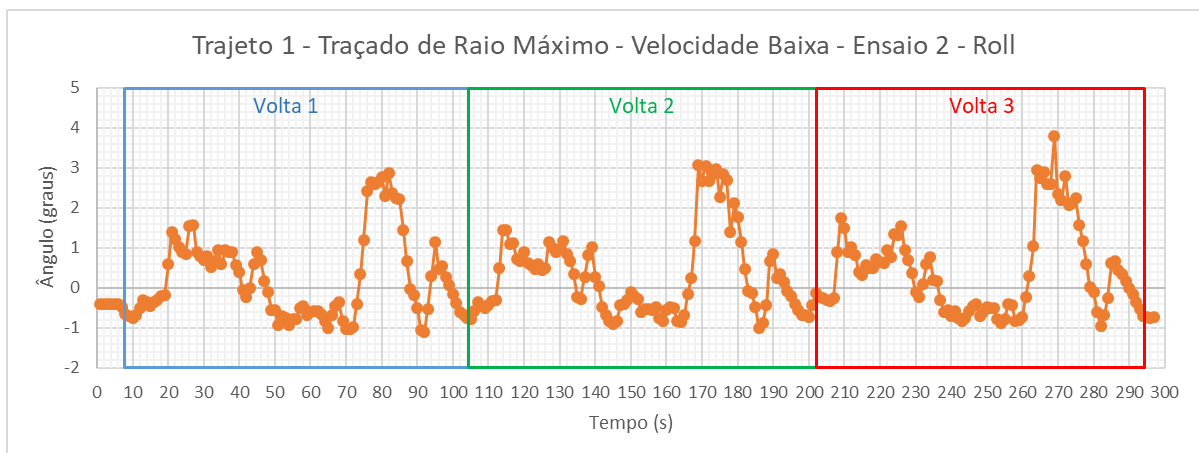
Figura 36 – Característica de *roll* no traçado de distância mínima.



Nos dados apresentados na Figura 36, cabe ressaltar a magnitude semelhante dos picos de inclinação registrados em função das curvas abruptas do traçado de distância mínima. Estes picos de inclinação são de baixa magnitude (em média 2°), mas apresentam distúrbios significativos na leitura da inclinação usual do terreno.

Os ensaios realizados seguindo o traçado de raio máximo, aqui exemplificados pela Figura 37, apresentaram um comportamento similar entre cada uma de suas voltas, além de apresentar variações muito menores entre leituras próximas, o que revela a maior fidelidade ao relevelo da pista e uma menor influência de torções causadas por esforços na estrutura do veículo.

Figura 37 – Característica de *roll* no traçado de raio máximo.



O confronto dos dados adquiridos perante os registros de vídeo coletados durante todos os ensaios foi crucial para a compreensão de que os picos registrados nas inclinações laterais eram causados pelas curvas bruscas e não por variações no

terreno, uma vez que com o aumento da velocidade média dos ensaios intensificaram os picos de inclinação e que a passagem do veículo no mesmo sem que fosse realizada qualquer curva não apresentava picos de inclinação do registro de dados. Esta conclusão condiz com as deformações esperadas sobre as estruturas do pneu e chassi nessas condições de conversão de direção e são pouco perceptíveis até mesmo para o piloto durante a condução. Foram escolhidos dois ensaios de velocidade baixa justamente para exemplificar que mesmo nesta condição as curvas abruptas interferem na análise dinâmica do veículo.

Também se percebe a influência do desnível da rua de acesso ao Colégio de Aplicação nos dados observados na traçado de raio máximo da Figura 37, exemplificados nos tempos de 72 a 92, de 165 a 186, e de 260 a 281.

As conclusões obtidas da análise dos dados de *pitch* reafirmam as conclusões obtidas a partir dos dados de *roll*. As curvas abruptas do traçado de menor distância geram reações mecânicas perceptíveis na leitura dos dados destes ensaios. Além disso, há guinadas perceptíveis do veículo na arrancada, registradas nos dados iniciais das voltas 1, e na frenagem ao fim dos ensaios, refletida nas últimas leituras das voltas 3. Estas reações mecânicas sobre a estrutura são esperadas e inclinações mínimas como estas ocorrem principalmente por deformação dos pneus em razão das forças de reação geradas na estrutura do veículo, opostas as forças geradas pelo motor nas arrancadas e pelos freios nas paradas.

Voltando à análise para dados de consumo do protótipo no traçado de raio maior, considera-se o quadro comparativo exibido na Figura 38.

Figura 38 – Ensaios de raio máximo no circuito 1.

Traçado	Estratégia	Ensaio	Voltas	Consumo (Wh)	Distância Percorrida (m)	Duração (s)	Velocidade Média (m/s)	Consumo/ Distância (Wh/m)	Consumo/ Tempo (Wh/s)	Consumo/ Velocidade (Whs/m)
Raio Máximo	Velocidade Alta	1	3	3	372	100	3,72000	0,00806	0,03000	0,80645
		2	3	2,96	367,35	102	3,60147	0,00806	0,02902	0,82189
		3	3	2,79	367,35	101	3,63713	0,00759	0,02762	0,76709
	Velocidade Baixa	1	3	2,36	367,35	237	1,55000	0,00642	0,00996	1,52258
		2	3	2,25	375,1	288	1,30243	0,00600	0,00781	1,72754
		3	3	2,03	362,7	278	1,30468	0,00560	0,00730	1,55594

Cabem, a primeira análise dos dados da Figura 38, salientar que estes dados condizem com os dados obtidos para o traçado de distância mínima do mesmo

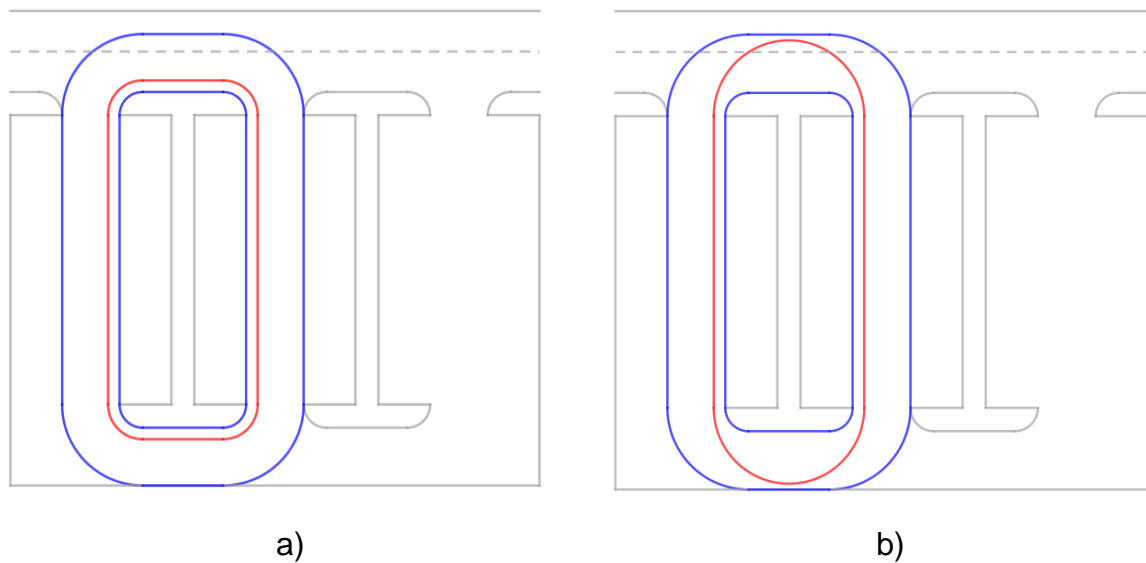
Circuito 1 analisado. As melhores marcas de consumo, consumo/distância, consumo/tempo, e consumo/velocidade foram obtidas nos ensaios de mesma velocidade média adotada, respectivamente.

As considerações entre os ensaios de velocidade alta em relação aos ensaios de velocidade baixa para o traçado de raio máximo se mantêm as mesmas levantadas para os ensaios do traçado de distância mínima, porém cabe a ressalva de que as taxas de proporcionalidade entre os parâmetros não se mantiveram a mesmas. A velocidade baixa média de 1,38 m/s nesse traçado apresentou um valor referente a 37% em relação a velocidade alta média de 3,65 m/s apresentada nos ensaios. Esta proporcionalidade entre as velocidades médias dos ensaios é condizente com a proporcionalidade das velocidades médias executadas nos ensaios de traçado de distância mínima (de 39%), porém, o consumo do protótipo não manteve essa mesma relação.

Ao analisar a proporção entre o consumo médio do traçado de raio máximo, observa-se que o valor de 2,21 Wh consumidos, em média, nas tentativas de baixa velocidade se refere a 76% do valor médio de 2,91 Wh consumidos nos testes em alta velocidade. Esta taxa de consumo representa uma proporção pior em relação aos 68% (1,88 Wh em média para velocidade baixa frente aos 2,73Wh em média para velocidade alta) registrados para estas mesmas duas estratégias de controle de velocidade quando aplicadas ao traçado de distância mínima. Este resultado pior na taxa de proporção de consumo pode indicar uma tendência de que a distância percorrida em cada traçado apresenta uma maior significância para o consumo do veículo do que a dissipação de energia no traçado de curvas.

Essa observação instigou a proposta de um segundo circuito para a aquisição de dados, onde as curvas representassem um percentual mais significativo do circuito. Os traçados de pista propostos para o Circuito 2 são exibidos pelas imagens da Figura 39.

Figura 39 – a) Traçado de distância mínima no circuito 2. b) Traçado de raio máximo do circuito 2.



Novamente, os ensaios foram realizados em duas condições de velocidades constantes para cada traçado, sendo uma de média alta e outra velocidade média baixa. Para cada condição de velocidade foram realizados 3 testes, totalizando 12 ensaios instrumentados do circuito 2. A Figura 40 condensa as informações de consumo obtidas nestes testes. Os dados grifados em cor verde referem-se aos três melhores resultados de cada parâmetro dentro todas os ensaios realizados. Os dados típicos adquiridos no Circuito 2 são exibidos no Apêndice G até o Apêndice J.

Figura 40 – Dados dos ensaios no circuito 2.

Traçado	Estratégia	Ensaio	Volts	Consumo (Wh)	Distância Percorrida (m)	Duração (s)	Velocidade Média (m/s)	Consumo/ Distância (Wh/m)	Consumo/ Tempo (Wh/s)	Consumo/ Velocidade (Whs/m)
Distância Mínima	Velocidade Alta	1	3	2,27	252,65	73	3,46096	0,00898	0,03110	0,65589
		2	3	2,33	251,1	71	3,53662	0,00928	0,03282	0,65882
		3	3	2,41	251,1	72	3,48750	0,00960	0,03347	0,69104
	Velocidade Baixa	1	3	1,62	252,65	138	1,83080	0,00641	0,01174	0,88486
		2	3	1,58	249,55	162	1,54043	0,00633	0,00975	1,02569
		3	3	1,62	246,45	159	1,55000	0,00657	0,01019	1,04516
Raio Máximo	Velocidade Alta	1	3	2,34	272,8	77	3,54286	0,00858	0,03039	0,66048
		2	3	2,36	272,8	78	3,49744	0,00865	0,03026	0,67478
		3	3	2,34	272,8	78	3,49744	0,00858	0,03000	0,66906
	Velocidade Baixa	1	3	1,77	272,8	213	1,28075	0,00649	0,00831	1,38200
		2	3	1,69	271,25	174	1,55891	0,00623	0,00971	1,08409
		3	3	1,93	269,7	213	1,26620	0,00716	0,00906	1,52425

Em um primeiro instante, pode-se atentar que os menores consumos do quadro exibido pela Figura 40 foram obtidos, novamente, nos ensaios seguindo o traçado de distância mínima, porém, por uma diferença muito pequena em relação aos ensaios

seguindo o traçado de raio máximo. Comparando somente os dados de alta velocidade, todos os testes do traçado de raio máximo obtiveram um menor consumo em relação ao ensaio 3 do traçado de distância mínima.

A distância percorrida no traçado de raio máximo foi, em média, 8,48% maior do que no traçado de distância mínima (250,58m do traçado de distância mínima frente aos 271,85m do traçado de raio máximo), porém a diferença média de consumo apresentou um acréscimo de apenas 0,04%, quando comparados os dados de velocidade alta em ambos os traçados (2,34Wh no traçado de distância mínima comparados a 2,35Wh do traçado de raio máximo). Foram comparados os dados obtidos em alta velocidade porque estes apresentaram as velocidades médias mais próximas entre os dois traçados, o que minimiza o impacto da velocidade média sobre o consumo. Esta constatação evidencia que o traçado de raio máximo pode ser mais eficiente do que o traçado de distância mínima, dependendo das condições das curvas do circuito e da proporcionalidade dos trechos curvos em relação às retas.

Observando os dados de velocidade média e relacionando com os respectivos consumos, nota-se que os ensaios com menor velocidade média apresentaram, em todos os ensaios, os menores dados de consumo. Porém, pela análise individual dos ensaios percebe-se que essa observação não é válida para todas as faixas de velocidade média. Esta observação evidencia a necessidade de apurar as curvas de eficiência em função da velocidade do motor utilizado.

Observando os demais parâmetros levantados nos ensaios do Circuito 2 é perceptível a influência do traçado das curvas sobre parâmetros de consumo. Comparando os dados de mesma velocidade média, nota-se a proximidade das grandezas observadas. Em alguns parâmetros, como o consumo por distância e do consumo em relação ao tempo de prova, o traçado de raio máximo apresentou melhores resultados frente aos ensaios que visavam a minimizar a distância percorrida.

Optou-se por não discutir os dados inerciais obtidos nos ensaios do Circuito 2 por estes apresentarem as mesmas conclusões dos ensaios do Circuito 1. Em resumo, o traçado de raio máximo apresentou menor esforço estrutural no protótipo e as inclinações frontais e laterais registradas foram mais fiéis ao relevo da pista.

6 CONCLUSÃO

A instrumentação precisa do veículo proporcionou dados relevantes em todos ensaios e foi essencial para verificar reações físicas do veículo em movimento e os desníveis no terreno. Durante o trabalho de desenvolvimento dos códigos de leitura dos sensores foi perceptível a influência do refino dos parâmetros como taxa de amostragem e escala de interesse sobre a qualidade dos dados obtidos nos testes.

A calibração dos instrumentos é algo intrínseco à fidelidade dos dados adquiridos. O refino dos pontos medidos nas curvas de calibração dos circuitos de medida de tensão e corrente elétrica foram muito importantes para a precisão dos dados de potência e consumo obtidos nos ensaios.

Com a aquisição de dados inerciais do veículo e a comparação destes dados com os valores obtidos para os dados de potência em cada ensaio foram importantes para identificar a influência do comportamento do piloto sobre o consumo do veículo. Pode-se verificar a existência de relações não lineares entre o consumo do protótipo e a velocidade média adotada, assim como pode-se compreender que há variáveis mais significativas que outras sobre o consumo, como a velocidade média apresentar mais relevância do que a distância percorrida.

A análise de vídeo dos ensaios também revelou características influentes de pilotagem frente ao consumo. A estratégia de variar a velocidade em determinados trechos da pista apresentou influência nos dados de consumo energético frente aos dados obtidos nos ensaios com velocidade mantida constante. A observação desta característica abre margem para ampliação dos ensaios abrangendo mais características distintivas do que apenas o traçado de pista e velocidade constante adotada.

O espaço viável a realização dos ensaios não pode proporcionar a composição de circuitos que testassem todas as particularidades de execução do traçado de raio máximo, como a transposição de curvas de sentido oposto em sequência, e isto limitou as possibilidades de validação deste método.

Tendo visto a melhora dos dados de eficiência registrados entre os circuitos 1 e 2, é válida a suposição de que para alguns circuitos o traçado de raio maior possa

apresentar um menor consumo apesar do seu incremento na distância, como mostraram as referências bibliográficas. As diferenças mecânicas entre os robôs utilizados nos artigos de referência bibliográfica (como a distância entre eixo, distância entre rodas, e a impossibilidade de rotação sobre o próprio centro geométrico por parte do veículo ensaiado) minimizaram os efeitos de redução de consumo do traçado de raio máximo, porém não refutaram este método para toda as estratégias adotadas.

O traçado de curvas de raio máximo apresentou melhora em alguns parâmetros de consumo do circuito 2, o que ainda mantém a necessidade de caracterização desta rota para outras condições de pista.

O trabalho realizado abre espaço para o aprofundamento dos estudos de eficiência energética, eletrônica de potência, instrumentação, estratégias de pilotagem, entre outros. São apresentadas as seguintes possibilidades de continuação deste trabalho:

- Aprofundamento do estudo da influência do traçado de pista sobre o consumo de um veículo considerando.
- Análise do consumo do protótipo elétrico em relação a outros parâmetros, como a inclinação da pista, a velocidade de condução, ao tipo de motor, ao tipo de pneu utilizado, ao peso do piloto, etc.
- Análise confiável das particularidades de condução dos pilotos da equipe Bagual Racing.
- Melhoria da telemetria dos protótipos da equipe.
- Aprimoramento da eletrônica de potência utilizada no veículo afim de melhorar sua eficiência.
- Modelagem de controladores inteligentes que atuem sobre a velocidade do veículo em função do desnível de cada trecho da pista a fim de reduzir o consumo em um circuito fechado.

O trabalho realizado fornece dados interessantes a análise da influência das técnicas de pilotagem sob o consumo do veículo. Estes dados, bem como toda a

instrumentação implementada no protótipo, serão entregues para a equipe Bagual Racing a fim de possibilitar a avaliação de desempenho dos pilotos e melhoria contínua das estratégias de pilotagem adotadas em competição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RODRIGUES, Marcus V.; RIBEIRO, José C. J.. *Veículos elétricos e sustentabilidade*. 2019. [S.l.]. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/73111/veiculos-eletricos-e-sustentabilidade/1>>. Acesso em 22 de Junho de 2019.

PESSOA, Rodrigo Simões. *Otimização de Pistas de Corrida - Curva de Entrada*. Rio de Janeiro. Pontifícia Universidade Católica. 2013. 17 p. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2013/relatorios_pdf/ctc/MEC/MEC-Rodrigo%20Sim%C3%B5es%20Pessoa.pdf>. Acesso em 7 de julho 2018.

GUPTA, Nikhil; ORDONEZ, Camilo; COLLINS JUNIOR, Emmanuel G.. *Dynamically feasible, energy efficient motion planning for skid-steered vehicles*. Auton Robot. Nova York. v. 41, n. 2017, p.453-471, fev. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10514-016-9550-8>>. Acesso em 7 de Julho de 2018.

CARVALHO, Edilson Alves de; ARAÚJO, Paulo César de. *Leituras cartográficas e interpretações estatísticas I: geografia*. Natal, RN: EDUFRN, c2008.

DOGRU, Sedat; MARQUES, Lino. *Energy Efficient Coverage Path Planning for Autonomous Mobile Robots on 3D Terrain*. 2015 IEEE International Conference On Autonomous Robot Systems And Competitions, [S.l.], p.118-123, abr. 2015. IEEE. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1109/icarsc.2015.23>>. Acesso em 7 de Julho de 2018.

WELCH, Greg; BISHOP, Gary. *An Introduction to the Kalman Filter*. [S.l.]. 2006. Disponível em: <https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf>. Acesso em 7 Julho de 2018.

CABRAL, E.L.L. Análise de Robôs, ch.4. p14-19. [S.l.]. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/p/eduardo.cabral/Preliminares%20Matem%C3%A1ticos.pdf>>. Acesso em 22 de Junho de 2019.

ZAMBERLAN, Jhonny. *Controle de uma Plataforma Utilizando Unidade de Medidas Inerciais*. Porto Alegre. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 25 f. 2013.

RUIZ, Juan Jose Martinez. *Medir ángulos de Euler (Roll y Pitch) a través de Simulink y Ardupilot*. [S.l.]. 2015. Disponível em: <<http://jujumaruiit.blogspot.com/2015/09/medir-angulos-de-euler-roll-y-pitch.html>>. Acesso em 7 de Julho de 2018.

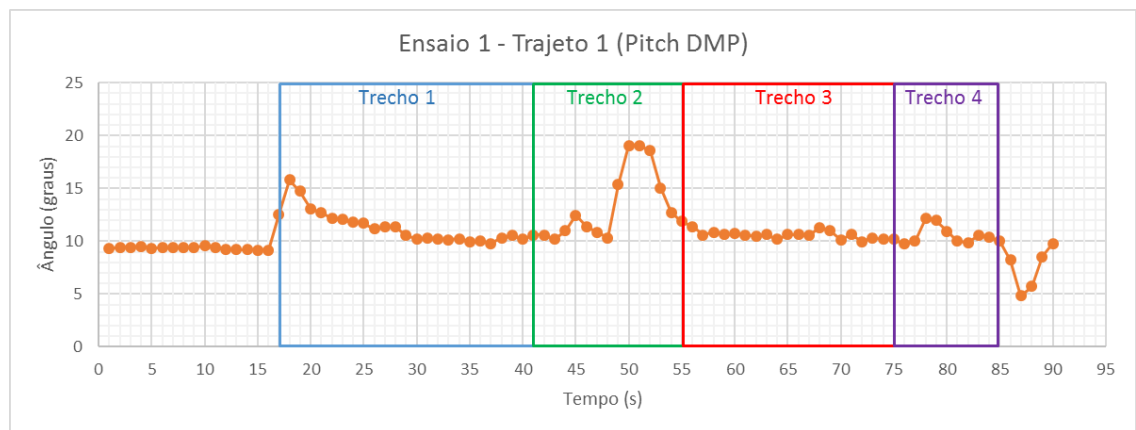
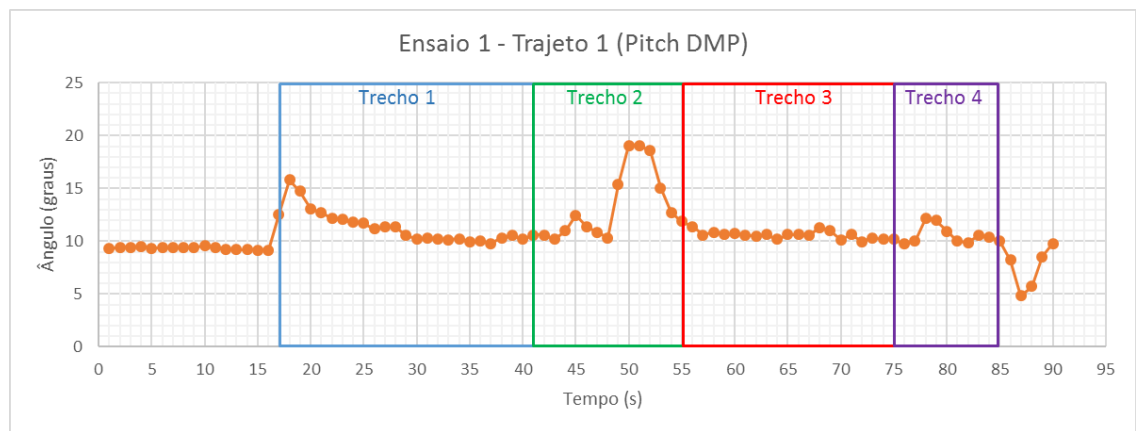
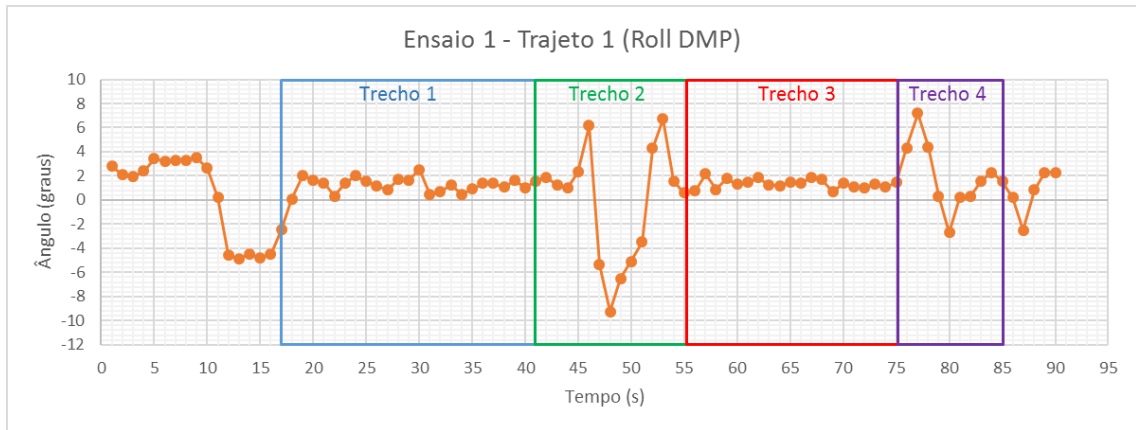
INVENSENSE. Datasheet: MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.invensense.com/wp->

content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em 22 de Junho de 2019.

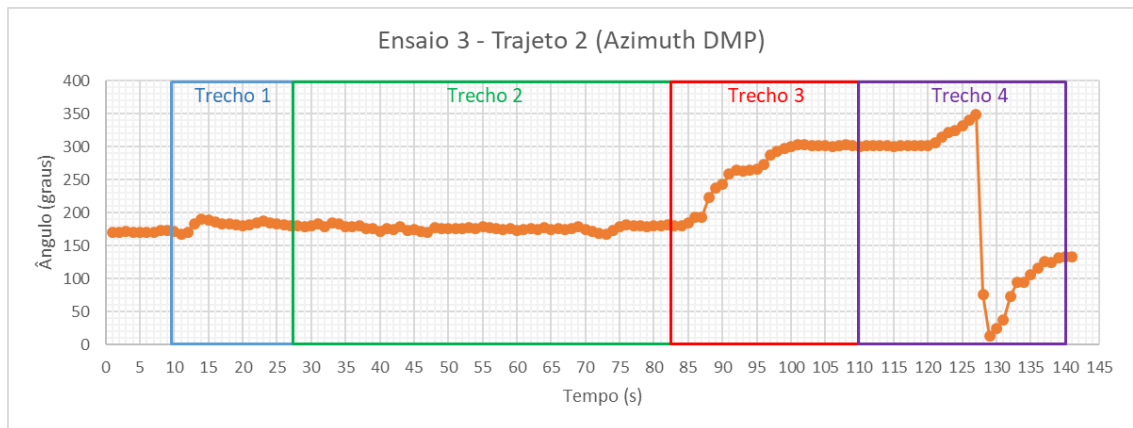
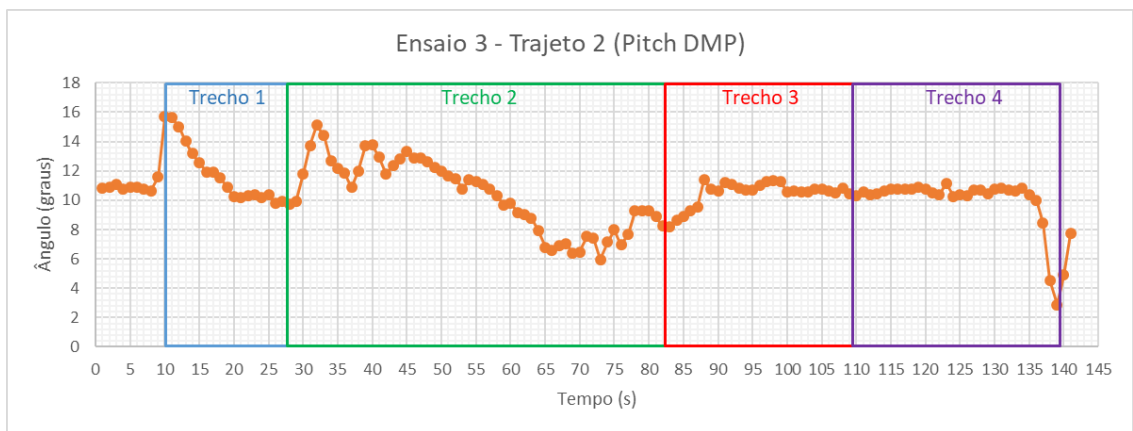
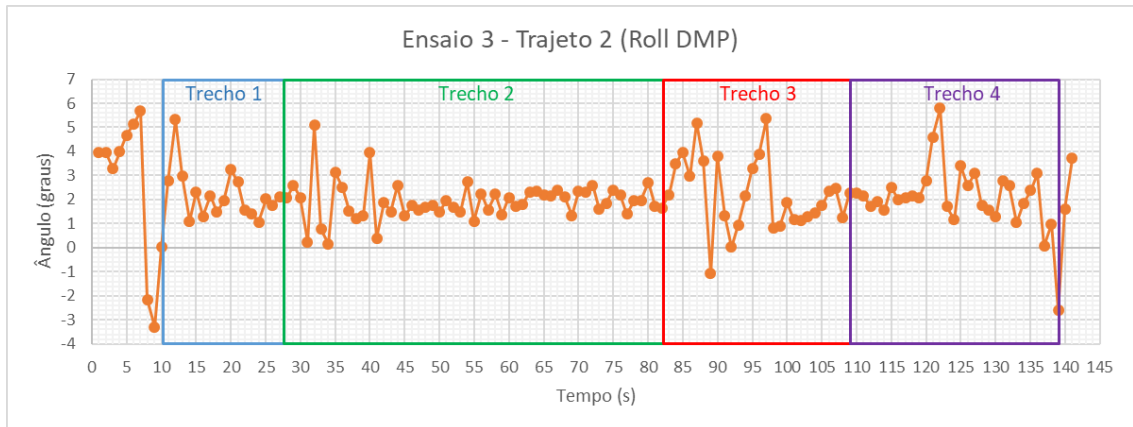
HONEYWELL. Datasheet: *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L*. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2150248.pdf>>. Acesso em 22 de Junho de 2019.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. Datasheet: *ACS712*. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>>. Acesso em 22 de Junho de 2019.

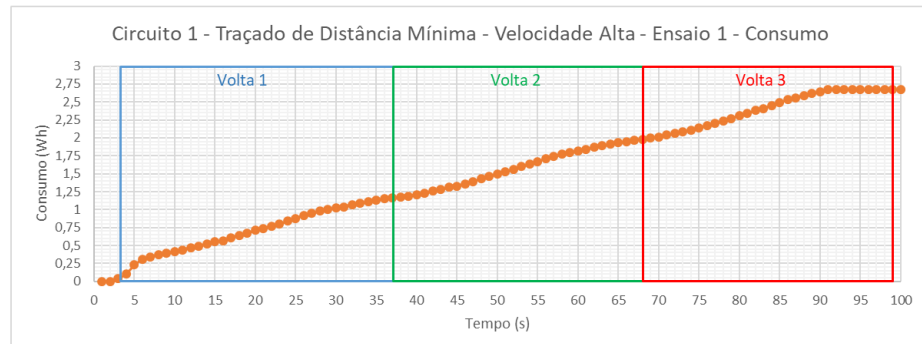
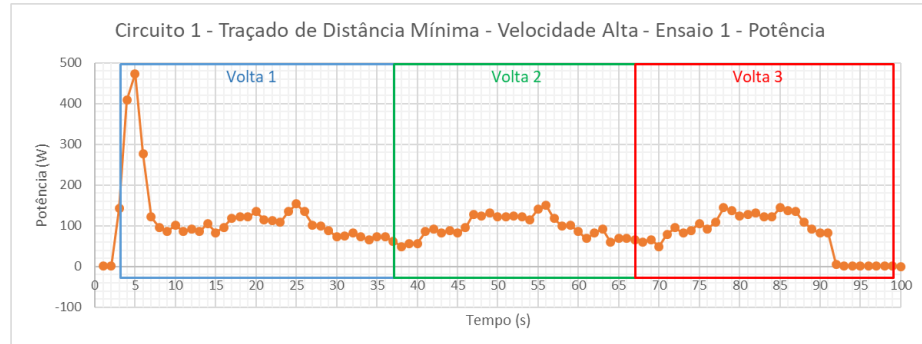
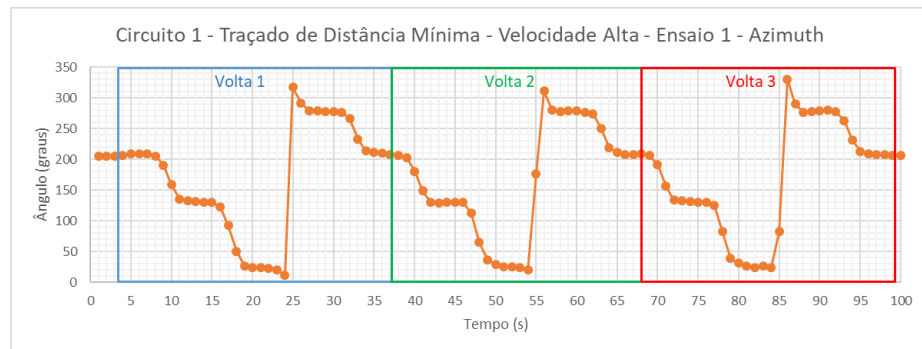
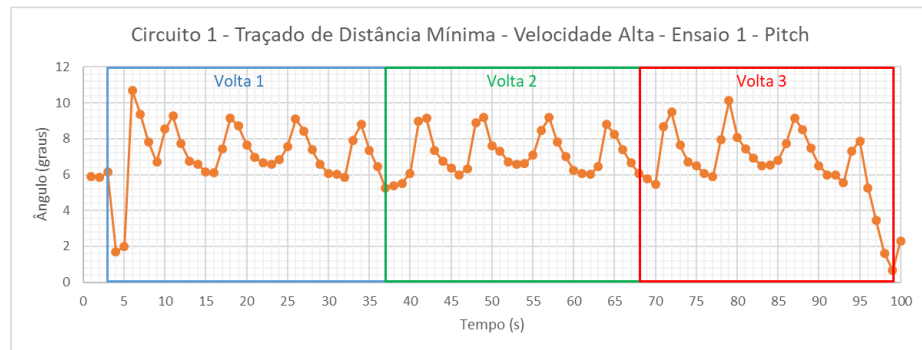
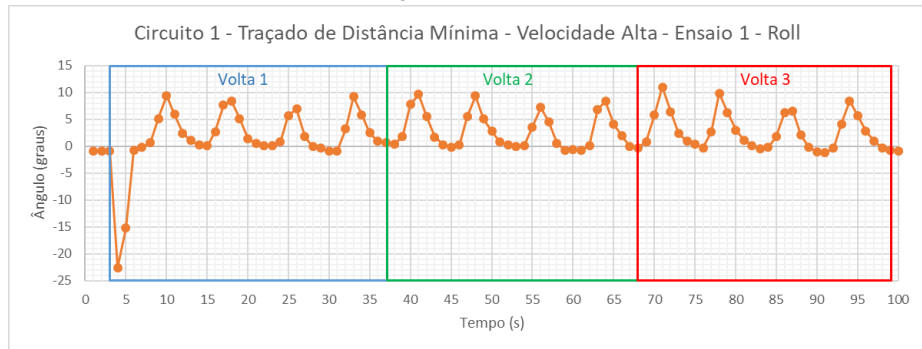
APÊNDICE A – Dados do ensaio 1 do trajeto 1 com a bicicleta.



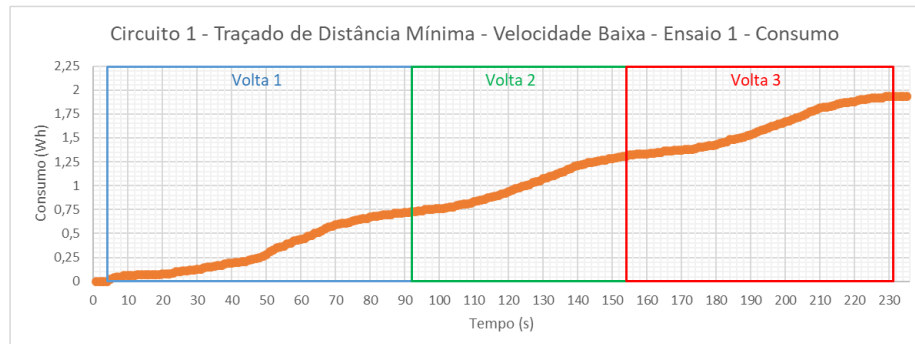
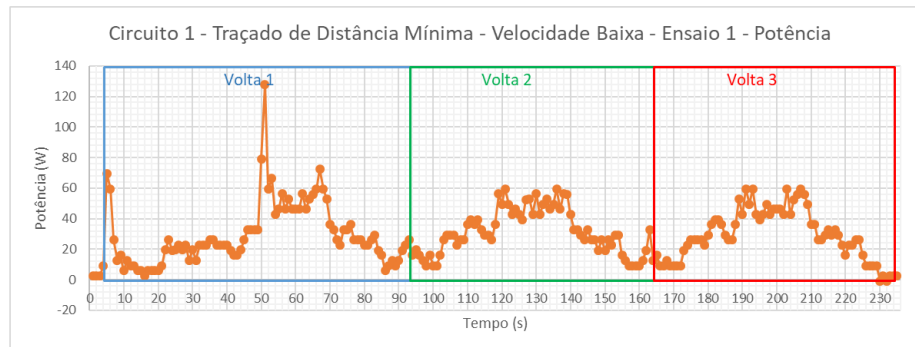
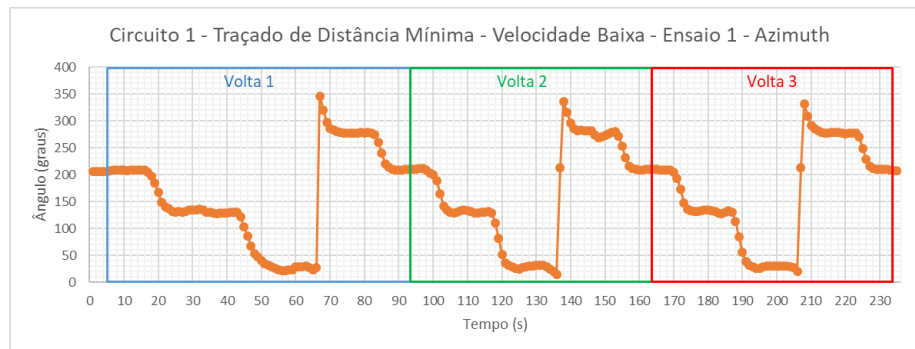
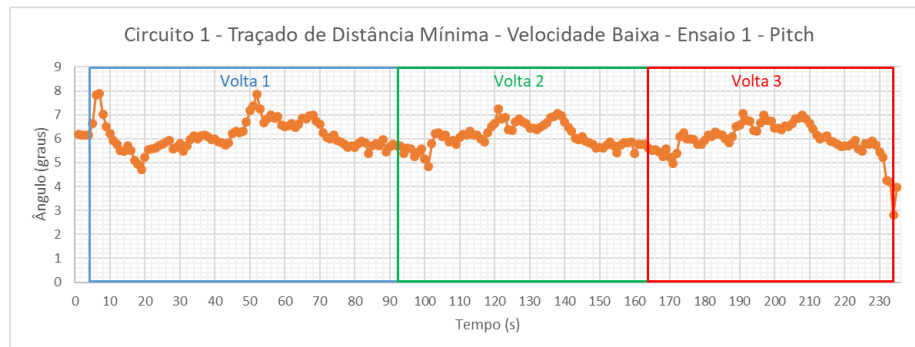
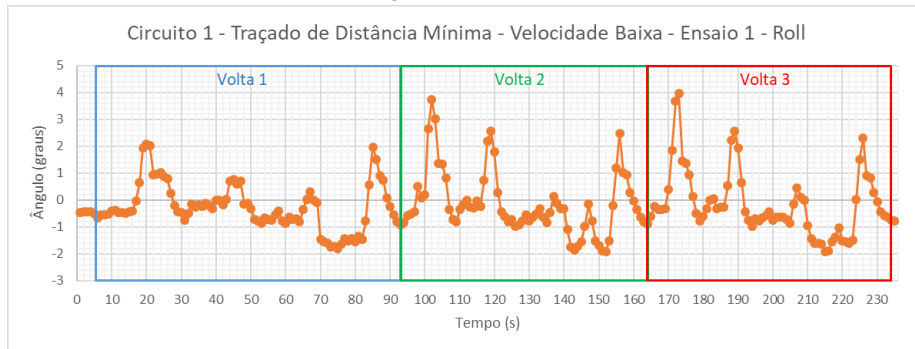
APÊNDICE B – Dados do ensaio 3 do trajeto 2 com a bicicleta.



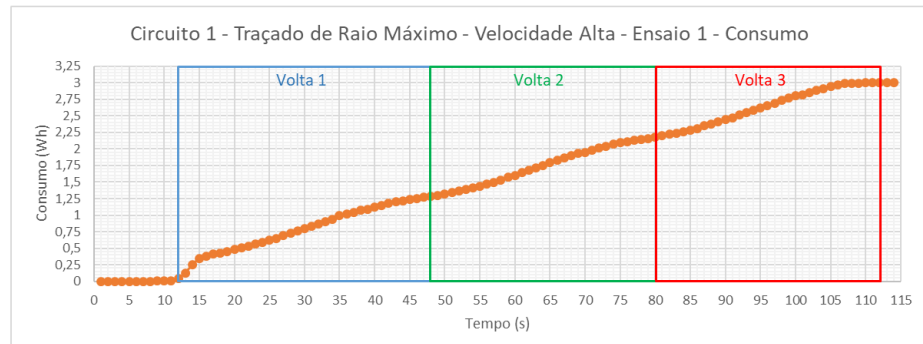
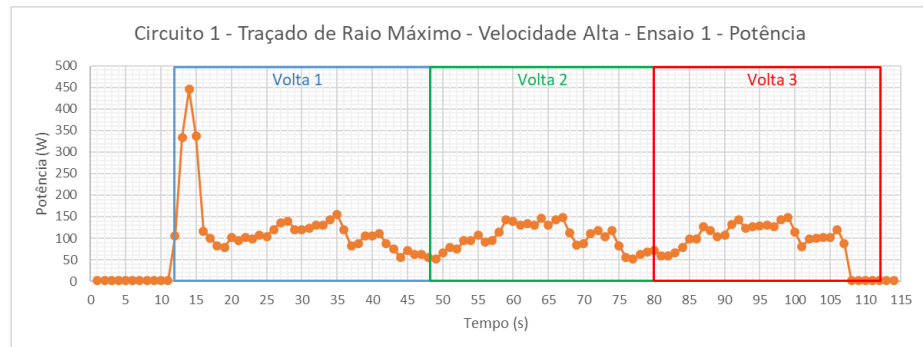
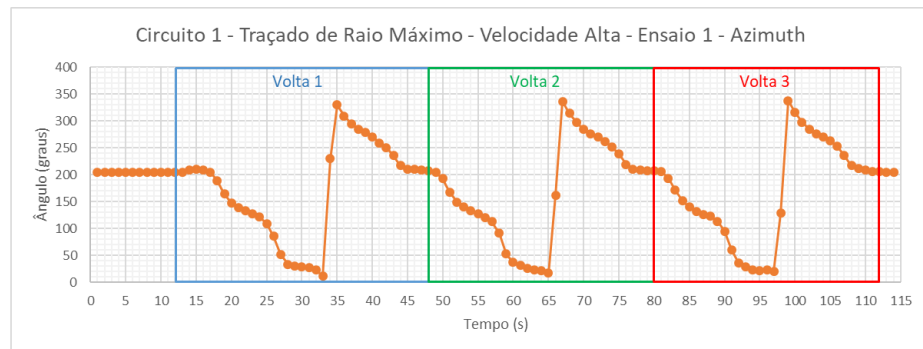
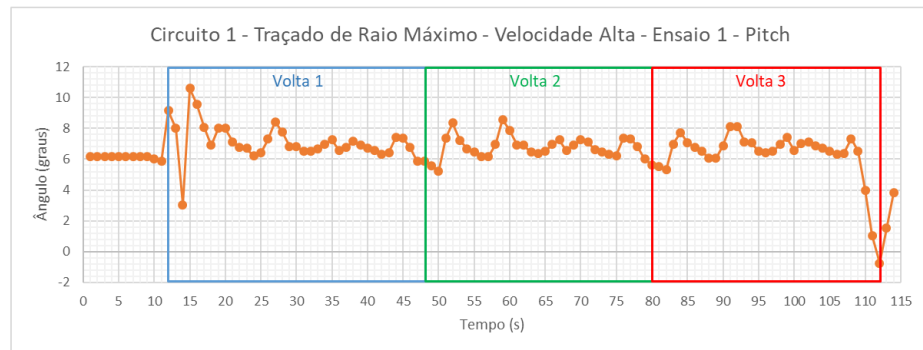
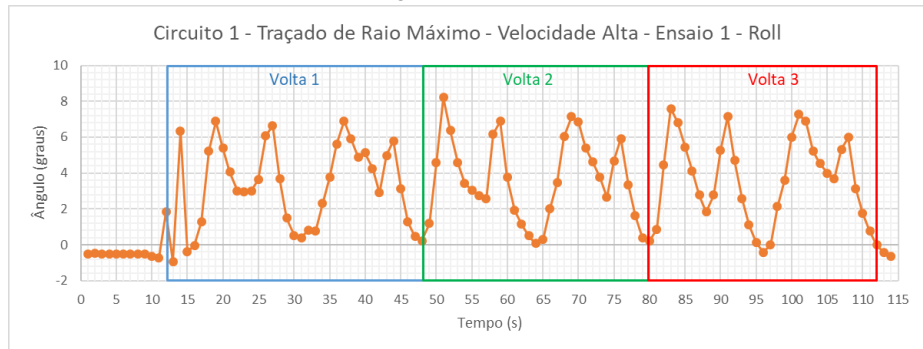
APÊNDICE C – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 1, em vel. alta.



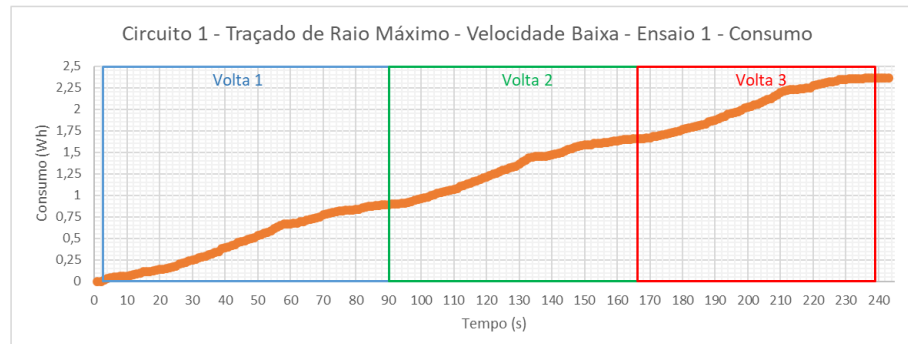
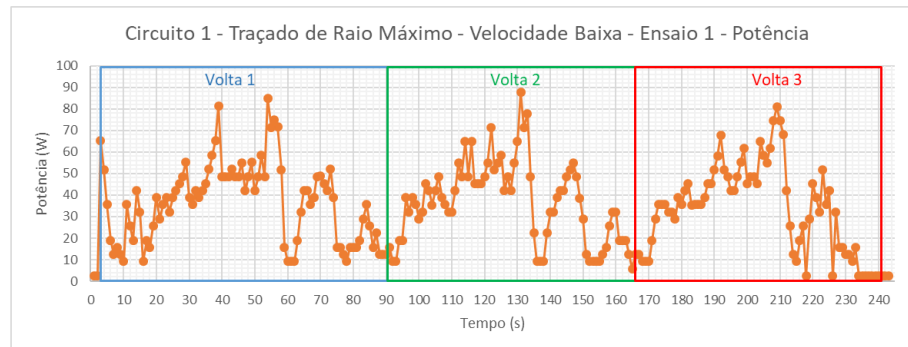
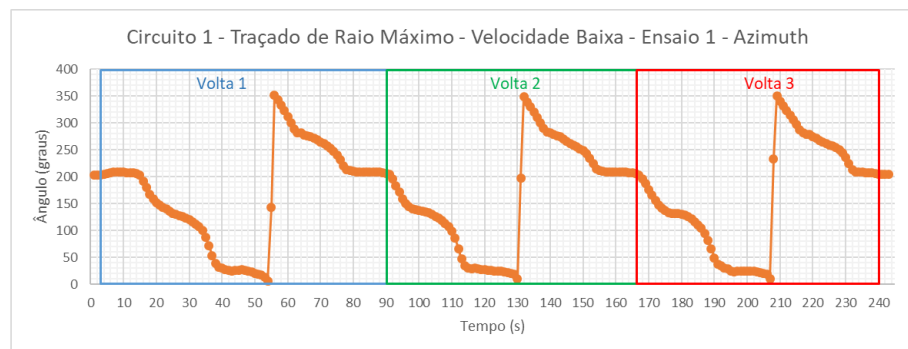
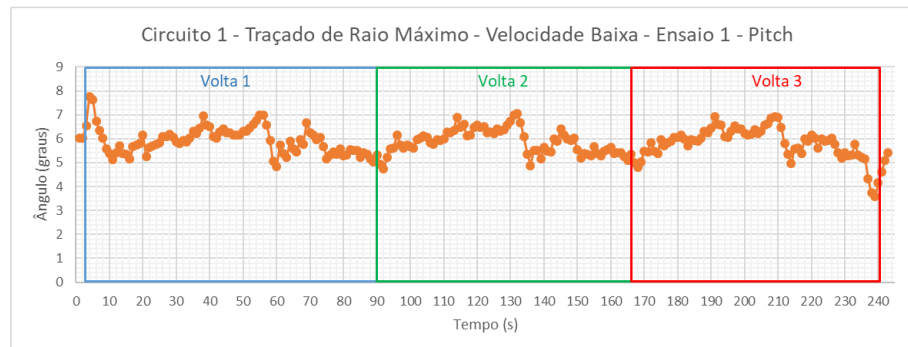
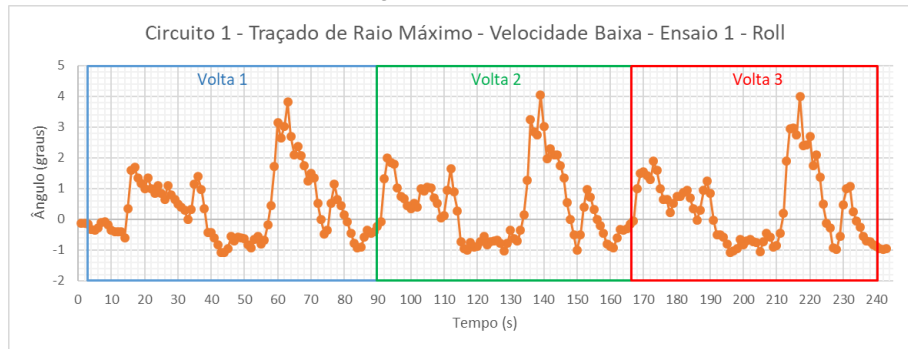
APÊNDICE D – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 1, em vel. baixa.



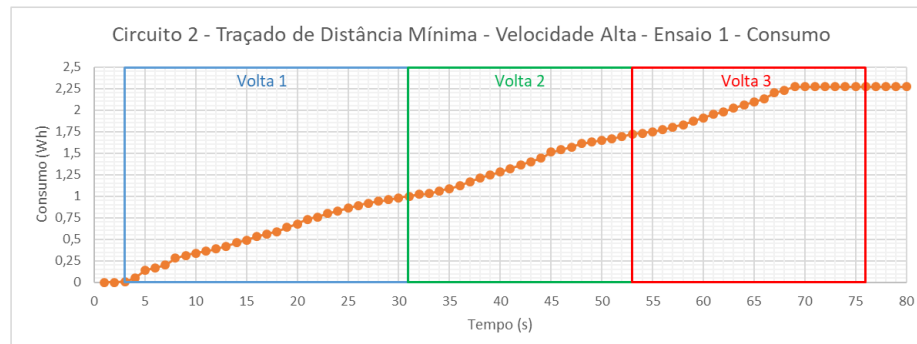
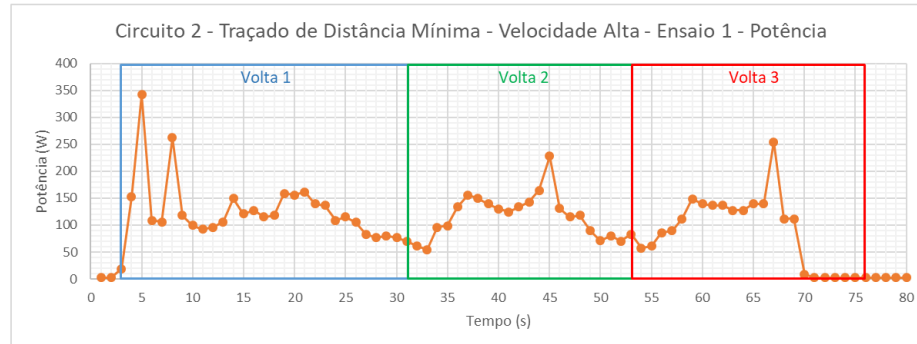
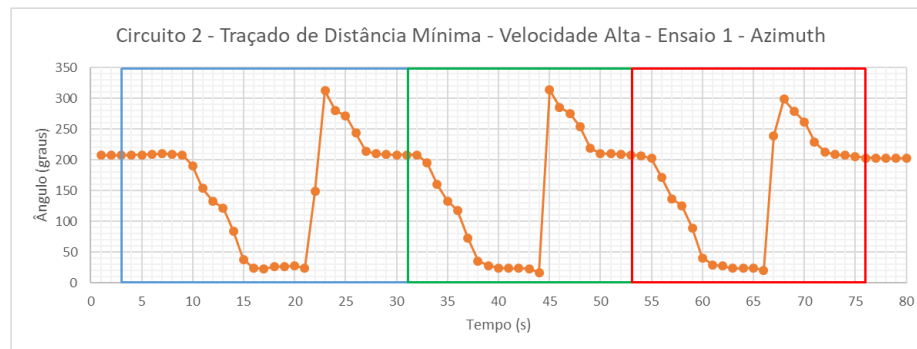
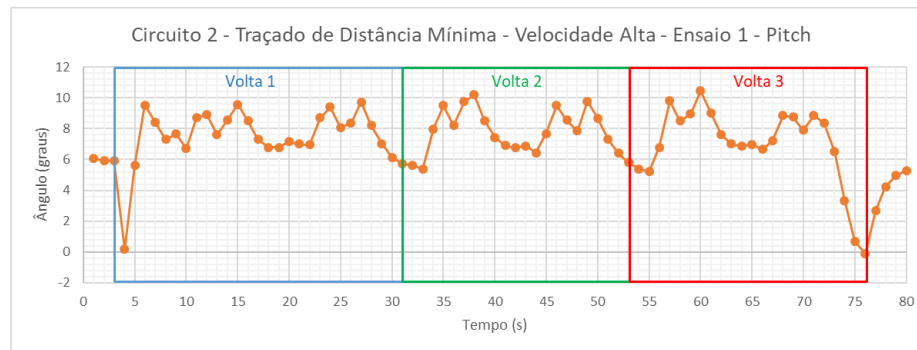
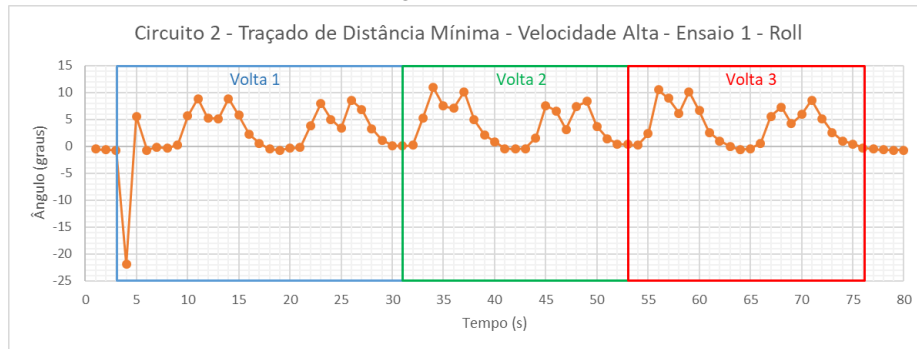
APÊNDICE E – Ensaio 1, traç. de raio máximo, circuito 1, em vel. alta.



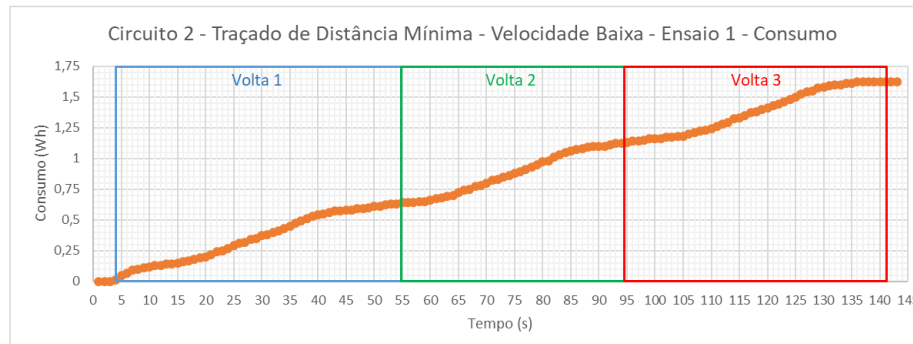
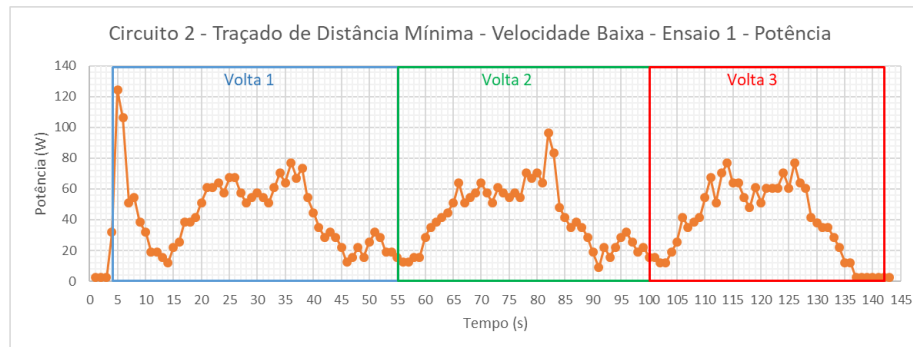
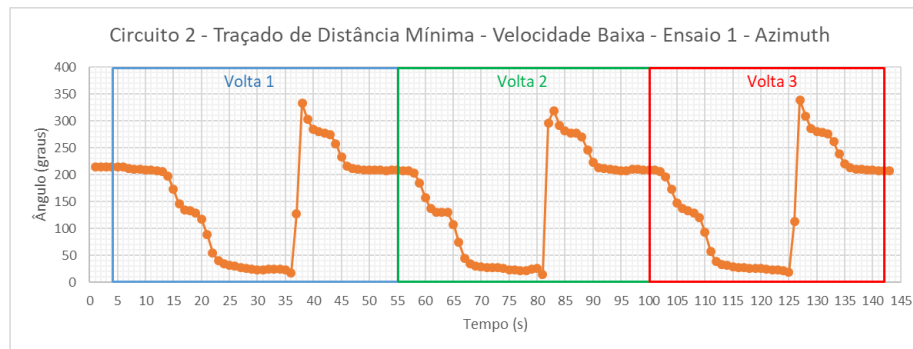
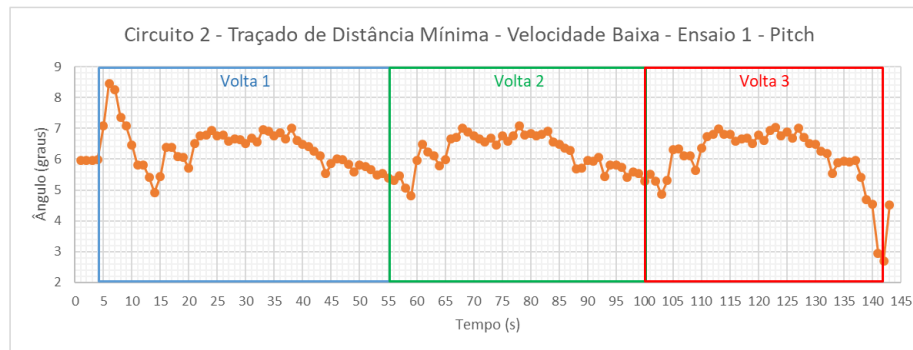
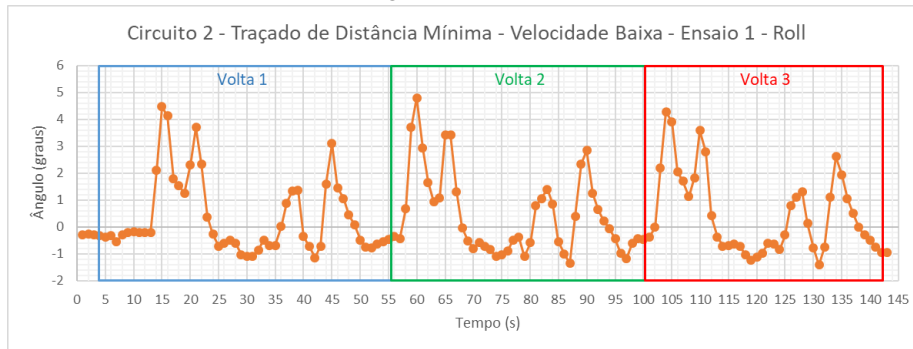
APÊNDICE F – Ensaio 1, traç. de raio máximo, circuito 1, em vel. baixa.



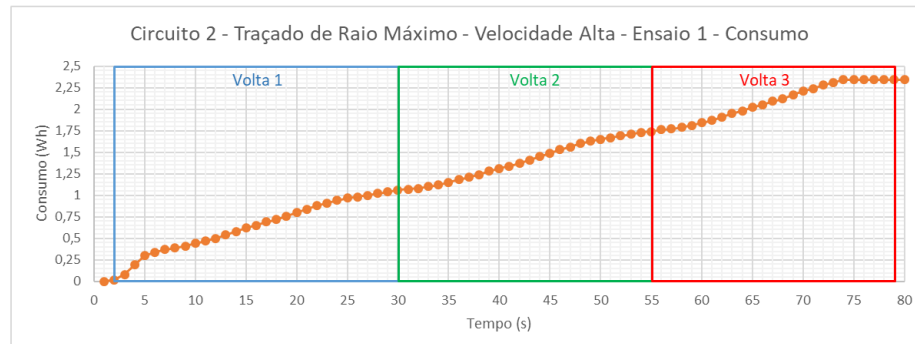
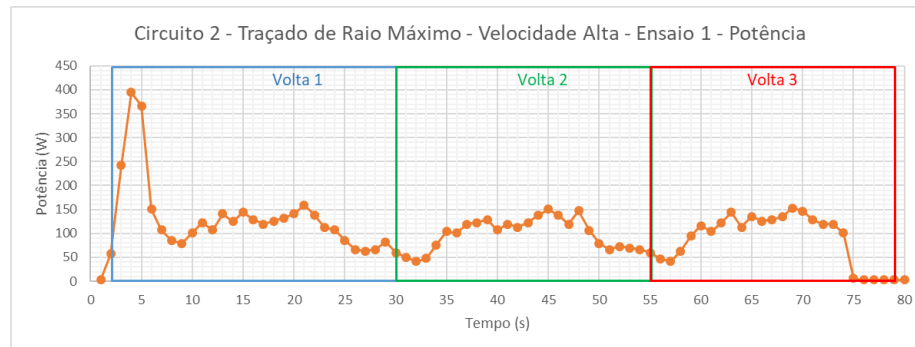
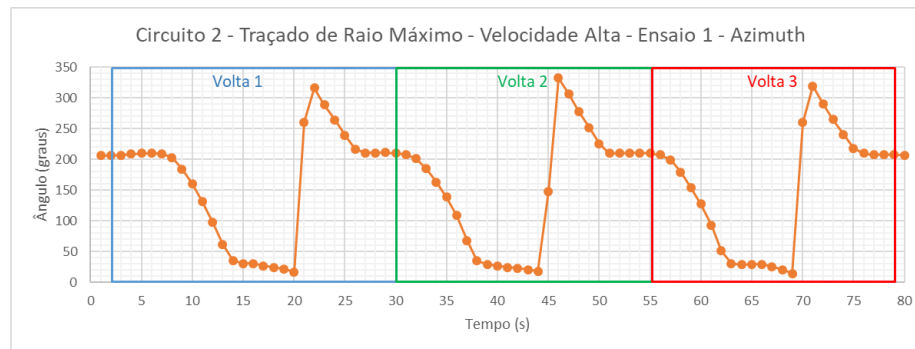
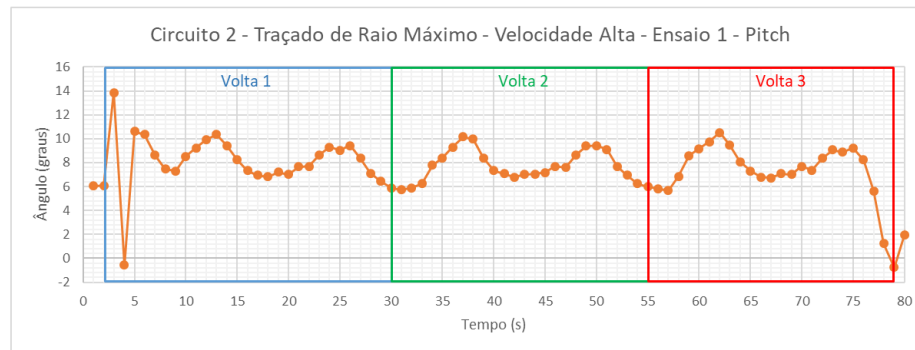
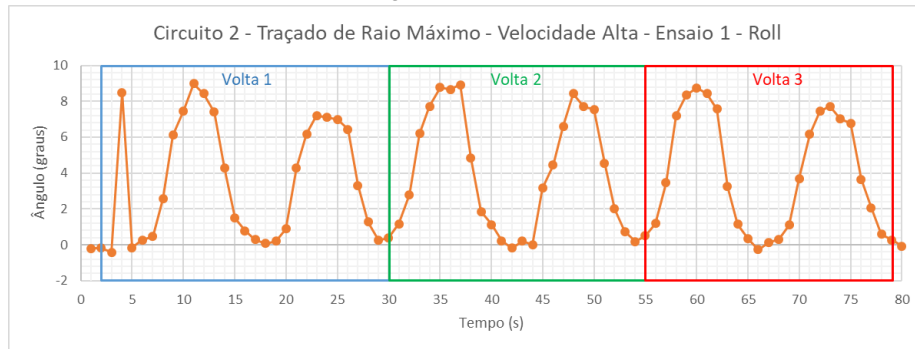
APÊNDICE G – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 2, em vel. alta.



APÊNDICE H – Ensaio 1, traç. de dist. mínima, circuito 2, em vel. baixa.



APÊNDICE I – Ensaio 1, traç. de raio máximo, circuito 2, em vel. alta.



APÊNDICE J – Ensaio 1, traç.de raio máximo, circuito 2, em vel. baixa.

