

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA AUTOMOTIVA

HENRIQUE ZAITH BELON FERNANDES

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA MOTOCICLETA DA
CATEGORIA *TRAIL*

Joinville

2024

HENRIQUE ZAITH BELON FERNANDES

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA MOTOCICLETA DA
CATEGORIA *TRAIL*

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Thiago Antonio Fiorentin

Joinville

2024

HENRIQUE ZAITH BELON FERNANDES

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA MOTOCICLETA DA
CATEGORIA *TRAIL*

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 04 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thiago Antonio Fiorentin
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni
Membro(a)
UFSC

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro(a)
UFSC

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe, aos meus queridos pais, a todos do Laboratório de Acústica e Vibrações e da equipe CTJ Baja.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais que tornaram possível o meu sonho de estudar em uma Universidade Federal e renomada não somente dentro do país mas no mundo, pela criação, educação e incentivo que sempre me deram. Gostaria de agradecer também a todos os membros da equipe CTJ Baja que me ensinaram muitas coisas que coloquei em prática para a realização desse trabalho. Aos amigos Vítor Gustavo Gomes Catão e Ítalo Reis Barrilari que desde o começo da minha jornada dentro da universidade me acompanharam e sempre me ajudaram em todos os momentos que precisei. Ademais, agradeço a Ana Luisa Casagrande, minha namorada, por todo o suporte e apoio durante o período final de minha graduação, principalmente no desenvolvimento do presente trabalho.

“ Ninguém vai bater mais forte do que a vida. Não importa como você bate e sim o quanto aguenta apanhar e continuar lutando; o quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha. ”

Sylvester Stallone

RESUMO

O mercado de motocicletas brasileiro vem apresentando um crescimento constante de vendas e emplacamento nos últimos cinco anos. No entanto, esse crescimento das vendas das motocicletas está mais rápido que o desenvolvimento de pesquisas e trabalhos científicos, sendo, assim, um ambiente amplo para exploração e aprimoração de projetos para que se tornem seguros para o piloto, a custos reduzidos para a prototipagem, com a utilização de simuladores. Dessa forma, apresenta-se neste trabalho um estudo sobre a dinâmica de uma motocicleta com o intuito de realizar comparações com os resultados obtidos em simulação do MotorcycleMaker. Foram realizadas manobras comumente utilizadas por motociclistas com o intuito de reproduzir a utilização real do produto e verificar a eficácia dos dados obtidos nas simulações. Para a aquisição dos dados na motocicleta foram usados principalmente dois sensores, um para averiguar o esterçamento e outro para averiguar a posição no espaço da motocicleta com o intuito da obtenção de parâmetros importantes como ângulo de rolagem, arfagem e guinada. Os resultados demonstram que os dados obtidos nas simulações são compatíveis com os obtidos em testes práticos, validando o programa MotorcycleMaker para condições reais de uso e aprimoramentos de projetos de motocicletas, tornando o código computacional possível de realizar uma análise completa do comportamento dinâmico da motocicleta considerando um piloto.

Palavra-chave: Dinâmica de motocicleta; MotorcycleMaker; Dinâmica lateral.

ABSTRACT

The Brazilian motorcycle market has been experiencing consistent growth in sales and registrations over the past five years. However, this increase in motorcycle sales is outpacing the development of research and scientific work, thus creating a broad environment for exploration and enhancement of projects to ensure they are safe for riders, at reduced costs for prototyping, utilizing simulators. This paper presents a study on the dynamics of a motorcycle with the aim of comparing the results obtained in the MotorcycleMaker simulation. Maneuvers commonly used by motorcyclists were performed to replicate real product usage and verify the effectiveness of the data obtained in simulations. Two main sensors were used to acquire data on the motorcycle: one to check steering angle and another to assess the motorcycle's position in space, aiming to obtain important parameters such as roll angle, pitch, and yaw. The results demonstrate that the data obtained from simulations are compatible with those gathered from practical tests, validating the MotorcycleMaker program for real usage conditions and improvements in motorcycle projects, making the computational code capable of conducting a comprehensive analysis of the motorcycle's dynamic behavior considering a rider.

Keywords: Motorcycle dynamics; MotorcycleMaker; Lateral dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emplacamento de motocicletas em Agosto/2023	24
Figura 2 – Emplacamento de motocicletas em Agosto/2024	25
Figura 3 – Estrutura cinemática de uma motocicleta	26
Figura 4 – Geometria de uma motocicleta	28
Figura 5 – Modelagem do <i>trail</i> em uma motocicleta.	29
Figura 6 – Efeito do <i>trail</i> positivo, neutro e negativo em uma motocicleta.	30
Figura 7 – Geometria do sistema de direção com a motocicleta em posição vertical e sem <i>fork offset</i>	31
Figura 8 – Geometria do sistema de direção com a motocicleta em posição vertical e com <i>fork offset</i>	31
Figura 9 – Ilustração do efeito Hall.	34
Figura 10 – Local para acessar o modelador de cenário do MotorcycleMaker	38
Figura 11 – Página inicial do modelador de cenário do MotorcycleMaker	38
Figura 12 – Modelos de vias disponíveis para edição no modelador de cenário do MotorcycleMaker	39
Figura 13 – Configuração de parâmetros para as pistas do modelador de cenário do MotorcycleMaker	39
Figura 14 – Tela inicial do MotorcycleMaker	40
Figura 15 – Local para acessar o modelador de motocicleta do MotorcycleMaker	40
Figura 16 – Parâmetros que podem ser modificados no modelador de motocicleta do MotorcycleMaker	41
Figura 17 – Local para acessar o modelador de piloto do MotorcycleMaker	41
Figura 18 – Parâmetros que podem ser modificados no modelador de piloto do MotorcycleMaker	42
Figura 19 – Local para acessar o modelador de simulação do MotorcycleMaker	43
Figura 20 – Parâmetros que podem ser modificados no modelador de simulação do MotorcycleMaker	43
Figura 21 – Local para acessar o modelador de gráficos do MotorcycleMaker	44
Figura 22 – Tela inicial do gerador de gráficos do MotorcycleMaker	45
Figura 23 – Ícone para centralização dos gráficos do MotorcycleMaker	45
Figura 24 – Circuito em formato de 8 realizado no MotorcycleMaker	47
Figura 25 – Circuito 8 para teste sem voltas realizado no MotorcycleMaker	47
Figura 26 – Circuito da rótula realizado no MotorcycleMaker	48
Figura 27 – Circuito da rótula para teste sem voltas realizado no MotorcycleMaker	49
Figura 28 – Circuito retilíneo realizado no MotorcycleMaker	49

Figura 29 – Circuito com o conjunto de três lombadas realizado no Motorcycle-Maker	50
Figura 30 – Circuito com o conjunto de duas lombadas realizado no Motorcycle-Maker	51
Figura 31 – Perfil da lomaba instalada no campus	51
Figura 32 – Motocicleta utilizada para os testes instrumentada.	52
Figura 33 – Vista superior do projeto arquitetônico da UFSC campus Joinville dentro do Parque Perini	53
Figura 34 – Realização do teste no circuito em formato de 8	54
Figura 35 – Realização do teste na rótula	54
Figura 36 – Realização do teste no circuito retilíneo	55
Figura 37 – Local de instalação das lombadas por parte do Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV)	55
Figura 38 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação do circuito em formato de 8 com 3 voltas	56
Figura 39 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação do circuito em formato de 8 entrando e saindo do circuito sem completar uma volta	57
Figura 40 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação da rótula com velocidade de 20 km/h	58
Figura 41 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação da rótula com velocidade de 30 km/h	58
Figura 42 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação da rótula entrando e saindo do circuito sem completar uma volta à 20 km/h	59
Figura 43 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação da rótula entrando e saindo do circuito sem completar uma volta à 30 km/h	60
Figura 44 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação do trajeto retilíneo à 20 km/h	61
Figura 45 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação do trajeto retilíneo à 30 km/h	61
Figura 46 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação do trajeto com lombadas a direita (três lombadas) à 20 km/h	62
Figura 47 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> da simulação do trajeto com lombadas a esquerda (duas lombadas) à 20 km/h	62
Figura 48 – Gráfico da latitude e longitude dos testes experimentais do circuito em formato de 8 com 3 voltas	64
Figura 49 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> dos testes experimentais do circuito em formato de 8 com 3 voltas	64

Figura 50 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> dos testes experimentais do circuito em formato de 8 entrando e saindo do circuito sem completar uma volta	64
Figura 51 – Gráfico com resultados dos testes experimentais do circuito em formato de 8 com 3 voltas somente do parâmetro de rolagem	65
Figura 52 – Gráfico com resultados dos testes experimentais do circuito em formato de 8 somente entrando e saindo, somente do parâmetro de rolagem	65
Figura 53 – Gráfico da latitude e longitude dos testes experimentais da rótula com 3 voltas	66
Figura 54 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental da rótula com velocidade de 20 km/h	66
Figura 55 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental da rótula com velocidade de 30 km/h	66
Figura 56 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula com velocidade de 20 km/h somente do <i>Roll</i>	67
Figura 57 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula com velocidade de 30 km/h somente do <i>Roll</i>	67
Figura 58 – Gráfico da latitude e longitude dos testes experimentais da rótula realizando apenas a entrada e saída	68
Figura 59 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída do percurso com velocidade de 20 km/h	68
Figura 60 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída do percurso com velocidade de 30 km/h	68
Figura 61 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída com velocidade de 20 km/h somente do <i>Roll</i>	69
Figura 62 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída com velocidade de 30 km/h somente do <i>Roll</i>	69
Figura 63 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 20 km/h	70
Figura 64 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 30 km/h	70
Figura 65 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 20 km/h somente <i>Pitch</i>	70
Figura 66 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 30 km/h somente <i>Pitch</i>	71

Figura 67 – Gráfico com resultados de <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> do teste experimental do trajeto com lombadas a direita à 20 km/h	71
Figura 68 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto com lombadas a esquerda à 20 km/h	72
Figura 69 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto com lombadas a direita à 20 km/h somente <i>Pitch</i>	72
Figura 70 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto com lombadas a esquerda à 20 km/h somente <i>Pitch</i>	72
Figura 71 – Gráfico com resultados comparativos do circuito em formato de 8 realizando três voltas com o dado somente de <i>Roll</i>	73
Figura 72 – Gráfico com resultados comparativos do circuito em formato de 8 realizando somente entrada e saída com os dados somente de <i>Roll</i>	74
Figura 73 – Gráfico com resultados comparativos da rótula somente <i>Roll</i> com velocidade de 20 km/h	75
Figura 74 – Gráfico com resultados comparativos da rótula somente <i>Roll</i> com velocidade de 30 km/h	75
Figura 75 – Gráfico com resultados comparativos da rótula entrando e saindo do circuito somente <i>Roll</i> com velocidade de 20 km/h	76
Figura 76 – Gráfico com resultados comparativos da rótula entrando e saindo do circuito somente <i>Roll</i> com velocidade de 30 km/h	77
Figura 77 – Gráfico com resultados comparativos do trajeto retilíneo somente <i>Pitch</i> com velocidade de 20 km/h	78
Figura 78 – Gráfico com resultados comparativos do trajeto retilíneo somente <i>Pitch</i> com velocidade de 30 km/h	78
Figura 79 – Gráfico com resultados comparativos do conjunto de lombadas a direita somente <i>Pitch</i>	79
Figura 80 – Gráfico com resultados comparativos do conjunto de lombadas a esquerda somente <i>Pitch</i>	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de motocicletas vendidas em agosto de 2023 e 2024	25
Tabela 2 – Cronograma de testes a serem realizados	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DETRAN	Departamento de Trânsito
FENABRAVE	Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores
GPS	Global Positioning System
LAV	Laboratório de Acústica e Vibrações
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

p	Distância entre eixos
d	<i>Fork Offset</i>
ϵ	Ângulo de cáster
R_r	Raio da roda traseira
R_f	Raio da roda dianteira
t_r	Raio da seção transversal da roda traseira
t_f	Raio da seção transversal da roda dianteira
ρ_r	Raio do centro do toróide traseiro
ρ_f	Raio do centro do toróide dianteiro
a_n	<i>Normal Trail</i>
a	<i>Mechanical Trail</i>
F	Força de atrito
Δh	Distância do centro da roda entre momento parado e esterçando
V_H	Tensão de Hall
I	Corrente
B	Intensidade do campo magnético
n	Densidade dos portadores de carga
e	Carga do elétron
t	Espessura do condutor
V	Velocidade
R	Raio do conjunto pneu/roda
π	Número pi
Δt	Variação do tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	ESTADO DA ARTE	19
2.2	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	22
2.3	CATEGORIAS DE MOTOCICLETAS	22
2.3.1	Motocicletas do tipo <i>Trail</i>	23
2.4	CARACTERÍSTICAS DA MOTOCICLETA	25
2.5	PROGRAMA MOTORCYCLEMAKER	32
2.5.1	Funcionalidades e ferramentas	32
2.6	SENSORES	33
2.6.1	Sensor Hall	33
2.6.2	Sensor de esterçamento	35
2.6.3	Sensor de inclinação com 10 eixos	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	INTRODUÇÃO AO MOTORCYCLEMAKER	37
3.1.1	Geração de circuitos	37
3.1.2	Definição dos parâmetros da motocicleta	40
3.1.3	Definição dos parâmetros do piloto	41
3.1.4	Definição dos parâmetros de simulação	42
3.1.5	Geração de gráficos para análise da simulação	44
3.2	CIRCUITOS	46
3.2.1	Circuito em formato de 8	46
3.2.2	Rótula	48
3.2.3	Retilíneo	49
3.2.4	Conjunto de três lombadas	50
3.2.5	Conjunto de duas lombadas	50
3.3	SENSORES NO MODELO FÍSICO	51
3.4	TESTES	53
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	56
4.1	RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	56
4.1.1	Resultado circuito em formato de 8	56
4.1.2	Resultados da rótula com três voltas	58
4.1.3	Resultados da rótula apenas entrando e saindo do circuito	59

4.1.4	Resultados do trajeto retilíneo	60
4.1.5	Resultado da simulação sobre lombadas	62
4.2	RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS	63
4.2.1	Resultados circuito em formato de 8	63
4.2.2	Resultados dos testes da rótula com 3 voltas	66
4.2.3	Resultados dos testes da rótula entrando e saindo do circuito	67
4.2.4	Resultados do teste retilíneo	69
4.2.5	Resultados dos testes sobre lombadas	71
4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	73
4.3.1	Comparação circuito em formato de 8	73
4.3.2	Comparação rótula com 3 voltas	75
4.3.3	Comparação rótula somente entrando e saindo do circuito	76
4.3.4	Comparação do trajeto retilíneo	77
4.3.5	Comparação do conjunto de lombadas	79
5	CONCLUSÃO	81
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Tanelli, Corno e Savaressi (2014), a motocicleta é o meio de transporte mecanizado mais comum no planeta. Na sua forma movida a energia humana, a bicicleta, é um dos primeiros veículos pragmáticos e úteis que a maioria das pessoas encontra. No entanto, é um meio de transporte pouco explorado, pois, os esforços foram concentrados no desenvolvimento de carros e as motos foram consideradas veículos simples por possuírem apenas duas rodas, assim como sua construção e projeto. Ainda assim, veículos de duas rodas não são apenas um subconjunto de carros e sua complexidade é percebida no desafio de se projetar e modelar esse veículo (Tanelli *et al.*, 2014).

Essa complexidade é demonstrada, também, pelo momento em que não existe um equilíbrio natural do veículo quando o mesmo está parado e que só é atingido com a ajuda do piloto, que coloca um dos pés no chão para que a mesma fique estável. Além disso, no momento de realizar uma curva em função do ângulo de rolagem, visto que caso não haja, dificulta o contorno, e caso seja excessivo, pode causar a queda do piloto, resultando num acidente pelo fato de que é um parâmetro que auxilia o piloto nessa manobra.

Ademais, ao se tratar de uma motocicleta ou veículos *single track*, o desconforto em pessoas que não possuem a habilidade em pilotagem está relacionado principalmente ao equilíbrio, pois, intuitivamente, as pessoas tendem a colocar os pés no solo para que fiquem equilibradas durante o momento de esterçamento do guidão, visando manter o balanço da motocicleta. Sendo assim, veículos considerados *single track* são aqueles que ao passarem por uma pista de areia, deixam um rastro único demarcado no chão. Em função desse fato, é possível identificar a complexidade desse veículo, visto que, em comparação com um automóvel, não tem um balanço único para que se mantenha no local através dos quatro apoios, como o carro possui com seus quatro pneus em contato com o solo.

Dessa forma, com o intuito de garantir a eficácia da utilização de códigos computacionais durante a realização do projeto de uma motocicleta, realizou-se neste trabalho uma comparação dos dados obtidos em simulações comportamentais de um veículo *single track* com os dados experimentais realizados em uma BMW G310 GS em pistas semelhantes às criadas no MotorcycleMaker.

Realizou-se inicialmente a modelagem com os parâmetros corretos da motocicleta a ser utilizada no programa MotorcycleMaker e padronizado todos os testes necessários com a alteração de velocidade de entrada e a geometria da pista. Após os resultados, esses testes foram reproduzidos com a motocicleta e realizou-se uma comparação entre os valores experimentais com os valores simulados.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática relacionada a acuracidade dos dados adquiridos via simulação no código computacional MotorcycleMaker relacionado a dinâmica longitudinal, lateral e vertical de uma motocicleta, propõem-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os resultados de modelos de motocicleta no MotorcycleMaker para a dinâmica longitudinal, lateral e vertical da BMW G 310 GS comparando-os com os testes realizados no veículo em questão, para validação do modelo numérico.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos para a análise do comportamento dinâmico de uma motocicleta da categoria *Trail*, são propostos:

- Aprimorar o conhecimento no desenvolvimento de modelos de veículos de duas rodas em manobras com raio e velocidades constantes;
- Desenvolver modelos no programa MotorcycleMaker para análise da dinâmica veicular da motocicleta;
- Instrumentar uma motocicleta para a obtenção dos dados;
- Comparar os resultados obtidos no MotorcycleMaker e os dados reais com o intuito de averiguar a acurácia dos dados;
- Incrementar os estudos relacionados a motocicleta, tema ainda com pouca referência bibliográfica atualmente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para realizar a análise dos resultados provenientes das simulações do *MotorcycleMaker* com intuito de comparar com os resultados obtidos em testes com uma motocicleta, é necessário entender o conceito de uma motocicleta, assim como seus componentes e as terminologias utilizadas na academia relacionado a dinâmica vertical, lateral e longitudinal de um veículo. Este capítulo apresenta a contextualização histórica da motocicleta, assim como introduz o conceito de dinâmica vertical, lateral e longitudinal e sua importância para o desenvolvimento de veículos *single track*.

2.1 ESTADO DA ARTE

Estudos voltados para a motocicleta foram desenvolvidos, iniciando-se pela estabilidade do movimento de bicicletas com a hipótese da utilização de pneus rígidos (Whipple, 1899). O modelo de Whipple (1899), amplamente reconhecido na literatura sobre dinâmica de bicicletas, se destaca por sua abordagem rigorosa na análise da estabilidade do movimento. Considerando a bicicleta como um sistema conservativo e com restrições de movimento (sistema o qual não pode ser descrito apenas em termos de posição e que dependem também de sua velocidade), o modelo é composto por quatro partes rígidas: duas rodas, um quadro e um conjunto frontal. Essa estrutura permite uma linearização das equações de movimento, facilitando a identificação das condições que afetam a estabilidade do ciclista (Whipple, 1899).

Em comparação com modelos anteriores, como os de Collins e Singh, o modelo de Whipple oferece uma descrição mais precisa das interações entre os componentes da bicicleta, evitando simplificações excessivas que podem comprometer a validade dos resultados (Singh; Goel, 1984) (Hand, 1988).

Além disso, estudos mais recentes aplicam o modelo de Whipple a bicicletas modernas, incluindo aquelas com assistência elétrica, confirmando sua relevância contínua. Enquanto muitos modelos alternativos não consideram adequadamente as variações geométricas da bicicleta em função do ângulo de inclinação e de esterçamento, o modelo de Whipple integra essas variáveis, proporcionando uma compreensão mais robusta da dinâmica envolvida. Assim, sua comparação com outros modelos evidencia tanto suas vantagens em termos de precisão quanto sua aplicabilidade em contextos contemporâneos e variados.

Após aproximadamente sete décadas, os estudos retornaram à tona com uma das primeiras investigações sobre a estabilidade de um veículo *single track* utilizando as propriedades dos pneus (Sharp, 1971). Em seu estudo, Sharp (1971) representa uma contribuição significativa para a compreensão das dinâmicas de motocicletas,

abordando aspectos fundamentais da estabilidade e controle em diferentes condições de condução. Sharp (1971) desenvolve um modelo inovador que integra características essenciais do comportamento dinâmico das motocicletas, incluindo a interação entre o sistema de suspensão, o contato do pneu com a estrada e as forças laterais e longitudinais. Este trabalho não apenas analisa as propriedades dinâmicas em situações de manobra, mas também propõe um modelo de pneus que permite prever com precisão o torque de direção em função da aceleração lateral, demonstrando a importância da geometria do contato pneu/estrada e das propriedades de relaxamento dos pneus para a estabilidade geral do veículo.

Além disso, o estudo destaca como variáveis a largura dos pneus e as características do piloto influenciam diretamente o comportamento da motocicleta, corroborando a visão comum de que pilotos mais leves podem enfrentar problemas de oscilação mais frequentemente do que pilotos mais pesados. Ao empregar simulações e comparações com dados experimentais, Sharp (1971) valida seu modelo e fornece percepções valiosas para o conceito e análise de motocicletas contemporâneas. Este trabalho não só avança a teoria sobre a dinâmica de motocicletas, mas também estabelece uma base sólida para futuras pesquisas e inovações na área, enfatizando a relevância contínua da investigação sobre segurança e desempenho em veículos de duas rodas.

Em meados de 1980, Koenen publicou um estudo sobre estabilidade de motocicletas que abordou, principalmente, valores elevados de acelerações laterais envolvendo grandes ângulos de rolagem (em torno de 30°), levando à necessidade de desenvolver modelos detalhados de pneus (Koenen, 1980). Esses estudos foram necessários por ter sido desenvolvido um modelo mais complexo do veículo, assim como sua interação entre o pneu e o solo. É possível ressaltar também que Koenen (1980) oferece uma análise aprofundada das dinâmicas vibracionais que ocorrem em motocicletas durante a condução em curvas, um aspecto crucial para a segurança e o conforto do piloto. Koenen (1980) investiga como as vibrações se manifestam em diferentes frequências e modos, influenciando não apenas a estabilidade da motocicleta, mas também a experiência do piloto. A pesquisa é fundamentada em modelos matemáticos que descrevem as interações entre as forças atuantes na motocicleta, incluindo o impacto das características do terreno e das condições de manobra. Ao explorar os modos vibracionais, o estudo destaca a importância de considerar as respostas dinâmicas da motocicleta em situações reais de condução, contribuindo para um entendimento mais abrangente da mecânica de veículos de duas rodas.

Além disso, Koenen (1980) utiliza simulações e análises experimentais para validar suas teorias, oferecendo dados quantitativos que elucidam como as vibrações podem ser gerenciadas para melhorar o desempenho e a segurança das motocicletas. Este trabalho não apenas avança a compreensão teórica sobre a dinâmica vibracional

de motocicletas, mas também sugere direções práticas para o conceito e a engenharia de veículos, visando otimizar o conforto do piloto e minimizar os riscos associados a oscilações indesejadas durante a condução em curvas. Assim, a pesquisa de Koenen (1980) se insere como uma contribuição relevante na literatura sobre dinâmica de motocicletas, com implicações diretas para a segurança e inovação no setor.

Por fim, foram também realizados estudos para o desenvolvimento de equações dinâmicas não lineares em curva em regime constante (Cossalter *et al.*, 1999). Esse estudo é uma contribuição fundamental para a compreensão das dinâmicas envolvidas na manobra de veículos de duas rodas, especialmente em curvas. Os autores investigam as condições de estabilidade e controle durante a realização de curvas, abordando aspectos críticos como a interação entre a geometria do veículo, as forças atuantes e o comportamento do piloto. Utilizando modelos matemáticos avançados, o estudo analisa como diferentes parâmetros, como a inclinação e a velocidade, influenciam o desempenho e a segurança das motocicletas durante as manobras. Essa análise é particularmente relevante, pois permite identificar os limites operacionais e as condições que podem levar à perda de controle, oferecendo conhecimentos valiosos para o projeto e a engenharia de motocicletas.

Além disso, Cossalter *et al.* (1999) utilizam simulações numéricas para validar suas teorias, proporcionando uma base empírica que complementa a modelagem teórica. O trabalho destaca a importância da dinâmica de veículos de duas rodas em contextos práticos, como na formação de pilotos e no desenvolvimento de tecnologias que visam melhorar a segurança nas estradas. Ao explorar as nuances da manobra em curvas, o estudo não apenas avança o conhecimento acadêmico sobre a dinâmica de motocicletas, mas também estabelece direções para futuras pesquisas e inovações no campo da mobilidade urbana e da segurança viária. Assim, a pesquisa se insere em um contexto mais amplo de preocupação com a segurança dos usuários de veículos motorizados, refletindo a necessidade contínua de aprimoramento nas práticas de engenharia e desenho de produto automotivo.

Donadio (2009) em seu trabalho, realiza a análise da dinâmica de uma motocicleta para uma curva em regime constante. Porém, seu estudo foi voltado a uma análise comparativa com os modelos matemáticos já existentes e como próximos passos, seria a implementação desses modelos em um programa comercial que realizasse a simulação de uma motocicleta em um percurso com valores de velocidade e percurso que pudessem ser variados. Com isso, foi adotado a utilização do MotorcycleMaker para continuação dos estudos e realizar uma análise comparativa sobre os dados de uma motocicleta real e os dados de uma simulação de um percurso pré definido.

2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A história das motocicletas é um relato rico e multifacetado que reflete não apenas inovações tecnológicas, mas também transformações sociais e culturais ao longo do tempo. A primeira motocicleta, concebida em 1885 por Gottlieb Daimler e Wilhelm Maybach, utilizava um motor de combustão interna e estabeleceu as bases para o desenvolvimento subsequente desse meio de transporte (Falco, 2017). Desde então, as motocicletas evoluíram de simples veículos utilitários para símbolos de liberdade e rebeldia, especialmente a partir da metade do século XX, quando se tornaram ícones culturais.

Nos primórdios do século XX, a produção em massa de motocicletas começou a ganhar impulso, com marcas como Harley-Davidson e Indian Motorcycle Co. se destacando no mercado (Krens, 1998). Durante as duas guerras mundiais, essas máquinas provaram seu valor nas forças armadas, evidenciando sua versatilidade e eficiência em terrenos variados. Após o conflito, a popularidade das motocicletas como meio de transporte pessoal cresceu exponencialmente, especialmente nos Estados Unidos, onde surgiram clubes de motociclistas e uma cultura própria em torno do motociclismo.

A partir da década de 1950, a motocicleta passou a ser associada a um estilo de vida específico, reforçado pela representação midiática em filmes como "O Selvagem" e "Easy Rider" (Moto, 2024b). Essa nova imagem do motociclista como um símbolo de liberdade pessoal e aventura ajudou a moldar diversas subculturas dentro do motociclismo, que continuam a prosperar até os dias atuais.

Atualmente, as motocicletas são reconhecidas globalmente por sua diversidade e adaptabilidade, abrangendo uma ampla gama de estilos que atendem às necessidades dos motociclistas contemporâneos. Com o avanço das tecnologias elétricas e uma crescente conscientização sobre questões ambientais, a evolução das motocicletas promete continuar a se desdobrar em novas direções.

2.3 CATEGORIAS DE MOTOCICLETAS

Dentro do vasto universo das motocicletas, que são uma subcategoria dos veículos automotores, é possível identificar atualmente onze tipos distintos. Cada uma dessas categorias apresenta características específicas que se manifestam em seus componentes, estilo e desempenho. Segundo o site da Motonline (2023), essas onze categorias são:

- *Street*;
- *Trail*;
- Motoneta;

- *Scooters*;
- *Naked*;
- *Big Trail*;
- *Off-Road*;
- *Custom*;
- *Sport*;
- Ciclomotor;
- *Touring*.

A categorização das motocicletas não se limita apenas a aspectos técnicos, mas também considera o tipo de terreno para o qual cada modelo é projetado e sua adequação para a circulação em vias públicas (Moto, 2024a).

As motocicletas variam amplamente em termos de cilindrada, ergonomia e finalidade de uso, refletindo as diversas necessidades e preferências dos motociclistas. Por exemplo, enquanto algumas são otimizadas para o transporte urbano, oferecendo agilidade e economia de combustível, outras são concebidas para aventuras off-road ou para proporcionar experiências de alto desempenho em pistas. Essa diversidade é fundamental para atender a um público heterogêneo, que busca desde a praticidade no dia a dia até a emoção das competições esportivas (Autoesporte, 2019).

Além disso, as regulamentações que definem a permissão para pilotagem em vias públicas também desempenham um papel crucial na categorização das motocicletas. Isso implica que certas classes de motos podem ser restritas a ambientes específicos ou exigem licenças especiais para sua condução (Wikipedia, 2023). Assim, compreender as nuances entre os diferentes tipos de motocicletas é essencial não apenas para a escolha do modelo mais adequado às necessidades individuais, mas também para garantir uma utilização segura e responsável nas diversas situações que o motociclismo pode apresentar.

2.3.1 Motocicletas do tipo *Trail*


As motocicletas do tipo *trail* são projetadas para oferecer versatilidade em diversos ambientes, combinando características de desempenho tanto em vias pavimentadas quanto em terrenos off-road. Essa categoria é reconhecida por sua capacidade de transitar suavemente por estradas urbanas, ao mesmo tempo em que enfrenta com destreza trilhas e estradas de terra (Autoesporte, 2019). As motos *trail* possuem um conceito robusto, com suspensões de longo curso que podem chegar a 30 cm, proporcionando uma excelente absorção de impactos e uma altura do solo elevada, que facilita a transposição de obstáculos (Motonline, 2023).

Os motores dessas motocicletas são geralmente otimizados para oferecer torque em baixas rotações, o que garante força e controle em terrenos desafiadores.

Além disso, as *trail* são equipadas com pneus adequados para diferentes superfícies, permitindo uma aderência eficaz tanto em solo firme quanto em condições adversas (Motos, 2023). A ergonomia das motos *trail* também é um aspecto importante, pois seus bancos são projetados para proporcionar conforto durante longas viagens e aventuras.


A popularidade das motocicletas *trail* se consolidou desde a década de 1980, quando modelos icônicos como a Honda XL 250R foram introduzidos no mercado brasileiro. Essa popularidade é possível de observar até os dias atuais pelas Figuras 1 e 2 que apontam um panorama do emplacamento das motocicletas no mês de agosto dos anos de 2023 e 2024, respectivamente pela Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE).

Figura 1 – Emplacamento de motocicletas em Agosto/2023

Segmentos	2023 Ago (A)	2023 Jul (B)	2023 Acumulado (C)	2022 Ago (D)	2022 Acumulado (E)
 Motos	142.714	123.051	1.045.494	118.556	862.847
Trail/Fun					
Modelo	2023 Jul	2023 Ago	2023 Acumulado	Part.	
1° HONDA/NXR160	11.594	14.119	▲	99.776	49,46%
2° YAMAHA/XTZ 250	3.615	3.668	▲	29.926	14,84%
3° HONDA/XRE 190	3.274	3.229	▼	23.710	11,75%
4° YAMAHA/CROSSER 150	3.169	3.709	▲	22.167	10,99%
5° HONDA/XRE 300	388	411	▲	11.596	5,75%
6° SHINERAY/XY 125	1.062	1.263	▲	7.434	3,69%
7° BMW/G310 GS	370	347	▼	2.041	1,01%
8° DAFRA/NH 190	101	120	▲	1.096	0,54%
9° HAOJUE/NK 150	130	137	▲	1.002	0,50%
10° KAWASAKI/VERSYS 300	98	119	▲	760	0,38%
Total	24.145	27.459	▲	201.719	100%

Fonte: (FENABRAVE, 2023).

Figura 2 – Emplacamento de motocicletas em Agosto/2024

Segmentos	2024 Ago (A)	2024 Jul (B)	2024 Acumulado (C)	2023 Ago (D)	2023 Acumulado (E)
 Motos	163.882	156.810	1.253.627	142.713	1.045.483

Trail/Fun					
	Modelo	2024 Jul	2024 Ago	2024 Acumulado	Part.
1º	HONDA/NXR160	12.465	12.701	▲	104.755 44,20%
2º	YAMAHA/XTZ 250	4.281	4.263	▼	31.101 13,12%
3º	HONDA/XRE 300	3.619	3.058	▼	30.461 12,85%
4º	YAMAHA/CROSSER 150	3.282	3.589	▲	24.310 10,26%
5º	HONDA/XRE 190	2.492	3.467	▲	19.830 8,37%
6º	SHINERAY/XY 125	2.555	2.559	▲	17.757 7,49%
7º	BMW/G310 GS	270	243	▼	1.883 0,79%
8º	HAOJUE/NK 150	163	146	▼	1.230 0,52%
9º	DAFRA/NH 190	173	143	▼	1.010 0,43%
10º	KAWASAKI/VERSYS 300	141	119	▼	979 0,41%
Total		30.024	31.726	▲	237.005 100%

Fonte: (FENABRAVE, 2024).

Tabela 1 – Quantidade de motocicletas vendidas em agosto de 2023 e 2024

Ano	Quantidade de motocicleta vendida (<i>trail</i>)	Quantidade de motocicleta vendida (Total)
Agosto 2023	27459	142714
Agosto 2024	31726	163882

Fonte: (FENABRAVE, 2023) e (FENABRAVE, 2024).

Atualmente, de acordo com a Tabela 1, as motocicletas da categoria *trail* representam aproximadamente 20% das vendas no país, evidenciando seu apelo entre os motociclistas que buscam um veículo capaz de atender tanto ao uso diário quanto a pequenas aventuras fora da estrada. Assim, as motocicletas *trail* se destacam como uma escolha ideal para aqueles que valorizam a versatilidade e o desempenho em uma única máquina.

2.4 CARACTERÍSTICAS DA MOTOCICLETA

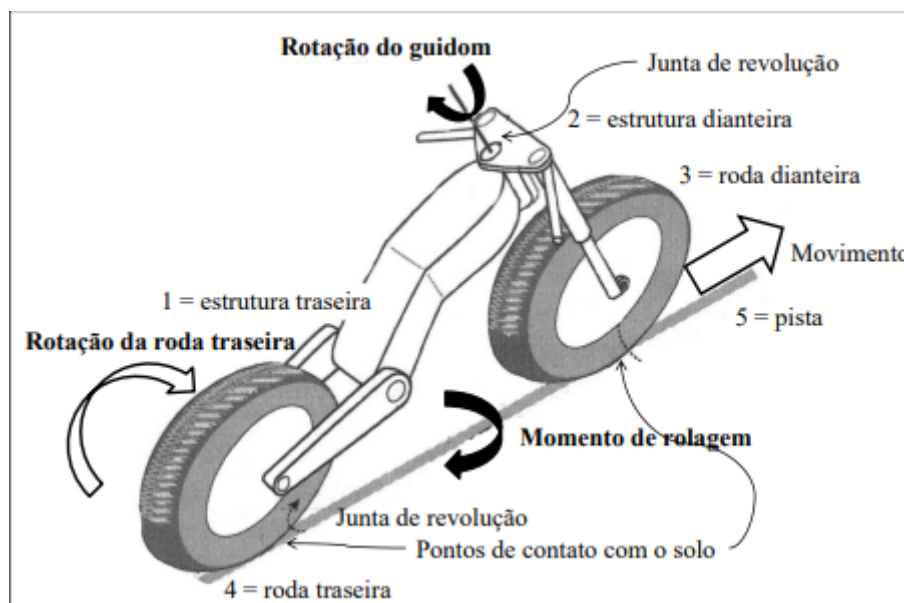
Apesar das motocicletas serem compostas por uma grande variedade de componentes mecânicos (motor, suspensão, chassi, etc.) do ponto de vista cinemático é possível adotar uma hipótese, a suspensão é considerada rígida e os demais subsistemas agrupados em quatro corpos rígidos, conforme estabelecidas por Cossalter *et al.* (1999):

- Estrutura traseira: Composta pelo quadro (chassi), motor, transmissão, assento e reservatório de combustível;
- Estrutura dianteira: Composta pelo guidom e pelo garfo;
- Roda dianteira;
- Roda traseira.

Estes corpos rígidos tem o papel de simplificar e englobar todos os componentes principais presente em uma motocicleta, com o intuito de realizar de forma simplificada a análise da dinâmica vertical, lateral e longitudinal dessa categoria de automóvel. Todos são conectados por três juntas de revolução, sendo uma dedicada ao eixo de esterço e as outras duas uma para cada roda e estão em contato com o solo por dois pontos de contato gerados pela interface pneu/solo.

Como as juntas de revolução são responsáveis pelo movimento de rotação relativa entre dois elos e, dependendo do formato que estão ligadas, é possível ter a restrição do movimento. Dessa forma, cada junta restringe três graus de liberdade de translação e dois de rotação. Porém, cada ponto de contato do pneu/solo permite cinco graus de liberdade, sendo três de rotação e dois de translação (translação no plano de contato). Todos esses componentes podem ser observados por meio da Figura 3.

Figura 3 – Estrutura cinemática de uma motocicleta



Fonte: Adaptado de Cossalter et al. (1999, p. 3).

Sendo assim, por possuímos três juntas de revolução, tem-se inibidos 15 graus de liberdade. Ademais, há também dois graus de liberdade que são inibidos pelo contato do pneu/solo de cada roda (dianteira e traseira), totalizando 17 graus de liberdade inibidos. Como existe um total de 4 estruturas rígidas e cada uma a priori possuem seis graus de liberdade (três de rotação e três de translação), podemos chegar que o total de graus de liberdade inicial são 24 e após a adição de todas as juntas, tem-se um total de sete graus de liberdade, os quais podemos citar:

- Descolamento de tração à frente da motocicleta;
- Movimento de rolagem;
- Rotação do guidom;

- Escorregamento longitudinal da roda dianteira (frenagem);
- Escorregamento longitudinal da roda traseira (tração ou frenagem);
- Escorregamento lateral da roda dianteira;
- Escorregamento lateral da roda traseira.

De todos esses sete graus de liberdade, os associados ao movimento principal da moto são o de deslocamento longitudinal, movimento de rolagem e a rotação do guidom. Em conjunto, esses três graus são controlados pelo piloto de acordo com seu estilo de pilotagem. Mas os outros quatro graus de liberdade ainda assim, são de extrema importância pois são variáveis no tempo que se alteram e modificam a resposta do veículo, visto que, conforme Pacejka e Besselink (1997), o pneu não é uma estrutura rígida e conforme é realizado um contorno, o mesmo tende a se deformar por conta de sua estrutura maleável, não sendo apenas uma estrutura de rotação e tração no veículo.

É possível observar que existem muitas variáveis que diferem das visualizadas em um carro. Além da diferença de graus de liberdade entre um veículo e outro, tem-se os parâmetros construtivos de ambos, ou seja, existem variáveis extremamente importantes em uma motocicleta, como o *fork offset* (distância entre o eixo de rotação da estrutura dianteira - guidom - e o centro da roda) que não existem em um carro. Esse valor é de extrema importância pois altera principalmente na movimentação da roda dianteira quando a mesma está esterçada.

As principais referências para uma motocicletas são:

- p : Distância entre eixos;
- d : *Fork offset*;
- ϵ : Ângulo de cáster;
- R_r : Raio da roda traseira;
- R_f : Raio da roda dianteira;
- t_r : Raio da seção transversal da roda traseira;
- t_f : Raio da seção transversal da roda dianteira.

Outros parâmetros geométricos são expressos em termos destas variáveis, pelas equações:

$$\rho_r = R_r - t_r \quad (1)$$

$$\rho_f = R_f - t_f \quad (2)$$

$$a_n = R_f \cdot \sin(\epsilon) - d \quad (3)$$

$$a = \frac{a_n}{\cos(\epsilon)} = R_f \cdot \tan(\epsilon) - \frac{d}{\cos(\epsilon)} \quad (4)$$

As equações 1 e 2 condizem com o valor do raio do centro do toróide traseiro (ρ_r) e dianteiro (ρ_f), respectivamente. A equação 3 está relacionada ao *normal trail*

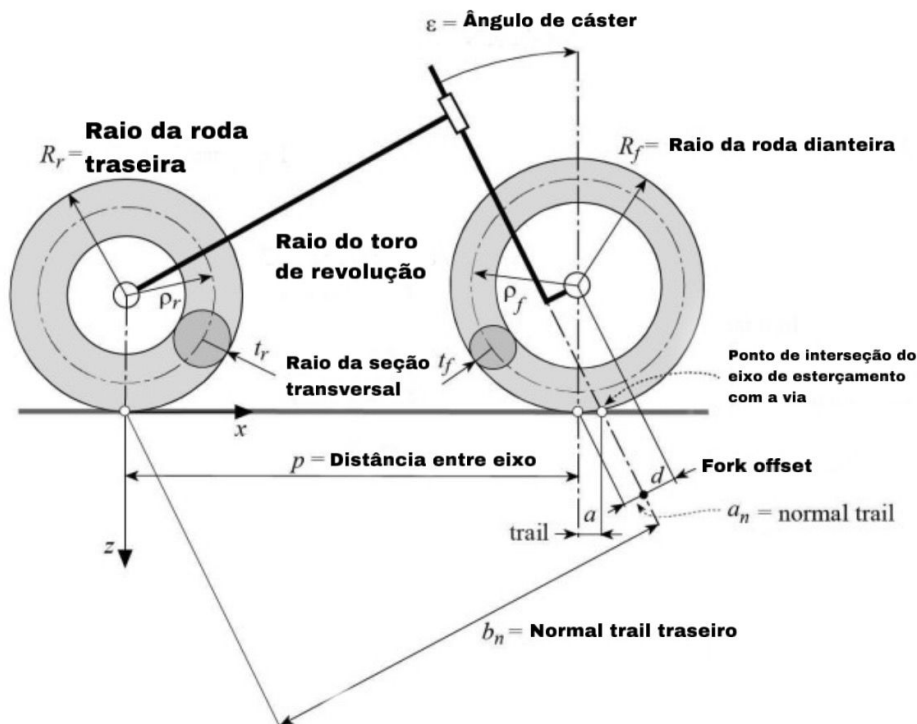
(a_n) da motocicleta. Por fim, a equação 4 condiz ao *mechanical trail* (a) da motocicleta. Todos estes parâmetros são medidos/quantificados com a motocicleta em posição vertical e o ângulo de esterço igual a zero.

Geralmente, o aumento do entre-eixos (distância entre os pontos de contato do pneu com o solo), assumindo que os outros parâmetros permanecem constantes, resulta em, segundo Cossalter *et al.* (1999):

- Aumento na estabilidade da motocicleta;
- Aumento do torque aplicado ao guidom em uma curva;
- Aumento do raio mínimo de curvatura prejudicando a manobrabilidade;
- Redução do movimento de *pitch* produzido por irregularidades da pista;
- Redução da transferência de carga entre as duas rodas durante a frenagem e a aceleração, resultando na redução do movimento de *pitch*.

Existe também o *trail*, distância entre o ponto de contato da roda dianteira e o ponto de intersecção do eixo de rotação da direção com o solo medido no plano do solo, sendo importante também para a manobrabilidade da motocicleta. Além desses parâmetro, pode-se observar outros conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Geometria de uma motocicleta



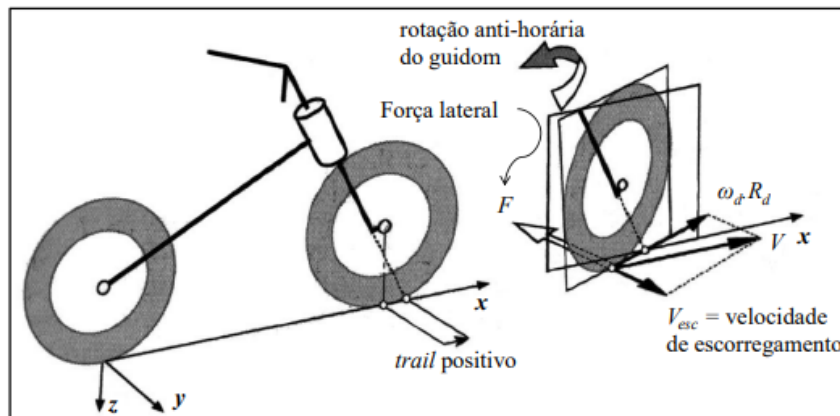
Fonte: Adaptado de Cossalter (2006).

O *trail* e o ângulo de cáster são muito importantes para o sistema de direção, pois a definição de manobrabilidade e estabilidade direcional da motocicleta estão

diretamente associadas a esses parâmetros. Geralmente, para se ter uma boa manobrabilidade da motocicleta, o aumento do ângulo de cáster deve ser acoplado com o correspondente aumento do *trail*, visto que um pequeno ângulo de cáster produz um notável esforço no garfo durante a frenagem e por ser um componente deformável flexionalmente e torsionalmente, pequenos valores de deslocamento provocam vibrações perigosas no sistema estrutural dianteiro (Zimmerman, 2015).

O *trail* está relacionado principalmente à estabilidade da motocicleta, especialmente em movimento retilíneo. A força de atrito F atua no pneu dianteiro. Esta força é paralela a velocidade de escorregamento, mas possui sentido oposto, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Modelagem do *trail* em uma motocicleta.

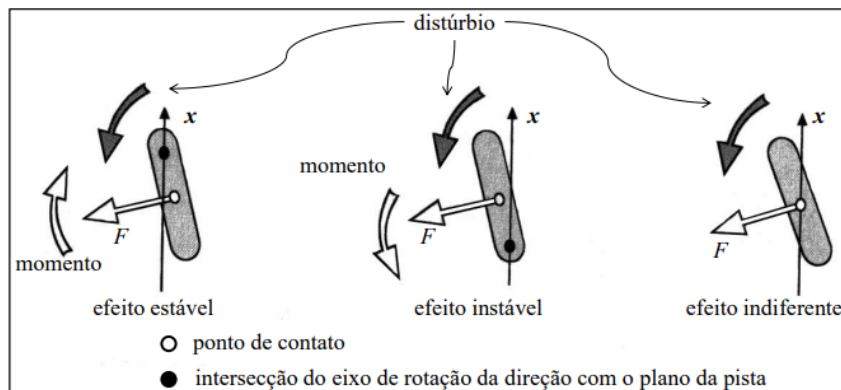


Fonte: Adaptado de Cossalter et al. (1999, p. 6).

Existem três possibilidades de *trail*, positivo, neutro e negativo. O ideal é ter um *trail* positivo pois com esse ajuste gera-se um momento contra esterçante, auxiliando no auto-alinhamento do pneu dianteiro no momento que se realiza curvas. Segundo Zimmerman (2015), o *trail* neutro gera um efeito indiferente no momento de realizar uma curva. Já o *trail* negativo, considerando que a força de atrito F é sempre na direção oposta da velocidade de escorregamento, surge um momento ao redor do eixo de rotação da direção que tende a aumentar o esterçamento para o sentido da curva que está sendo realizada.

Esse efeito é indesejado pois reduz o controle do piloto sobre o equipamento, visto que ao movimentar o guidom para algum lado para realizar a curva, ao em vez de tender a retornar para a neutralidade, ou seja, alinhar a moto, esse momento faz com que o guidom rotacione mais no sentido da curva, fazendo com que o piloto possa perder o controle da motocicleta. Com esse efeito causado pelo *trail*, a possibilidade de acontecer acidentes eleva-se pois as condições da pista podem favorecer essa rotação indesejada do guidom. Todos esses três modos podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 – Efeito do *trail* positivo, neutro e negativo em uma motocicleta.



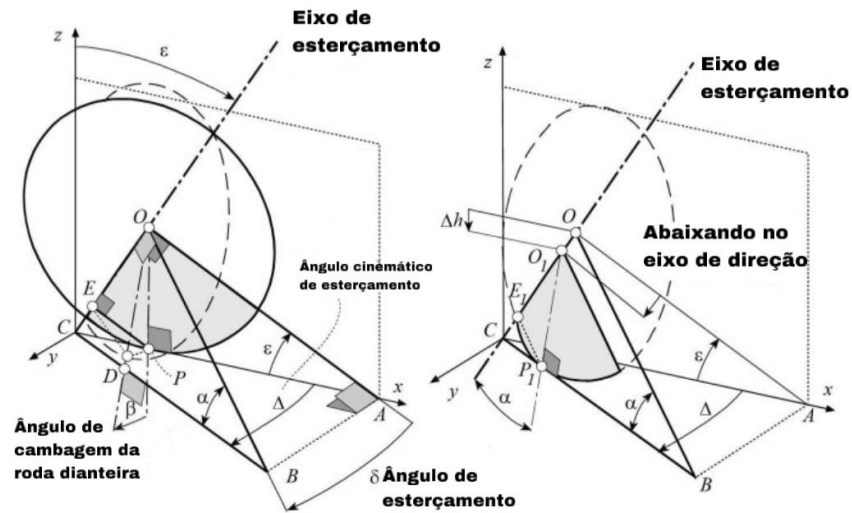
Fonte: Adaptado de Cossalter et al. (1999, p. 8).

Vinculado com esse parâmetro, temos também o *fork offset*. Esse parâmetro, assim como o *trail*, influencia em seu comportamento e sua manobrabilidade e ambos estão correlacionados. Um maior *fork offset* geralmente resulta em um menor *trail*, o que pode aumentar a agilidade da motocicleta, enquanto um menor *fork offset* tende a aumentar o *trail*, proporcionando maior estabilidade em altas velocidades (Cossalter, 2006).

O *fork offset* desempenha um papel crucial na percepção de direção e na estabilidade da motocicleta. Um aumento no *fork offset* tende a resultar em uma maior responsividade da motocicleta, porém, isso pode comprometer sua estabilidade. Em contrapartida, um *fork offset* reduzido pode proporcionar uma experiência de condução mais estável, mas pode limitar a agilidade do veículo. Essa relação entre responsividade e estabilidade é fundamental para a categoria e a configuração das motocicletas, pois diferentes aplicações exigem diferentes características de manuseio.

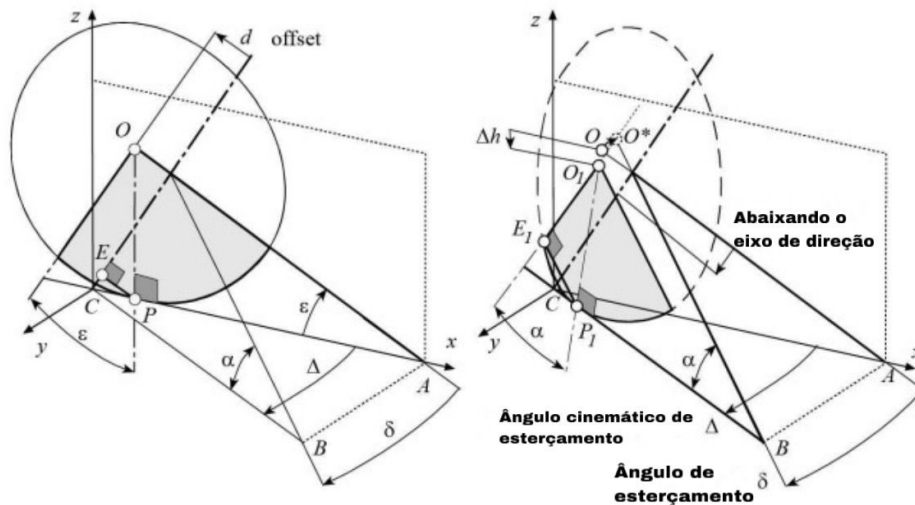
De acordo com Cossalter (2006), ao utilizar o *fork offset* em uma motocicleta, é possível reduzir o deslocamento do centro da roda dianteira do veículo, quando comparada com a motocicleta em curva e na vertical, o que contribui para a estabilidade. Isso pode ser observado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Geometria do sistema de direção com a motocicleta em posição vertical e sem *fork offset*.



Fonte: Adaptado de Cossalter (2006).

Figura 8 – Geometria do sistema de direção com a motocicleta em posição vertical e com *fork offset*.



Fonte: Adaptado de Cossalter (2006).

Com isso, após a realização dos cálculos para determinar a distância do centro da roda (Δh) em ambos os casos, foi verificado que no caso com o *fork offset* essa distância era menor por conta do centro da roda não estar na mesma linha que o centro de rotação (Cossalter, 2006). Essa diferença pode ser observada nas equações 5 e 6 abaixo, representando o cálculo sem e com *fork offset* respectivamente.

$$\Delta h = R_f(1 - \sqrt{1 - \sin^2\delta \cdot \sin^2\epsilon}) \quad (5)$$

$$\Delta h = R_f(1 - \sqrt{1 - \sin^2\delta \cdot \sin^2\epsilon}) - d \cdot \sin\epsilon \cdot (1 - \cos\delta) \quad (6)$$

Dessa forma, como a equação 6 demonstra, a presença do *fork offset* gera uma redução em relação a não existência desse parâmetro, o qual contribui para a estabilidade da motocicleta.

2.5 PROGRAMA MOTORCYCLEMAKER

O programa MotorcycleMaker, desenvolvido pela IPG Automotive, é uma ferramenta avançada de simulação e modelagem que se destaca na área de engenharia de veículos de duas rodas, como motocicletas, e-bikes e scooters. Desde sua criação, o MotorcycleMaker tem sido projetado para atender às exigências da indústria automotiva moderna, permitindo que engenheiros e designers realizem simulações precisas de desempenho em um ambiente virtual. Essa abordagem não apenas acelera o processo de desenvolvimento, mas também reduz custos associados a testes físicos, que podem ser dispendiosos e logisticamente complexos.

A história do MotorcycleMaker reflete a evolução das práticas na engenharia automotiva. Com o aumento da complexidade dos veículos modernos, como as abordadas por Cossalter (2006) em seus estudos sobre a dinâmica da motocicleta e a necessidade crescente por soluções mais seguras e eficientes, o desenvolvimento de programas como o MotorcycleMaker tornou-se essencial. Ao longo dos anos, a IPG Automotive tem continuamente atualizado e aprimorado o código computacional, incorporando o parecer dos usuários e avanços tecnológicos para manter sua relevância no mercado (IPG Automotive, 2023).

Em suma, o MotorcycleMaker não apenas representa uma inovação significativa na simulação de veículos de duas rodas, mas também se estabelece como uma plataforma para engenheiros, desenhista de produto e pesquisadores que buscam otimizar o desempenho e a segurança das motocicletas.

2.5.1 Funcionalidades e ferramentas

As aplicações do MotorcycleMaker são diversas. Ele pode ser utilizado para otimizar a dinâmica de motocicletas, melhorar a segurança do piloto por meio da análise de estabilidade em manobras críticas e desenvolver sistemas avançados de assistência ao condutor (ADAS). A capacidade de realizar simulações detalhadas permite que os engenheiros identifiquem problemas potenciais antes da fabricação física dos veículos, contribuindo para um processo de desenvolvimento mais eficiente.

O MotorcycleMaker oferece uma gama diversificada de ferramentas que possibilitam a modelagem detalhada de diversos componentes da motocicleta, incluindo o quadro, suspensão, sistema de transmissão e pneus. Os usuários podem criar protótipos virtuais a partir de modelos 3D, ajustando parâmetros como geometria do veículo, características dos pneus e configurações do piloto. Ademais, o programa possui uma

interface gráfica a qual facilita a manipulação desses parâmetros, permitindo simulações em tempo real que refletem condições reais de condução. Uma das características mais notáveis do MotorcycleMaker é sua capacidade de realizar análises dinâmicas complexas. O código computacional permite simular manobras específicas, como curvas e frenagens, e avaliar o comportamento do veículo sob diferentes condições de aderência e velocidade.

2.6 SENSORES

Com o objetivo de realizar uma análise do comportamento dinâmico de uma motocicleta por meio da utilização de um programa computacional (MotorcycleMaker), foi necessário realizar a instrumentação da motocicleta utilizada para captura de dados para posterior análise e comparação com os dados do programa.

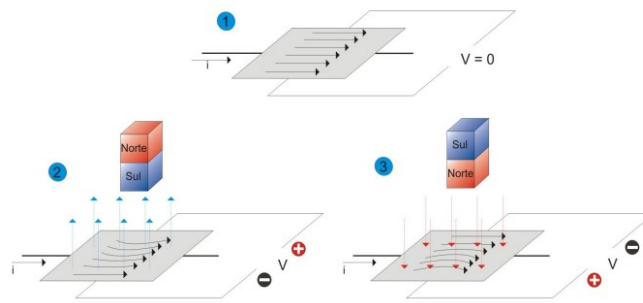
De acordo com Park e Mackay (2003), a aquisição de dados é o processo em que fenômenos físicos são transformados em sinais elétricos que são medidos e convertidos em sinais digitais para posterior processamento, análise e armazenamento em um computador. Dessa forma, para a aquisição desses dados, os seguintes sensores serão utilizados:

- Sensor Hall;
- Sensor de esterçamento;
- Sensor de inclinação com 10 eixos.

2.6.1 Sensor Hall

O sensor de efeito Hall é um dispositivo semicondutor amplamente utilizado para a detecção de campos magnéticos, operando com base no princípio do Efeito Hall, descoberto por Edwin Hall em 1879. Este efeito ocorre quando um campo magnético é aplicado perpendicularmente a um condutor que transporta corrente elétrica, resultando na geração de uma diferença de potencial elétrico, conhecida como tensão Hall (Purcell; Morin, 2013). A configuração típica de um sensor Hall inclui um chip semicondutor, um ímã permanente e circuitos de processamento que convertem a tensão gerada em um sinal elétrico utilizável. Quando o sensor é exposto a um campo magnético, os portadores de carga no material semicondutor são desviados, criando uma separação de cargas e gerando uma tensão que pode ser medida e utilizada em diversas aplicações, como monitoramento de rotação em motores e sistemas de ignição em veículos. Essa exposição ao campo magnético e a mudança no comportamento do material semicondutor podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 – Ilustração do efeito Hall.



Fonte: Patsko (2006).

Quando uma corrente elétrica flui através de um material condutor, ela se distribui de maneira uniforme ao longo do mesmo, resultando na ausência de diferença de potencial (tensão) entre as extremidades laterais do material. No entanto, ao aproximar um ímã, o campo magnético interfere na distribuição da corrente, provocando um acúmulo de cargas negativas (elétrons) em um dos lados do condutor. Esse fenômeno gera uma tensão, denominada como tensão de Hall (V_H), entre as laterais do material. Esse efeito pode ser observado na Figura 9.

Essa tensão de Hall pode ser obtida pela equação 7.

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (7)$$

Na equação 7, o I representa a corrente que flui através do condutor, B a intensidade do campo magnético, n é a densidade dos portadores de carga, e é a carga do elétron com valor fixo de $1,6 \cdot 10^{-19}C$ e o t representa a espessura do condutor.

Caso o sentido do campo magnético seja invertido, a tensão gerada também será invertida. Embora essa diferença de tensão seja bastante diminuta, ela pode ser amplificada e monitorada por um circuito externo; tal amplificação já ocorre internamente no sensor (Patsko, 2006).

A saída do sensor pode ser classificada como analógica ou digital. Nos sensores analógicos, a saída corresponde à intensidade do campo magnético que incide sobre eles. Por outro lado, nos sensores digitais, a saída permanece em nível lógico alto na ausência de um campo magnético. Quando o campo magnético ultrapassa um determinado valor limiar, a saída do sensor muda para um nível lógico baixo. Assim, os sensores de efeito Hall digitais atuam como chaves digitais que são acionadas por ímãs. A aquisição de dados por meio do sensor Hall é realizada conectando o dispositivo a um circuito elétrico que alimenta o sensor e coleta a tensão de saída (Patsko, 2006).

Para a medição da velocidade (V), com a utilização desse sensor, é feita a contabilização da variação do tempo entre dois pulsos do sensor. Com essa informa-

ção, é possível realizar um cálculo para a conversão desse tempo para velocidade. Para isso, as informações necessárias são:

- R - Raio do conjunto pneu/roda;
- π - Número de pi;
- Δt - Variação do tempo.

O raio do conjunto pneu/roda denominado R deve ser o mesmo que R_f ou R_r , o qual será definido pela roda a qual o sensor Hall estará fixo. Dessa forma, com essas informações, é possível fazer a conversão utilizando a Equação 8.

$$V = \frac{2 * \pi * R}{\Delta t} \quad (8)$$

2.6.2 Sensor de esterçamento

O sensor de ângulo magnético AS5600 é um dispositivo utilizado para medir a posição angular de um eixo, baseado no princípio do efeito Hall. Este sensor opera pela detecção de campos magnéticos gerados por um ímã permanente, que deve ser acoplado ao eixo cuja posição se deseja monitorar. O AS5600 é projetado para fornecer uma saída digital ou analógica proporcional à posição angular, permitindo uma medição precisa e em tempo real. A sensibilidade do sensor é tal que ele pode detectar variações angulares com alta resolução, tornando-o ideal para aplicações em sistemas de controle, automação e robótica.

Esse sensor pode ser caracterizado como um potenciômetro sem contato o qual utiliza o princípio do efeito Hall para a medição da posição angular do eixo. Ou seja, por intermédio desse componente é possível que a mudança de uma variável mecânica, como um ângulo ou uma altura, seja transformada numa mudança de uma característica elétrica (Patsko, 2006).

A aquisição de dados pelo sensor AS5600 é realizada por uma interface digital que comunica os dados de posição ao microcontrolador ou sistema embarcado. O sensor utiliza um protocolo de comunicação I2C, que permite a transmissão eficiente de dados entre o sensor e o dispositivo controlador (AG, 2023). Após a calibração inicial, o AS5600 fornece leituras contínuas da posição angular, que podem ser utilizadas para retorno em sistemas de controle ou para monitoramento em tempo real. A precisão das medições é garantida por algoritmos internos que compensam variações de temperatura e outras interferências externas, assegurando a confiabilidade dos dados adquiridos.

Além disso, o AS5600 possui recursos adicionais, como a capacidade de armazenar posições zero ajustáveis e a possibilidade de configurar limites de saída. Essas características tornam o sensor extremamente versátil e aplicável em diversas áreas, desde motocicletas até sistemas industriais complexos. A implementação deste

sensor em sistemas dinâmicos contribui significativamente para o aprimoramento da precisão e da eficiência operacional.

2.6.3 Sensor de inclinação com 10 eixos

O sensor de inclinação WitMotion WTGAHRS1 é um dispositivo avançado projetado para medir a inclinação em múltiplos eixos, utilizando tecnologia de sensores inerciais. Este sensor combina um acelerômetro de três eixos e um giroscópio, permitindo a determinação precisa da orientação e movimento em relação à gravidade. O funcionamento do WTGAHRS1 baseia-se na medição das forças de aceleração e na taxa de rotação ao longo dos eixos X, Y e Z, que são processadas para calcular a inclinação angular em relação a um referencial fixo (WitMotion, 2023).

A aquisição de dados pelo sensor WTGAHRS1 é realizada por meio de uma interface de comunicação digital. Após a inicialização, o sensor coleta continuamente dados das suas unidades inerciais internas, que são então filtrados e processados para fornecer informações sobre a orientação do dispositivo. O uso de algoritmos como o filtro de Kalman permite que o sensor combine as medições do acelerômetro e do giroscópio, compensando as limitações de cada um e resultando em leituras mais estáveis e precisas. A saída dos dados pode ser configurada para ser transmitida em tempo real, facilitando a integração com sistemas embarcados ou plataformas de controle.

Além disso, o WTGAHRS1 é acoplado a um dispositivo de *Global Positioning System* (Global Positioning System (GPS)), o qual recebe o sinal e capta as coordenadas do sensor armazenando-as. Com essa informação armazenada, é possível gerar um gráfico de posição para demonstrar o circuito realizado. Esse gráfico consegue comprovar que o circuito realizado nos testes é o mesmo realizado nas simulações do programa MotorcycleMaker.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de analisar o comportamento da dinâmica da motocicleta proposta, foram criados alguns circuitos no software MotorcycleMaker, os quais fossem possíveis de se realizar com a moto. Dessa forma, alguns circuitos foram pré-definidos de acordo com algumas manobras padrões de pilotagem.

As manobras padrões foram primeiro definidas a partir da prova realizada pelo Departamento de Trânsito (Detran), o qual aplica provas para que pessoas possam obter a permissão para pilotar motos. Dentre essas provas, foram observadas que o circuito que as pessoas que estão tentando conquistar a habilitação é um controle de estabilidade, ou seja, precisam realizar curvas em um pequeno espaço e com mudança de direção repentinas, manter a estabilidade sem a utilização dos pés para o equilíbrio e tudo isso a uma velocidade máxima de 20km/h.

Dito isso, como a análise está voltada para o desenvolvimento de projetos e na utilização padrão do veículo - utilização em vias públicas e urbanas, as quais sua velocidade máxima varia entre 40km/h e 60km/h - algumas manobras foram adaptadas e remanejadas para que condiz com a realidade. As adaptações realizadas foram principalmente nos raios de curvatura e nas velocidades que foram realizadas as manobras.

Além disso, todos os testes realizados na motocicleta foram utilizados dois sensores principais para a análise dos dados e comparação com os resultados obtidos nas simulações pelo código computacional.

3.1 INTRODUÇÃO AO MOTORCYCLEMAKER

Assim como mencionado no capítulo 2.5, o programa MotorcycleMaker é uma ferramenta avançada de simulação e modelagem. Com isso, esse programa foi utilizado para geração dos circuitos propostos no presente trabalho, assim como a inclusão dos parâmetros do piloto, das condições de simulação, parametrização da motocicleta utilizada e, ao final da simulação, a geração dos gráficos com os dados para realização da análise e da comparação com os valores obtidos nos testes experimentais.

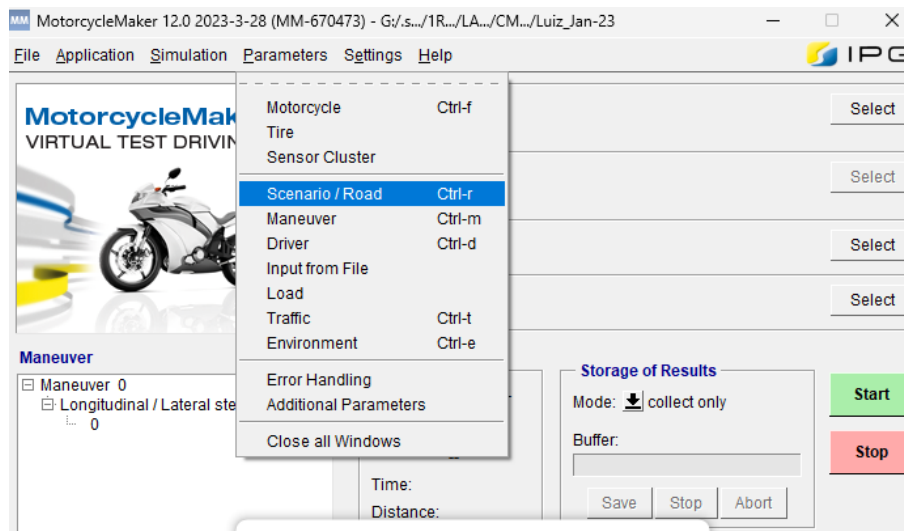
3.1.1 Geração de circuitos

Para a geração de um circuito dentro do programa, é necessário primeiro idealizar qual será o circuito, o ponto de entrada, ponto de saída e se ele irá dar mais de uma volta em algum local em específico ou não. Caso tenha alguma volta repetida em algum momento do percurso, esse caminho deve ser sobreposto ao já existente para

que durante a simulação, o piloto imaginário entenda que deve passar novamente por aquele caminho.

Com o trajeto definido e todas essas nuances determinadas, ao abrir o programa, deve-se ir na aba "*Parameters*" e dentro dessa aba clicar em "*Scenario/Road*" conforme destacado na Figura 10.

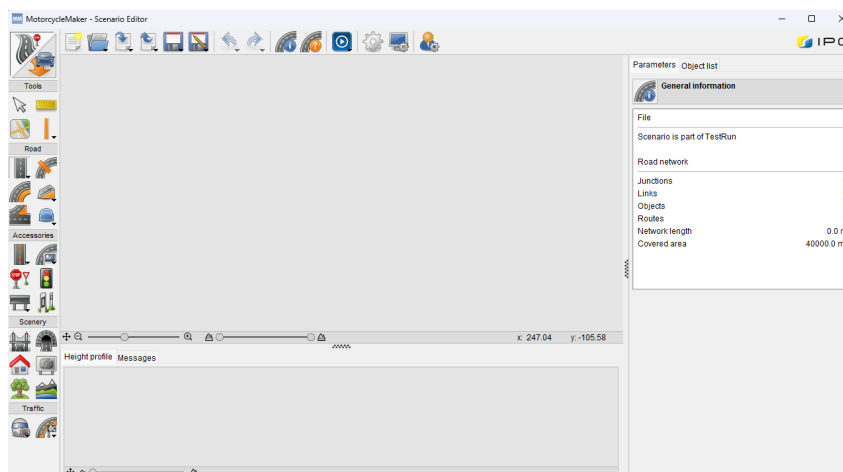
Figura 10 – Local para acessar o modelador de cenário do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

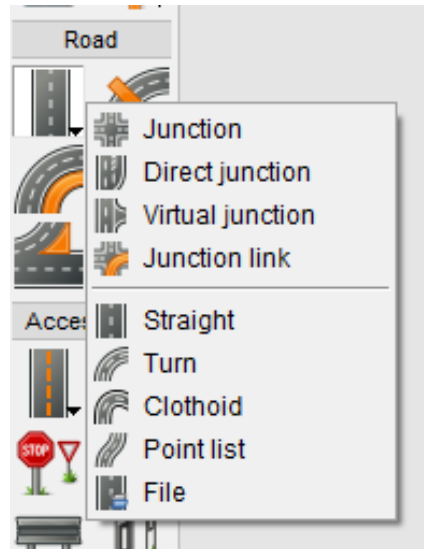
Ao clicar no ícone, uma outra aba irá abrir. Essa aba contém toda a parte de edição do cenário desejado. Ao observar a Figura 11, no canto esquerdo dela é possível identificar todas as ferramentas necessárias para criação de um circuito, localizado no conjunto "*Road*". Para alternar para curva ou outros modelos de circuito, basta ir no primeiro ícone logo abaixo da palavra "*Road*", clicar e segurar para que mostre todos os outros modelos de vias possíveis de serem implementados, conforme Figura 12

Figura 11 – Página inicial do modelador de cenário do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

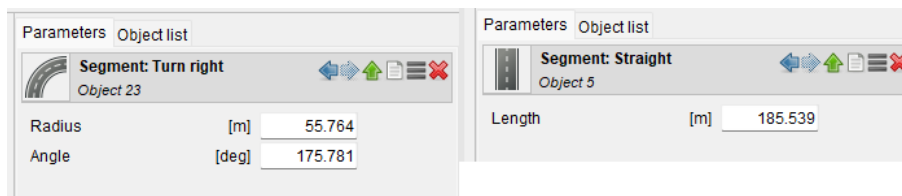
Figura 12 – Modelos de vias disponíveis para edição no modelador de cenário do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Ao selecionar o modelo desejado, basta ir na área de criação do circuito e começar a desenhá-lo. Ao criar alguma via, no canto direito algumas informações novas irão aparecer como comprimento da reta (na direita) ou raio e ângulo (na esquerda) quando for uma curva. Ambas as informações podem ser visualizadas na Figura 13.

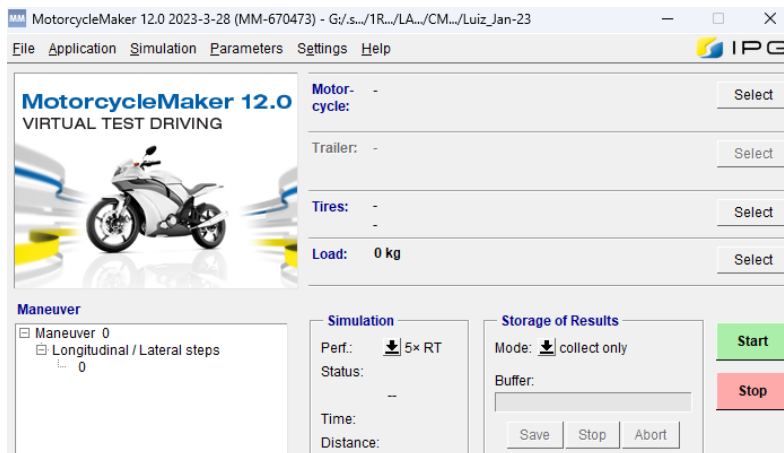
Figura 13 – Configuração de parâmetros para as pistas do modelador de cenário do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Ao finalizar a criação do circuito da forma que deseja basta salvar e fechar a guia para retornar a tela inicial conforme Figura 14.

Figura 14 – Tela inicial do MotorcycleMaker

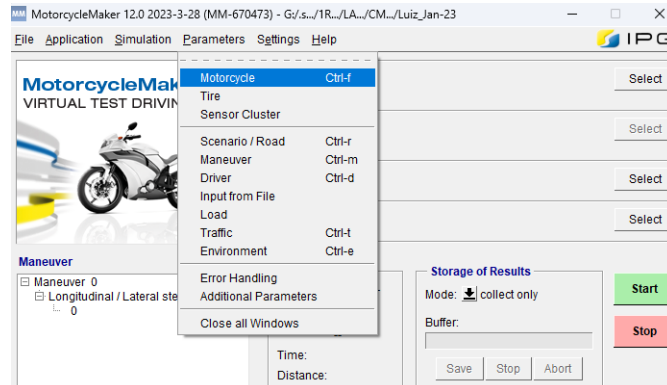


Fonte: Autor.

3.1.2 Definição dos parâmetros da motocicleta

Para a definição dos parâmetros da motocicleta a ser utilizada, deve-se abrir o programa e ir na aba "Parameters" e dentro dessa aba clicar em "Motorcycle" conforme destacado na Figura 15.

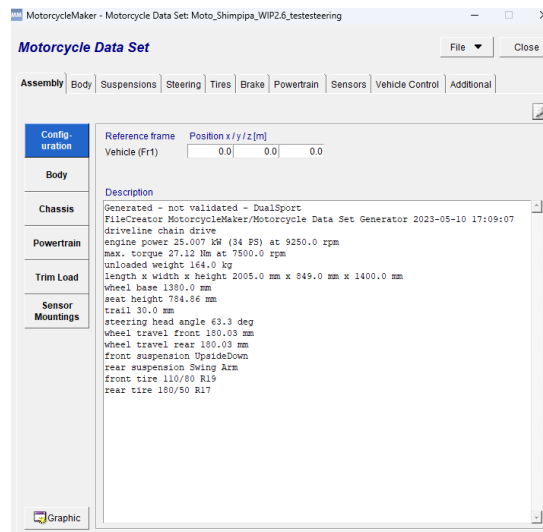
Figura 15 – Local para acessar o modelador de motocicleta do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Ao clicar no ícone em destaque, uma segunda aba irá ser criada e a partir dessa aba serão feitas todas as alterações necessárias para que seja possível replicar a motocicleta dentro do programa. Dentro dessa aba, na parte superior é possível observar uma série de opções a serem selecionadas de sistemas que podem sofrer alteração no programa para replicar a motocicleta idealizada. Essas opções podem ser verificadas na Figura 16.

Figura 16 – Parâmetros que podem ser modificados no modelador de motocicleta do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

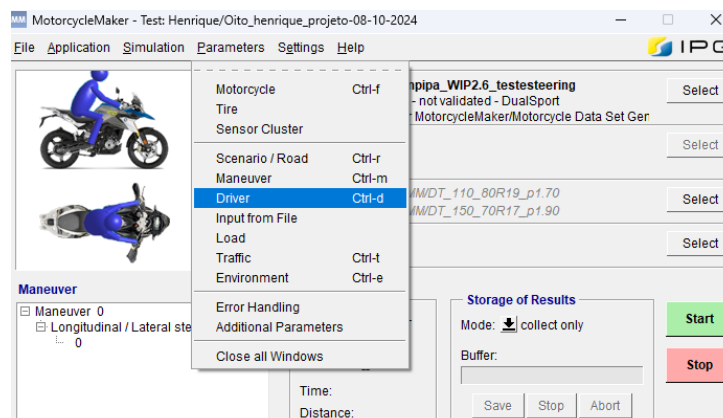
Para o presente trabalho, as informações alteradas no programa foram os dados relacionados ao chassi, suspensão, pneus, freios, trem de força e esterçamento. Essas características foram alteradas por serem as informações mais importantes para a definição de uma motocicleta e, também, são características mensuráveis e possíveis de serem encontradas em referências na internet.

Ao finalizar toda essa parametrização, basta fechar a guia que ela retornará para a página inicial conforme Figura 14.

3.1.3 Definição dos parâmetros do piloto

Dentro do MotorcycleMaker é possível realizar a parametrização de um piloto. Para isso, deve-se abrir o programa e ir na aba "*Parameters*" e dentro dessa aba clicar em "*Driver*" conforme destacado na Figura 17.

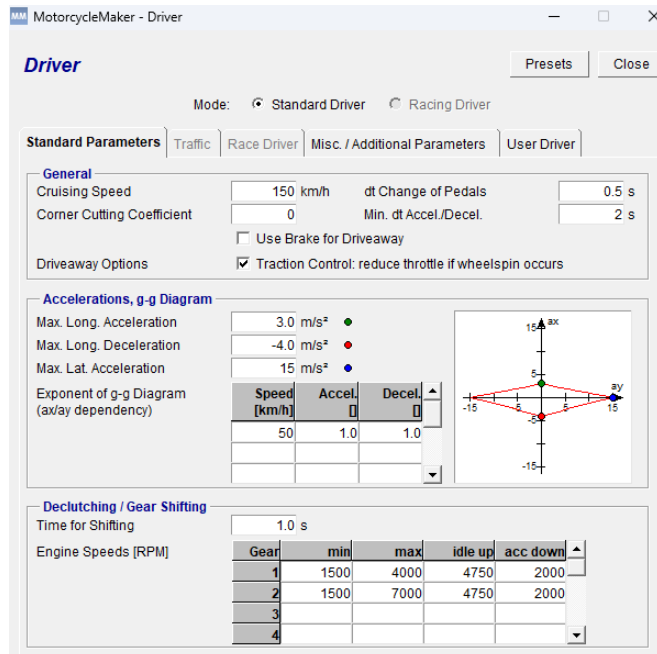
Figura 17 – Local para acessar o modelador de piloto do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Feito isso, uma nova guia será aberta na qual alguns parâmetros que identificam o modelo de pilotagem podem ser definidos, conforme Figura 18.

Figura 18 – Parâmetros que podem ser modificados no modelador de piloto do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Para o presente trabalho, os únicos dados alterados estão localizados na parte inferior da Figura 18 relacionados ao tempo de troca de marcha ("*Time for shifting*") e as rotações para identificar o mínimo e o máximo de rotação do motor para realizar a troca de marcha. Esse parâmetro sofreu alterações para que replique o que foi realizado experimentalmente com relação a marcha que foram realizados os testes.

Assim como Fossa (2019) destaca em sua dissertação, o ponto crucial para a parametrização de um modelo ideal de análise da dinâmica de uma motocicleta está na parametrização do piloto. No entanto, essa parametrização se torna algo de certa forma complexa, visto que não existe um padrão entre o estilo de pilotagem de cada pessoa. Sendo assim, com o intuito de validar a dinâmica da motocicleta, foram utilizados os parâmetros de piloto previamente definidos pelo programa.

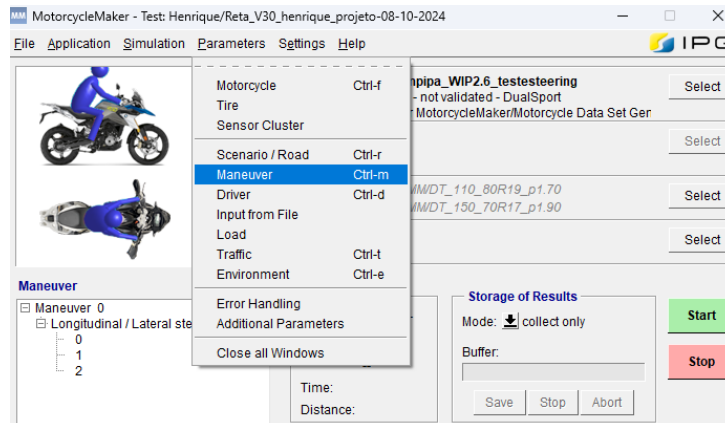
Ao finalizar toda essa parametrização, basta fechar a guia que ela retornará para a página inicial conforme Figura 14.

3.1.4 Definição dos parâmetros de simulação

Após a definição da motocicleta, do piloto e da criação do circuito que deseja percorrer, é necessário iniciar a definição dos parâmetros da simulação que irá realizar. Os principais parâmetros a serem definidos são a velocidade do percurso, aceleração e desaceleração. Para isso, deve-se abrir o programa e ir na aba "*Pa-*

rameters" e dentro dessa aba clicar em "Maneuver" conforme destacado na Figura 19.

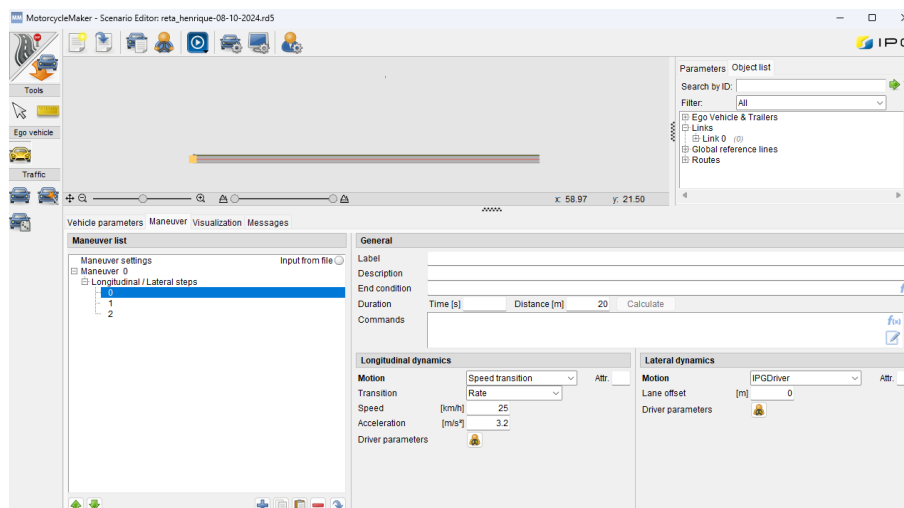
Figura 19 – Local para acessar o modelador de simulação do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Após, uma nova guia será aberta conforme Figura 20. Dentro do quadro "Maneuver list" será o local que irá adicionar os parâmetros para a simulação. Nesse caso, existem duas condições, sendo a condição 0 para aceleração, a condição 1 para manter a velocidade aingida e a condição 2 para desaceleração e finalização da simulação.

Figura 20 – Parâmetros que podem ser modificados no modelador de simulação do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

No quadro "General" ao lado serão implementadas as condições de causa e efeito, ou seja, pode ser executado uma condição de finalização da simulação na linha "End condition" - como no caso da condição 2 na qual a simulação deve ser finalizada quando a velocidade da motocicleta for menor que 0,1 km/h - e a duração desse comando que pode ser por tempo ou distância (utilizado apenas quando se coloca mais de uma condição para a simulação).

Já no quadro "*Longitudinal dynamics*" será definido a parte da velocidade e aceleração da simulação. Dentro dela será selecionado qual o modelo de movimento que deseja utilizar por meio da linha "*Motion*". Dependendo do modelo escolhido, pode aparecer para definir apenas a velocidade, a velocidade e a aceleração (caso selecionada uma transição por uma taxa) ou a velocidade final (caso selecionada uma transição linear).

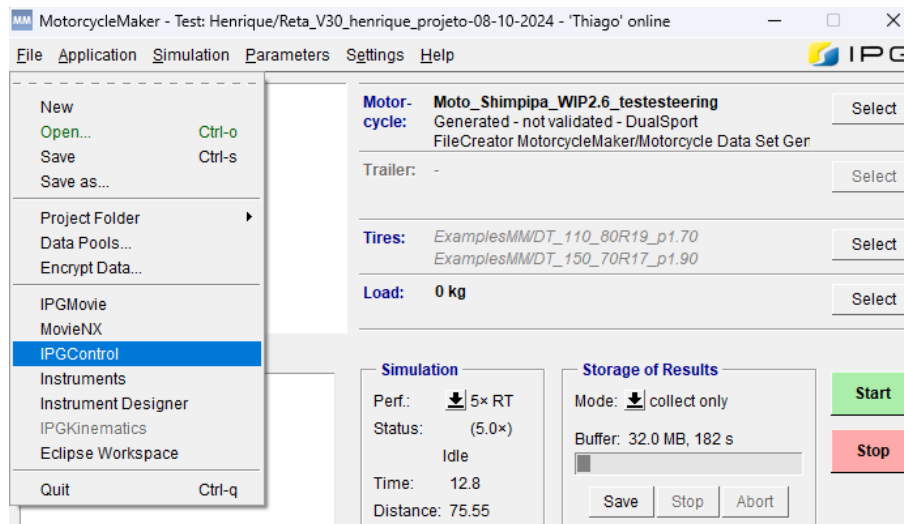
Por fim, no quadro ao lado sobre "*Lateral dynamics*" é possível definir a qual distância do centro da pista o piloto deve realizar o percurso. Essa última configuração é utilizada durante a simulação do circuito com o conjunto de duas e três lombadas, visto que todas elas foram importadas em uma única pista e divididas apenas pela distância do centro da pista o qual o piloto irá iniciar a simulação.

Com todos os parâmetros definidos, deve-se fechar a guia e retornar para a página inicial conforme Figura 14.

3.1.5 Geração de gráficos para análise da simulação

Após a finalização da parametrização da simulação deve-se abrir o programa e ir na aba "*File*" e dentro dessa aba clicar em "*IPGControl*" conforme destacado na Figura 21. Esse ícone irá redirecionar para uma nova guia para que seja possível iniciar a geração dos gráficos pertinentes aos resultados da simulação realizada.

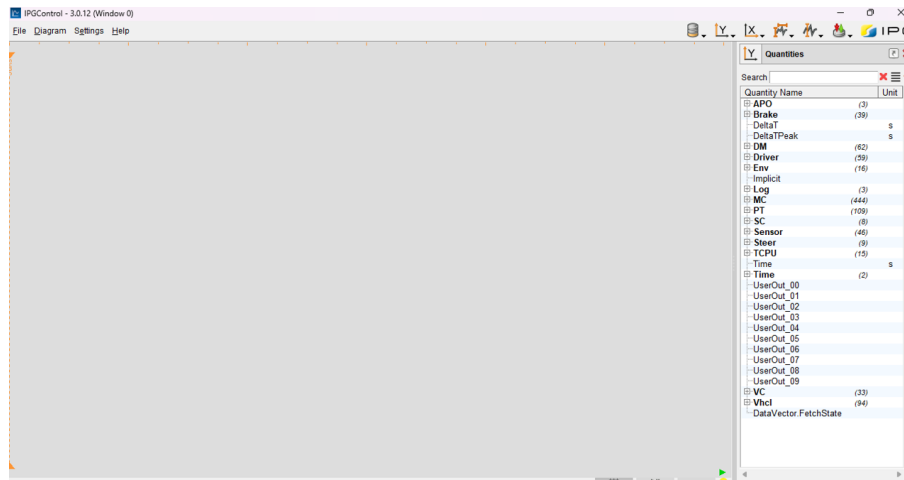
Figura 21 – Local para acessar o modelador de gráficos do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Ao abrir a tela conforme a Figura 22, no canto direito do quadro "*Quantity Name*" devem ser selecionados os parâmetros que deseja verificar no gráfico. Podem ser um ou mais parâmetros que deseja visualizar. Após a seleção, é necessário retornar para a tela inicial e chegando na tela inicial, deve clicar no botão "*Start*" para que inicie a simulação e possa gerar todos os gráficos.

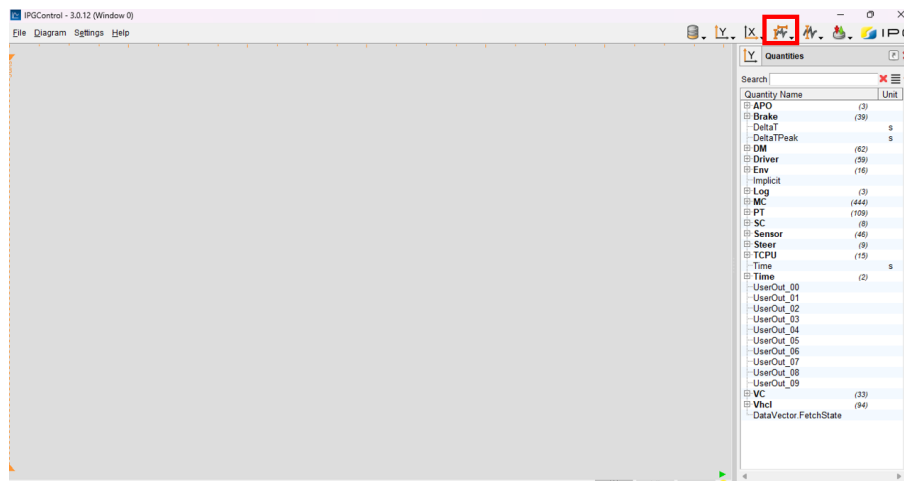
Figura 22 – Tela inicial do gerador de gráficos do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Após o término da simulação, deve-se retornar para a página do "IPGControl" e nela constará o gráfico gerado com os dados selecionados. Para melhorar a visualização, deve-se clicar no quarto ícone do canto direito na parte superior da guia para centralizar todos os dados conforme em destaque na Figura 23.

Figura 23 – Ícone para centralização dos gráficos do MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Caso deseje adicionar outro dado no gráfico, pode apenas selecionar o novo dado no quadro "Quantity Name" e rodar novamente a simulação ou caso seja um dado para ser analisado sozinho, será necessário remover o dado do gráfico e depois selecionar o novo dado. Para deletar esse dado já existente, basta clicar sobre ele na legenda que aparece no canto direito superior do gráfico e deletar. Após a seleção do novo dado, é necessário rodar novamente a simulação para que o gráfico seja atualizado com os novos valores.

No entanto, é possível também extrair os dados em um arquivo em formato de valores separados por vírgula (.CSV) ou em Excel (.XLS). Para isso, basta clicar com

o botão direito no gráfico com os dados desejados para serem exportados e clicar em "Export to file...". Uma nova aba será aberta e no campo de "File Format": é possível selecionar qual o tipo de arquivo que deseja salvar o documento e no campo "Save as:" selecionar o local para salvar esse arquivo e definir um nome para ele. Dessa forma, o arquivo contendo os dados selecionados e aparentes no gráfico serão transpostos para um arquivo no formato desejado.

3.2 CIRCUITOS

Os circuitos utilizados no presente trabalho visam assemelhar a utilização diária de uma motocicleta. Para isso, os circuitos adotados foram similares aos realizados pelo Departamento de Trânsito (Departamento de Trânsito (DETRAN)) para obtenção da carteira nacional de habilitação (CNH) da categoria A (permissão para condução de motocicletas).

Serão realizados um total de dez testes em ambos os modelos (programa e experimental). Todos os testes realizados são conformes a Tabela 2.

Tabela 2 – Cronograma de testes a serem realizados

Circuito	Velocidade	Quantidade de voltas
Formato de 8	20 km/h	1
		3
Rótula	20 km/h	1
		3
	30 km/h	1
		3
Retilíneo	20 km/h	1
	30 km/h	1
Lombada direita	20 km/h	1
Lombada esquerda	20 km/h	1

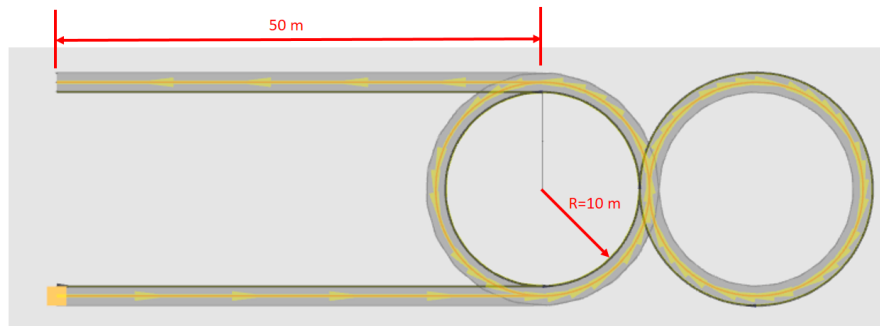
Fonte: Autor.

3.2.1 Circuito em formato de 8

A primeira manobra a ser realizada é o circuito em formato de 8. Esse circuito consiste em ter uma reta para ganho de velocidade até a desejada para o teste e em seguida realiza a entrada para a curva a esquerda. Após contornar 90° da circunferência, altera-se o sentido, iniciando uma segunda circunferência para a direita. Para essa volta, realiza-se uma volta completa e, ao finalizar essa volta, alterna-se novamente o sentido e inicia a circunferência para a esquerda, retornando no ponto inicial. O ponto de saída do percurso localiza-se após contornar mais 90° depois de finalizar a volta completa para a direita, ou seja, ao iniciar a curva à esquerda novamente, após 90° dessa curva é o ponto de saída do circuito, saindo pela tangente e seguindo reto.

Tanto na entrada quanto na saída, o percurso retilíneo tem o comprimento de 50 metros e cada circunferência tem o raio de 10 metros. O formato do circuito, a demonstração do raio e do comprimento podem ser verificada na Figura 24.

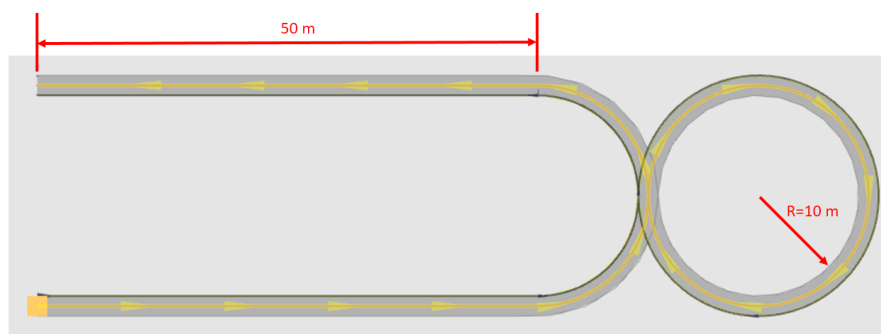
Figura 24 – Circuito em formato de 8 realizado no MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Esse teste será feito de duas formas, sendo a primeira a realização de 3 voltas nesse circuito em formato de 8 com o intuito de analisar a estabilidade na transição de direção e obter um padrão de deslocamento da motocicleta. Já a segunda forma é apenas a entrada e saída desse circuito sem completar nenhuma volta no 8, conforme Figura 25. Ambos os testes são realizados com uma velocidades de 20 km/h.

Figura 25 – Circuito 8 para teste sem voltas realizado no MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

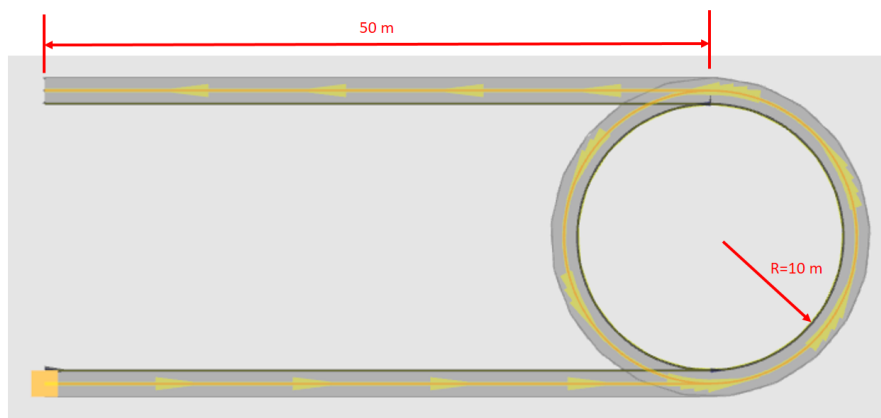
Para o teste experimental, a única variação realizada em comparação com o modelo gerado no programa está relacionado ao início e o fim do circuito o qual consiste com um espaço de 20 metros no início do percurso para tomada de velocidade e

de 10 metros no final do percurso para frenagem no caso real. Essa condição não foi implementada no MotorcycleMaker pois esse teste visa observar o comportamento da motocicleta em regime de curvas e não em regime retilíneo. Ademais, essa desconsideração pode ser realizada, pois um teste apenas para verificação do comportamento da motocicleta em um percurso retilíneo foi realizado.

3.2.2 Rótula

A segunda manobra a ser realizada foi uma adaptação do circuito em formato de 8, no qual há apenas a realização de um percurso em curva de sentido único, assemelhando-se a uma rótula. Nesse circuito, a reta de entrada e saída e o raio da circunferência seguem o mesmo padrão do circuito em formato de 8 mencionado no capítulo 3.2.1, com 50 metros nas retas e 10 metros de raio. Esse circuito e a demonstração de cada medida pode ser observada na Figura 26.

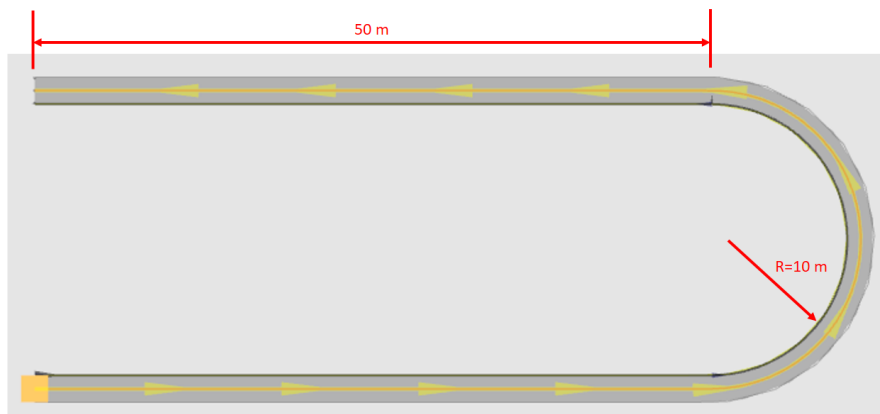
Figura 26 – Circuito da rótula realizado no MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Esse teste será feito de duas formas, sendo a primeira a realização de 3 voltas nesse circuito em formato de rótula com o intuito de analisar a estabilidade na transição de direção e obter um padrão de deslocamento da motocicleta. Já a segunda forma é apenas a entrada e saída desse circuito sem completar nenhuma volta na rótula, conforme Figura 27. Ambos os testes são realizados com duas velocidades distintas, sendo a primeira de 20 km/h e a segunda de 30 km/h.

Figura 27 – Circuito da rótula para teste sem voltas realizado no MotorcycleMaker



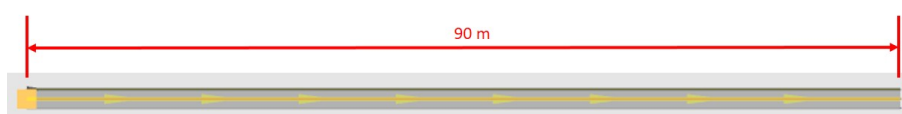
Fonte: Autor.

Nesse circuito, assim como no circuito em formato de 8 descrito no capítulo 3.2.1 temos uma faixa de 20 metros para aceleração até a velocidade determinada para o teste e na saída, após 40 metros inicia-se a frenagem da motocicleta. Essa é a única variação entre esse modelo experimental e o desenvolvido no programa.

3.2.3 Retilíneo

Para o terceiro circuito a ser percorrido, o mesmo caracteriza-se por ser uma reta para realização do teste de aceleração, constância e frenagem. O intuito desse teste é a verificação do comportamento da dinâmica vertical da motocicleta. Nesse teste, o piloto sairá do repouso e em uma reta de 50m irá atingir a velocidade de teste, manterá essa velocidade até um determinado ponto e depois iniciará o processo de frenagem da motocicleta. As dimensões desse teste são 20 metros, 50 metros e 10 metros para aceleração, constância e frenagem, respectivamente. Na Figura 28 é possível observar o comprimento total do percurso de 90 metros, 10 metros a mais do que o realizado em teste experimental para que a condição de parada seja feita nos 10 metros e não gere erro na simulação. Toda a divisão do modelo para aceleração, constância e frenagem foi caracterizada dentro do programa, conforme descrito no capítulo 3.1.4.

Figura 28 – Circuito retilíneo realizado no MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Ao observar o comprimento do circuito criado no programa, é possível notar

que ele possui 10 metros a mais que o pré definido. Esse acréscimo no tamanho é feito por conta da geração da condição de frenagem da motocicleta dentro do programa. Caso o circuito tivesse o tamanho exato de 80 metros, a simulação iria dar erro pois ele finaliza o processo de frenagem próximo dos 80 metros e a condição de finalização da simulação para quando a velocidade chegasse em zero não iria ocorrer.

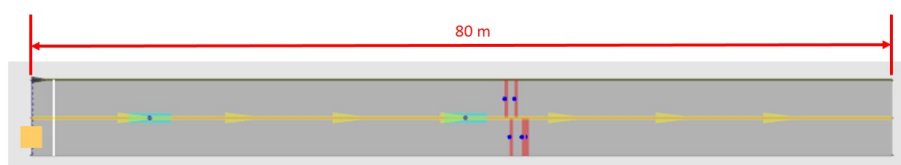
Esse teste, conforme observado na Tabela 2, possui dois meios de realização, sendo o primeiro com a velocidade de 20 km/h e o segundo com a velocidade de 30 km/h.

3.2.4 Conjunto de três lombadas

Para análise principalmente da dinâmica vertical da BMW G 310 GS, foi feito um circuito o qual na reta é passado por uma parte que possui três lombadas com uma distância pré definida, e realiza a frenagem após passar pelo obstáculo. Com relação a posição das lombadas, para esse modelo, duas lombadas estão em sequência e existe uma terceira lombada ligeiramente afastada das outras duas (79 centímetros de distância).

Dessa forma, a configuração do teste foi com um espaço de 20 metros para aceleração, 25 metros até o centro das três lombadas a serem transpostas, mais 25 metros de constância, finalizando com uma área de 10 metros de frenagem, totalizando um percurso de 80 metros. Esse circuito pode ser observado na Figura 29 onde o quadrado amarelo no início do percurso identifica o local que a motocicleta irá partir e também seu comprimento.

Figura 29 – Circuito com o conjunto de três lombadas realizado no MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Com esse teste, é possível realizar toda a análise do comportamento da suspensão da motocicleta, caracterizando toda a dinâmica vertical da BMW G 310 GS.

3.2.5 Conjunto de duas lombadas

Com o intuito de aprofundar mais na análise da dinâmica vertical da motocicleta, um segundo percurso sobre lombadas foi gerado. Nesse circuito, o veículo deve transpor duas lombadas com uma distância pré-definidas entre elas de 60 centímetros. As condições da pista seguem os mesmos padrões do mencionado no capítulo 3.2.4. O circuito e seu comprimento podem ser observados na Figura 30 onde o quadrado amarelo no início do percurso identifica o local que a motocicleta irá partir.

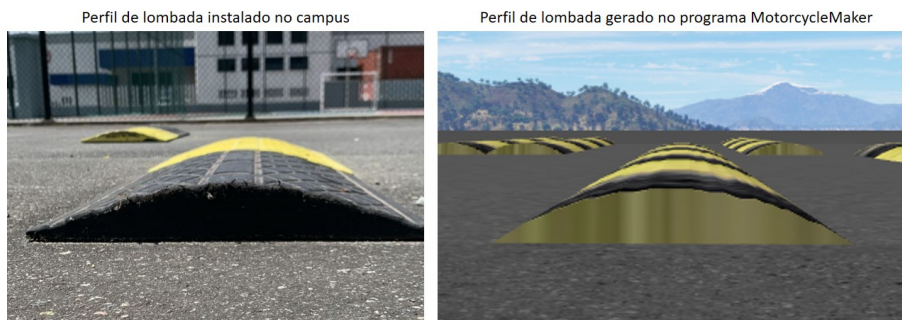
Figura 30 – Circuito com o conjunto de duas lombadas realizado no MotorcycleMaker



Fonte: Autor.

Com relação a reprodução do perfil da lombada gerado no MotorcycleMaker, abaixo é possível verificar o perfil da lombada presente no campus à esquerda da imagem e a gerada no programa em questão a direita na imagem, mediante a Figura 31.

Figura 31 – Perfil da lomaba instalada no campus



Fonte: Autor.

Esses perfis são a reprodução mais próxima gerada dentro do programa em comparação com as instaladas dentro do campus. Além disso, esse perfil é equivalente para o circuito apresentado no capítulo 3.2.4.

Com esse teste finaliza o conjunto de testes voltados para a análise da dinâmica vertical da motocicleta.

3.3 SENSORES NO MODELO FÍSICO

Os sensores utilizados nesses testes foram três, sendo um para aquisição de dados de posição no espaço da motocicleta, outro para a aquisição do grau de esterçamento do guidom e um terceiro para aquisição da velocidade da motocicleta. Todos esses sensores foram fixados na motocicleta, conforme Figura 32, e criado um programa para captação e processamento de todos os dados através de um Raspberry Pi 4. Após o programa ter sido inicializado, a aquisição de dados pode ser feita de modo

offline, salvando os dados localmente na Raspberry e, posteriormente visualizando-os em um computador.

Figura 32 – Motocicleta utilizada para os testes instrumentada.



Fonte: Autor.

O primeiro sensor (WitMotion WTGAHRS1) tem a funcionalidade de disponibilizar a aceleração, velocidade angular, orientação angular, campo magnético nos três eixos, latitude e longitude, velocidade de acordo com o GPS e pressão atmosférica. O mesmo foi posicionado na parte traseira da motocicleta, visto que é uma região que não iria atrapalhar o piloto e também próxima ao bagageiro da motocicleta, a qual possui uma Raspberry para aquisição de dados.

Esse sensor, assim como sua instalação, é possível ser observada na Figura 32 em destaque dentro do círculo vermelho no canto direito superior. Do lado esquerdo da figura temos o sensor GPS para captação de coordenadas e velocidade e do lado direito temos o sensor com seu acelerômetro interno para captação dos dados restantes.

O sensor de esterçamento (sensor de ângulo magnético AS5600) foi posicionado sobre o guidom da motocicleta e uma segunda placa para detectar o movimento do guidom fixa a um suporte colado no tanque o qual fica a uma distância de cinco milímetros do sensor para que seja possível adquirir o ângulo de esterçamento. Essa configuração pode ser observada na Figura 32 no lado esquerdo, sendo possível observar sua fixação na motocicleta pela vista superior e o distanciamento do sensor para sua base, na vista lateral, a qual identifica o quanto ele está sendo rotacionado.

Por fim, o sensor de Efeito Hall, localizado na roda traseira, foi utilizado em conjunto com um ímã para obter a velocidade e rotação da roda. A sua leitura é feita

de modo digital. Pode-se observar essa fixação através da Figura 32 no canto direito inferior.

Todos esses dados foram adquiridos dos testes e como resultado obteve-se uma planilha com a frequência de 100 Hz, ou seja, 100 frames por segundo de captura de dados de cada sensor. Esse valor foi determinado pela limitação da captação de dados do sensor de esterçamento. Com esses dados, foi possível traçar uma rota e realizar a comparação com os resultados das simulações do programa para averiguar a acurácia dos dados fornecidos.

3.4 TESTES

Para a realização dos testes experimentais, foi necessário a geração do circuito dentro da própria universidade. Sendo assim, foi utilizado um espaço do estacionamento para que fosse possível montar o circuito. O espaço em questão está localizado dentro do estacionamento da Universidade Federal de Santa Catarina (Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)) é já foi idealizado como um espaço reservado para testes, visto que as equipes de competição presentes no campus utilizam esse espaço como forma de testarem seus veículos. O espaço pode ser identificado na Figura 33.

Figura 33 – Vista superior do projeto arquitetônico da UFSC campus Joinville dentro do Parque Perini



Fonte: (Joinville, 2018).

No local em vermelho foi a área destinada para os testes dentro do projeto arquitetônico, a qual foi realizada e utilizada para a realização dos testes experimentais para o presente trabalho. Com esse espaço, foi feito com o auxílio de uma trena e de cones do modelo chapéu chinês foram gerados os circuitos apresentados no capítulo 3.2.

O primeiro circuito a ser criado foi o circuito em formato de 8, conforme demonstrado no capítulo 3.2.1 e foram realizados os testes para esse circuito conforme observado na Figura 34.

Figura 34 – Realização do teste no circuito em formato de 8



Fonte: Autor.

Esse teste foi o primeiro a ser realizado pois o circuito para ser criado demanda um tempo maior e um espaço maior. Após a finalização da bateria de testes, foi removida apenas uma circunferência dessa pista e iniciado os testes no circuito da rótula, conforme demonstrado no capítulo 3.2.2. Com a nova definição do circuito, os testes foram realizados conforme observado na Figura 35.

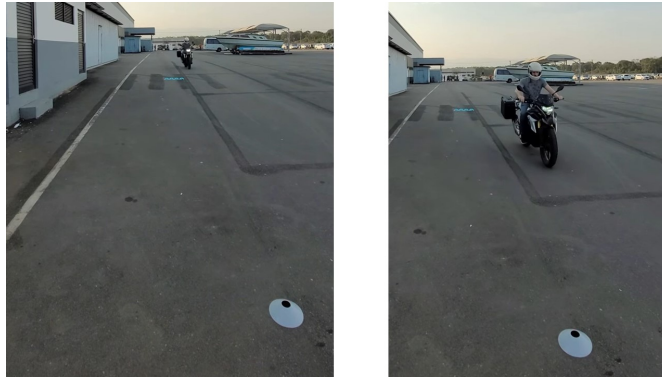
Figura 35 – Realização do teste na rótula



Fonte: Autor.

Para finalização da utilização do espaço destinado aos testes, foi realizado o teste retilíneo conforme mencionado no capítulo 3.2.3. Para realização dele, foi removida todas as circunferências criadas e gerado um novo circuito com as dimensões definidas anteriormente no capítulo 3.2.3. Com o novo circuito definido, os testes foram realizados conforme observado na Figura 36.

Figura 36 – Realização do teste no circuito retilíneo



Fonte: Autor.

O único circuito realizado fora desse local de testes foi o trajeto sobre lombadas. Esse circuito foi feito ao lado da quadra poliesportiva, na região em amarelo da Figura 33, visto que o Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV) realizou a execução do conjunto de lombadas para um dos projetos desenvolvidos internamente.

Dessa forma, com o intuito de analisar a dinâmica vertical e mantendo a motocicleta dentro da universidade por se tratar de um patrimônio da própria UFSC, utilizou-se as lombadas já instaladas, conforme Figura 37.

Figura 37 – Local de instalação das lombadas por parte do LAV



Fonte: Autor.

Com isso, todos os testes foram replicados dentro da própria universidade conforme circuitos listados no capítulo 3.2. Após a realização desses testes e das simulações através do MotorcycleMaker, foi possível coletar todos os dados necessários e realizar a comparação e validação do modelo em questão.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Com a finalização de todas as simulações e todos os testes realizados na motocicleta, os dados foram analisados e a partir deles foi possível a geração de gráficos com o intuito de realizar uma comparação entre o simulado e o experimental. Dessa forma, primeiro serão apresentados os dados obtidos na simulação e depois serão apresentados os dados do experimental com a indicação de comparações com os dados do MotorcycleMaker.

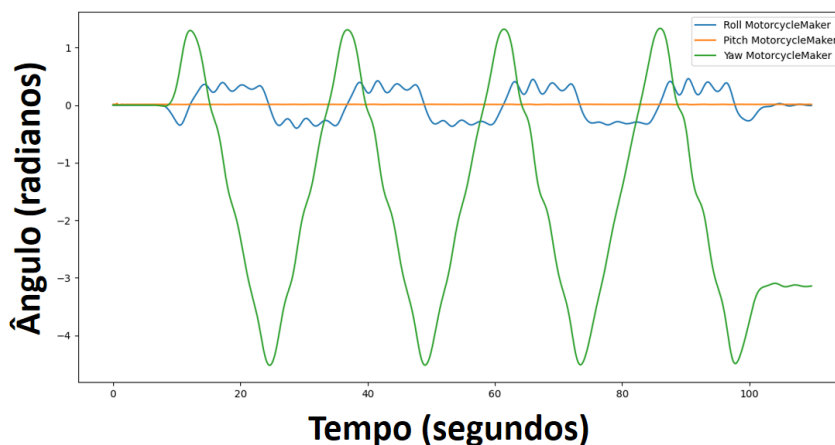
4.1 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Após a realização da simulação de todos os circuitos apresentados no capítulo 3.2, foram gerados os gráficos de *Roll* (rolagem), *Pitch* (arfagem) e *Yaw* (guinada) agrupados e separados para realização das análises necessárias para possível validação do programa utilizado.

4.1.1 Resultado circuito em formato de 8

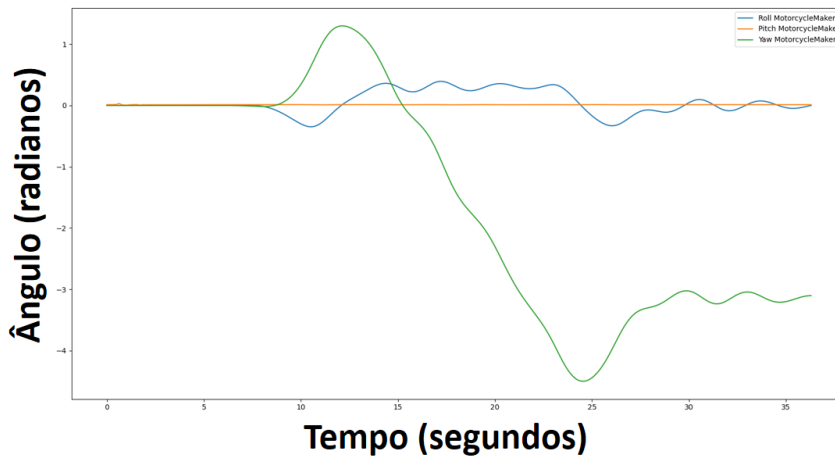
Conforme a Tabela 2, o circuito em formato de 8 possui duas formas de ser realizado (com três voltas e apenas entrando e saindo do circuito sem completar uma volta). O resultados para ambas as simulações com todos os dados podem ser observados por meio das Figuras 38 e 39. Esses dados são dados em uma escala de tempo de duração da simulação, dada em segundos, e de radianos para os três parâmetros adquiridos com o movimento da motocicleta pelo trajeto pré-estabelecido.

Figura 38 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação do circuito em formato de 8 com 3 voltas



Fonte: Autor.

Figura 39 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação do circuito em formato de 8 entrando e saindo do circuito sem completar uma volta



Fonte: Autor.

Analisando a simulação, é possível observar que, por termos um percurso com velocidade constante durante todo o seu trajeto, o *Pitch* tem o valor nulo, conforme observado na linha central de cor laranja, em ambos os gráficos. Ademais, é possível observar, principalmente na Figura 38 a alternância do *Roll* (azul) e do *Yaw* (verde) demonstrando a mudança de direção e a conclusão de uma circunferência completa, respectivamente.

Além disso, analisando o resultado de *Yaw* (linha verde no gráfico), nota-se que ele não finaliza alinhado com o seu ponto de início. Isso ocorre, pois como observa-se na Figura 24, existe uma distância entre a linha de entrada e a de saída do percurso, com o valor de π , visto que meia volta resulta em 180° , sendo o equivalente ao valor de π . Essa característica também pode ser observada no início da simulação com a leve elevação da linha verde e depois sua mudança de direção, visto que no circuito, inicia-se com uma curva para a direita mas após 90° o sentido já é alterado.

Com isso, é possível confirmar que o programa ao tratar o dado de guinada, ele considera o acréscimo desse valor em radianos quando, dentro da simulação, existe alguma curva. No entanto, o MotorcycleMaker considera um circuito com uma curva de raio constante uma reta crescente ou decrescente (depende do sentido da curva) para o *Yaw*. Sendo assim, por se tratar de um circuito com curvatura constante, é possível verificar que o coeficiente angular da reta no gráfico não se altera, indicando o acréscimo desse valor (realização de mais voltas no entorno do próprio eixo) e que ao realizar curvas em sentido anti-horário, o valor de *Yaw* aumenta e em sentido horário, ele decresce.

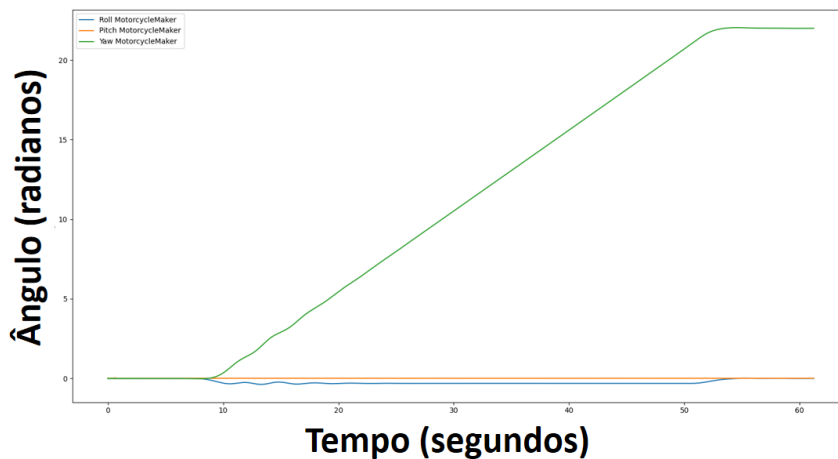
Por fim, observa-se que em ambas as simulações, o *Roll* não é constante e isso se dá por conta da dificuldade em parametrizar um piloto ideal para uma simulação. Essa dificuldade é observada também nos estudos de Fossa (2019) no qual em sua dissertação, ele concluiu que existem vários tipos de pilotos e que não é possível

caracterizar e padronizar um piloto de motocicleta.

4.1.2 Resultados da rótula com três voltas

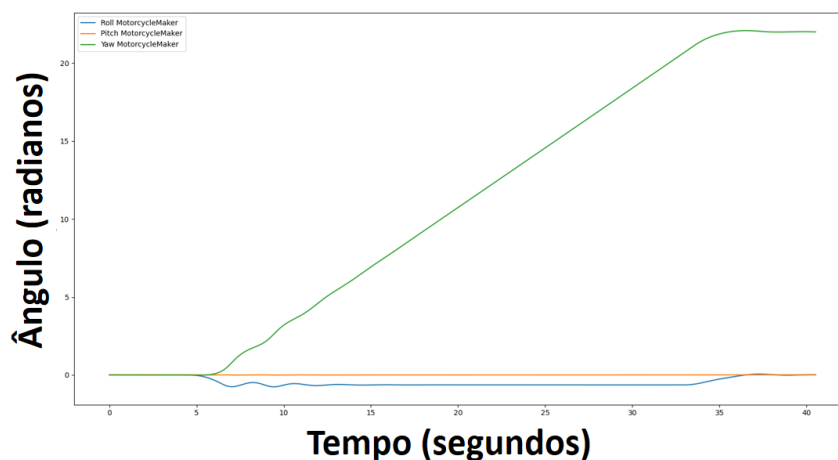
No circuito da rótula, foram realizadas duas simulações com diferentes velocidades a qual o piloto iria realizar o percurso, sendo elas a 20 km/h e a 30 km/h. Essa mudança na velocidade foi adotada para entender o comportamento da motocicleta, principalmente em relação à rolagem, pois com uma velocidade maior, o piloto tende a inclinar mais a motocicleta para que utilize esse recurso como equilíbrio para percorrer a curva. Com isso, o resultado para ambas as simulações podem ser observados através das Figuras 40 e 41.

Figura 40 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação da rótula com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 41 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação da rótula com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

Em ambos os gráficos, é possível notar que o *Pitch* (em laranja) não possui variação em seu valor, mantendo-se constante durante todo o percurso. Isso ocorre

pelo fato de que a motocicleta não possui um início com aceleração e frenagem, dessa forma, sua velocidade é constante, não tendo nenhuma alteração que possa gerar um momento de arfagem, o qual alteraria esse valor.

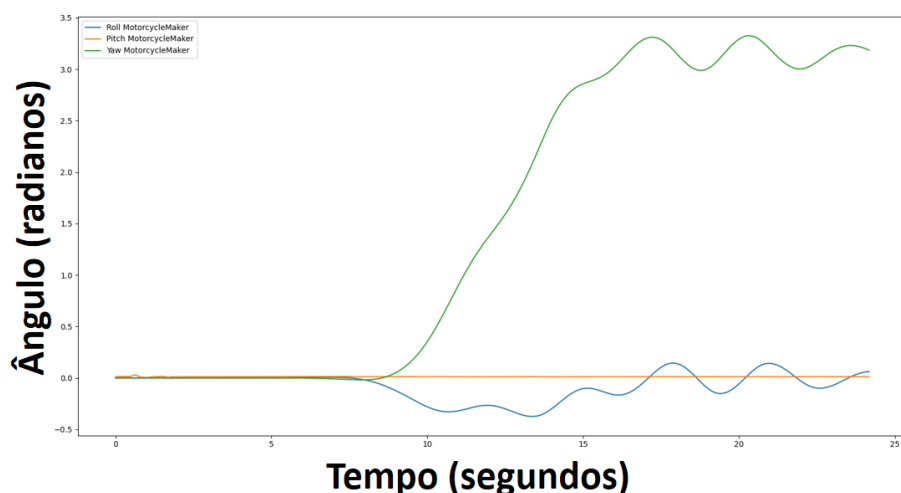
Outro ponto a ser observado é o valor de guinada em ambos os gráficos. O valor dessa variável é uma reta crescente, tendo esse fenômeno pois os resultados de todas as variáveis é dada em radianos e não se limita ao intervalo de zero até $2.\pi$, tornando o seu valor incrementado a cada volta que é realizada para o mesmo sentido. Dessa forma, conforme o piloto vai realizando mais voltas, esse valor só tende a aumentar de forma crescente pois o circuito não altera de sentido igual ao demonstrado na Figura 38, o qual o circuito possui uma mudança de direção, resultando em uma alternância de sentido desse valor.

Por fim, com relação ao momento de rolagem (*Roll*) em azul, a grande diferença que se pode observar entre ambos os gráficos é a demora na estabilização da inclinação do piloto na curva para auxílio de contorno. Essa diferença além de estar diretamente ligada com a velocidade, está ligada também a parametrização do piloto, pois esse foi um dado pouco explorado no presente trabalho, visto sua complexidade.

4.1.3 Resultados da rótula apenas entrando e saindo do circuito

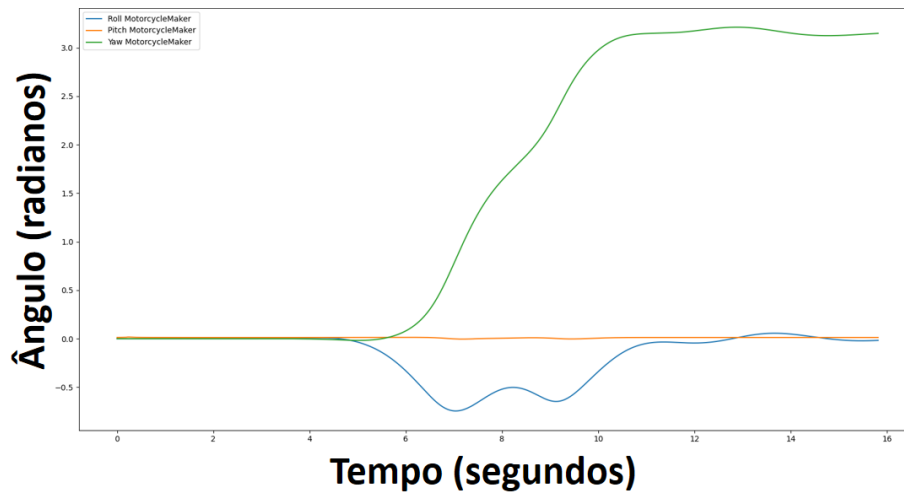
Com relação à rótula, com o modelo de apenas entrando e saindo do circuito, os resultados obtidos da simulação podem ser observados pelas Figuras 42 e 43 para as velocidades de 20 km/h e 30 km/h respectivamente.

Figura 42 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação da rótula entrando e saindo do circuito sem completar uma volta à 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 43 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação da rótula entrando e saindo do circuito sem completar uma volta à 30 km/h



Fonte: Autor.

Assim como observado no caso do capítulo 4.1.2, a velocidade é um fator de extrema relevância na estabilização do ângulo de rolagem (em azul) e também, por não ter uma volta completa e ser apenas a entrada e a saída, o valor do ângulo de guinada é crescente mas bem menos do que comparado com as Figuras 40 e 41. Essa característica final do parâmetro *Yaw* de alternância está diretamente ligado ao movimento de zig-zag o qual o piloto realiza para conseguir alcançar o equilíbrio da motocicleta após a saída da curva.

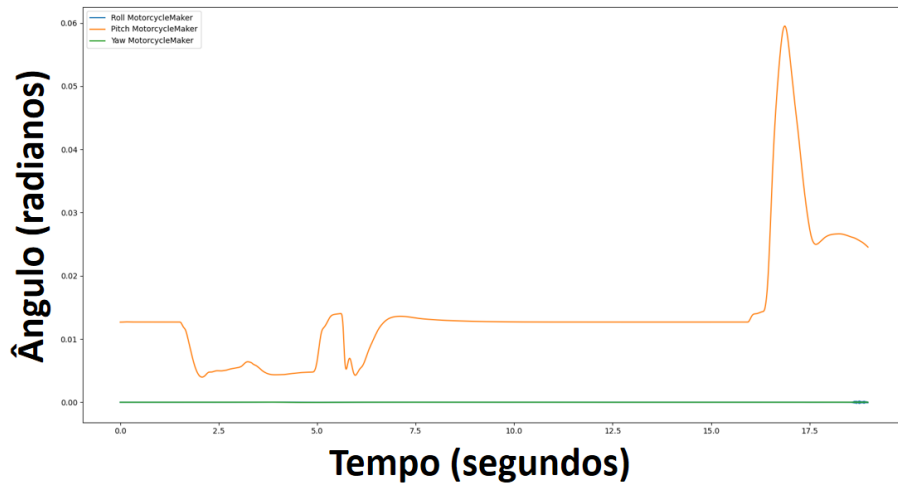
Outro ponto a ser verificado na análise dos dados da simulação da rótula com a realização de três voltas está no parâmetro de *Roll*. Com o incremento da velocidade, é possível verificar que a estabilidade da motocicleta aumenta permitindo que o piloto recupere e mantenha o equilíbrio após a saída de uma curva com maior facilidade e em um menor intervalo de tempo.

4.1.4 Resultados do trajeto retilíneo

Esses testes possuem o intuito de realizar uma análise da dinâmica vertical da motocicleta, ou seja, seu foco está diretamente ligado ao momento de arfagem (*Pitch*). Com isso, a simulação foi realizada com as condições de início e fim para a tomada de velocidade e frenagem, respectivamente.

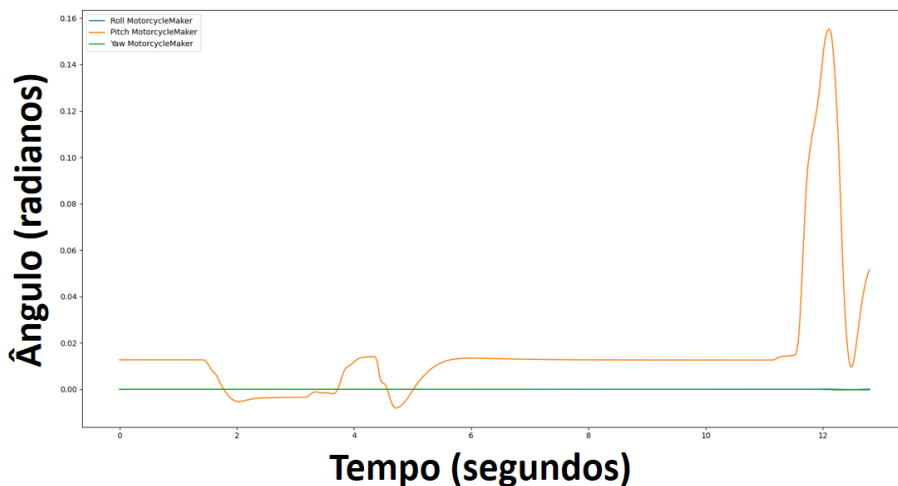
Os resultados dessas simulações podem ser observadas através das Figuras 44 e 45, contendo os três principais parâmetros de análise, *Roll*, *Pitch* e *Yaw*.

Figura 44 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação do trajeto retilíneo à 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 45 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação do trajeto retilíneo à 30 km/h



Fonte: Autor.

Como é possível observar, para ambos os casos, tanto o *Roll* e o *Yaw* (linha azul e verde, respectivamente) não sofrem alteração por se tratar de um percurso retilíneo e não ter a inclinação da motocicleta para um dos lados ou a realização de qualquer mudança de direção da motocicleta. Além disso, por se tratar de uma análise da dinâmica vertical, é possível notar toda a variação de momento de arfagem na motocicleta, podendo ser dividido em 3 etapas.

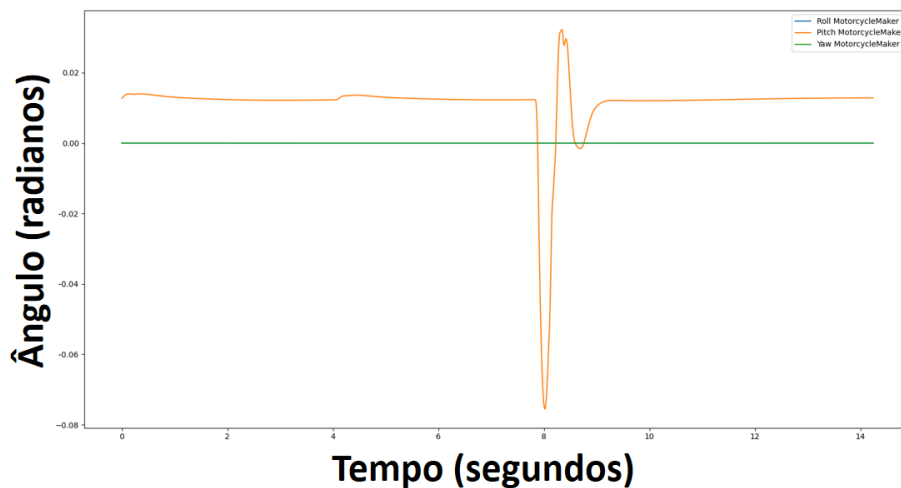
A primeira etapa a ser observada é a leve variação no início do gráfico. Essa variação está relacionada a aceleração da motocicleta (transferência de carga para a traseira, levantando suavemente a dianteira mas sem remover o contato pneu/solo, por isso o valor reduz), o qual quando ele tem uma leve subida mas retorna ao seu ponto inferior é o momento da realização da troca de marcha. Após, temos uma estabilização nesse parâmetro indicando que o piloto chegou a velocidade requerida

e agora está mantendo. Por fim, no pico máximo da variável, temos o momento de frenagem, relacionada a transferência de carga para a roda dianteira, resultando na elevação do valor em questão.

4.1.5 Resultado da simulação sobre lombadas

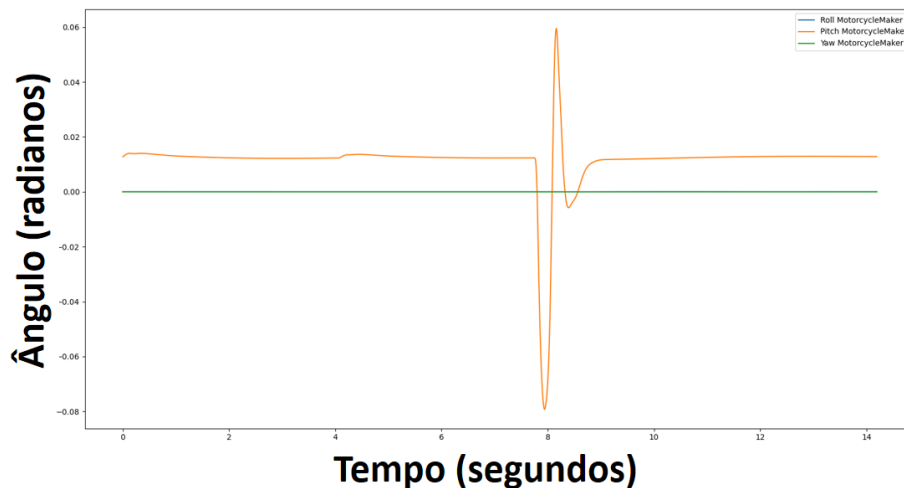
Por fim, a última simulação que realizada foi a transposição da motocicleta sobre lombadas para verificação, também, da dinâmica vertical e de sua resposta em simulação. Assim como abordado nos capítulos 3.2.4 e 3.2.5 teremos dois trajetos a serem transpostos. O resultado de ambas as simulações podem ser observados nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação do trajeto com lombadas a direita (três lombadas) à 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 47 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* da simulação do trajeto com lombadas a esquerda (duas lombadas) à 20 km/h



Fonte: Autor.

Assim como no teste do trajeto retilíneo (capítulo 4.1.4), o *Roll* e o *Yaw* (azul e verde, respectivamente) são nulos, tendo apenas alteração no *Pitch* (linha laranja). Com relação aos resultados em si, pode-se observar que ao entrar no obstáculo, o valor do momento de arfagem diminui e, logo em seguida, sobe bruscamente. Isso ocorre pois quando a motocicleta entra na lombada, uma pequena porção da sua carga é transferida para a traseira, visto que, naquele momento, a roda dianteira está mais alta que a traseira em relação ao solo. Depois há uma ligeira elevação nesse valor que diz respeito ao momento que a roda dianteira já retornou ao solo e agora a roda traseira está mais alta, demonstrando que ela está sobrepondo o obstáculo.

Além disso, outro ponto muito interessante de ser observado está na realização da comparação de ambos os gráficos em seu valor máximo. Ao observar a Figura 46 nota-se que existe uma leve ondulação de seu valor em seu pico, fato não observado na Figura 47. Esse fenômeno ocorre pois ao analisar a Figura 37 observa-se que no circuito denominado como lombadas a direita, primeiro tem somente uma e depois são duas lombadas em sequência, o que não existe no circuito denominado como lombadas a esquerda. Dessa forma, é possível observar que existe um momento de transposição da terceira lombada logo em seguida da segunda que tem como resultado essa leve flutuação no valor do *Pitch* como observado no gráfico.

4.2 RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS

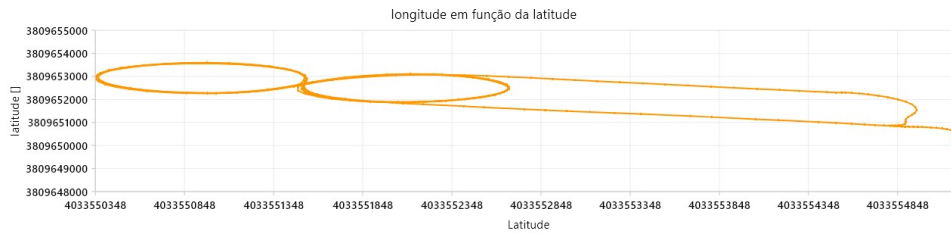
Após a realização dos testes experimentais de todos os circuitos apresentados no capítulo 3.2, foram adquiridos todos os gráficos de *Roll* (rolagem), *Pitch* (arfagem) e *Yaw* (guinada) agrupados e separados para realização das análises necessárias para possível validação do programa utilizado.

4.2.1 Resultados circuito em formato de 8

Após a realização dos testes no MotorcycleMaker, foram criados os circuitos dentro da UFSC e reproduzidos os testes experimentais. Como forma de verificação do trajeto realizado e verificação dos dados dos sensores instalados na motocicleta, foi gerado um gráfico com a latitude e a longitude, em graus, armazenada no sensor GPS para comprovação do circuito. Sendo assim, esse circuito percorrido, pode ser observado através da Figura 48.

Ao observar o gráfico é possível notar que os dados armazenados correspondem ao circuito em formato de 8 e pelas linhas é possível observar que existem três linhas se sobrepondo no circuito, comprovando que foram realizadas três voltas. Além disso, no lado direito do gráfico é possível verificar um momento no qual essas linhas chegam a se encontrar novamente. Isso ocorre pois o teste foi configurado com início e fim por meio de um botão e esse botão fica localizado dentro da caixa

Figura 48 – Gráfico da latitude e longitude dos testes experimentais do circuito em formato de 8 com 3 voltas



Fonte: Autor.

de armazenamento na lateral da motocicleta. Sendo assim, para finalizar o teste, era necessário retornar ao ponto de início do teste para que essa caixa fosse aberta e o botão pudesse ser pressionado novamente.

O resultados para ambos os testes experimentais do circuito em formato de 8 com todos os dados podem ser observados nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* dos testes experimentais do circuito em formato de 8 com 3 voltas



Fonte: Autor.

Figura 50 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* dos testes experimentais do circuito em formato de 8 entrando e saindo do circuito sem completar uma volta



Fonte: Autor.

Diferente do resultado do código computacional, nesse caso, os sensores retornam os dados em valores angulares e limitados ao intervalo de -180° até 180° ,

por isso existe uma diferença visível quando se trata do parâmetro *Yaw* (linha azul). Porém, é possível notar que existe um padrão de alternância entre os valores dessa mesma linha, o que demonstra também o fato da mudança de direção entre os círculos do 8.

Como forma de visualização, foi extraído também um gráfico apenas do *Roll* para melhor análise, visto que a escala de todos os três juntos é valorizada para o *Yaw* por conta de sua variação. Sendo assim, as Figuras 51 e 52 mostra apenas o *Roll* desse percurso no teste experimental.

Figura 51 – Gráfico com resultados dos testes experimentais do circuito em formato de 8 com 3 voltas somente do parâmetro de rolagem



Figura 52 – Gráfico com resultados dos testes experimentais do circuito em formato de 8 somente entrando e saindo, somente do parâmetro de rolagem

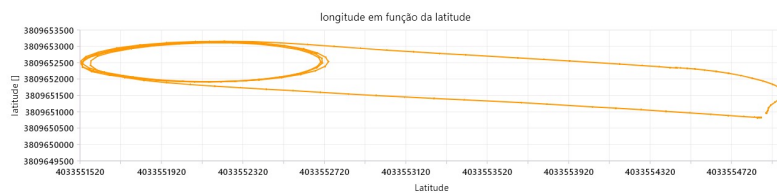


Assim como apresentado nas simulações, é possível notar uma alternância nos valores de rolagem, indicando a mudança de sentido e tanto no início quanto no fim do gráfico nota-se que ele se estabiliza no meio indicando o início e o final do teste que ocorre em uma linha reta. Ademais, como foi observado na simulação, para esse teste, não é possível ficar acompanhando exatamente no meio o do trajeto, sendo necessário algumas correções no percurso, o qual resulta nessas oscilações do valor.

4.2.2 Resultados dos testes da rótula com 3 voltas

Assim como comentado no capítulo 4.1.2, o teste experimental também teve a variação da velocidade para compreensão do ângulo de rolagem. Como início foi verificado, pela obtenção da latitude e longitude, a consistência do circuito realizado. Esse gráfico pode ser observado através da Figura 53.

Figura 53 – Gráfico da latitude e longitude dos testes experimentais da rótula com 3 voltas



Fonte: Autor.

Nesse gráfico é possível notar que o formato do circuito é uma rúcula e além disso, existem curvas sobrepostas, indicando que ocorreram mais de uma volta no circuito. Ademais, esse teste tem o intuito de verificar se com a velocidade maior, a estabilidade do momento de rolagem ocorre mais rápido ou não. Com isso, as Figuras 54 e 55 mostram os resultados dos testes.

Figura 54 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental da rótula com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 55 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental da rótula com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

Conforme o observado no capítulo 4.1.2 a componente *Yaw* foi uma reta crescente, diferente do resultado demonstrado pelo sensor. Mas isso se refere ao fato do intervalo dos dados transmitidos pelo sensor ser diferente da simulação (-180° até 180° e radianos em termos de π , respectivamente). Com isso, é possível notar que ele sempre mantém aumentando o valor para um sentido único, demonstrando a sua constância no contorno do círculo com uma única direção.

Ademais, conforme as Figuras 56 e 57, é possível verificar o parâmetro de rolagem da motocicleta que, assim como se observa na simulação, conforme a velocidade é incrementada, a tendência em se estabilizar mais rápido se mantém.

Figura 56 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula com velocidade de 20 km/h somente do *Roll*



Fonte: Autor.

Figura 57 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula com velocidade de 30 km/h somente do *Roll*



Fonte: Autor.

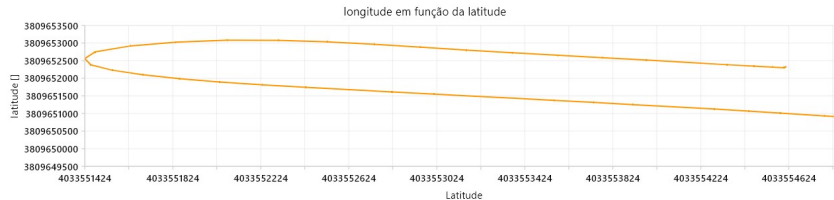
Com esses resultados, é possível observar que há uma similaridade dos resultados da simulação com os testes experimentais. Essa similaridade é observada através dos comportamentos semelhantes das curvas de rolagem, arfagem e guinada quando comparadas entre os dados resultantes da simulação e do teste experimental.

4.2.3 Resultados dos testes da rótula entrando e saindo do circuito

Com o intuito de finalizar a validação da análise dos parâmetros de rolagem e guinada de uma motocicleta relacionados a dinâmica lateral da motocicleta, o último teste realizado foi o circuito entrando e saindo sem completar uma volta na rótula, conforme a Figura 27. Esse percurso também pode ser verificado por meio da plotagem

do gráfico de latitude e longitude desse percurso. Esse gráfico pode ser visualizado pela Figura 58.

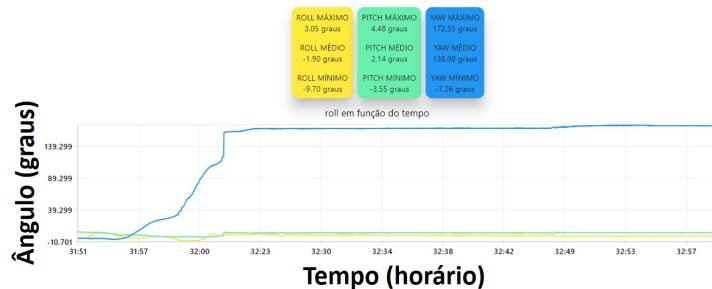
Figura 58 – Gráfico da latitude e longitude dos testes experimentais da rótula realizando apenas a entrada e saída



Fonte: Autor.

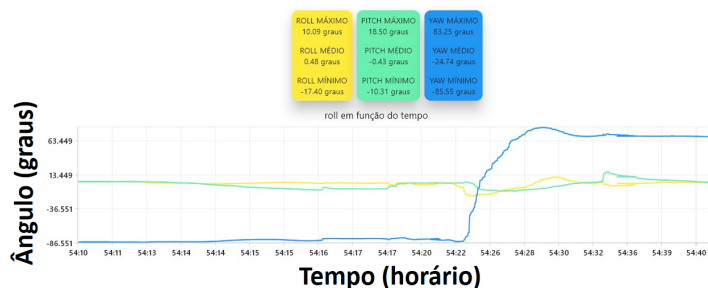
Sendo assim, com a realização dos testes experimentais e a análise de dados, os seguintes gráficos foram gerados conforme as Figuras 59 e 60 com as velocidades de 20 km/h e 30 km/h respectivamente.

Figura 59 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída do percurso com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 60 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída do percurso com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

Com esses gráficos nota-se que a componente de guinada possui uma reta percorrendo um total de 180°, condizente com a entrada e saída de uma rótula sem completar uma volta completa. Para a visualização do ângulo de rolagem para analisar e verificar sua similaridade com os dados apresentados na simulação com o

MotorcycleMaker, os dados podem ser observados por meio das Figuras 61 e 62 para as velocidades de 20 km/h e 30 km/h respectivamente.

Figura 61 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída com velocidade de 20 km/h somente do *Roll*



Fonte: Autor.

Figura 62 – Gráfico com resultados do teste experimental da rótula realizando apenas entrada e saída com velocidade de 30 km/h somente do *Roll*



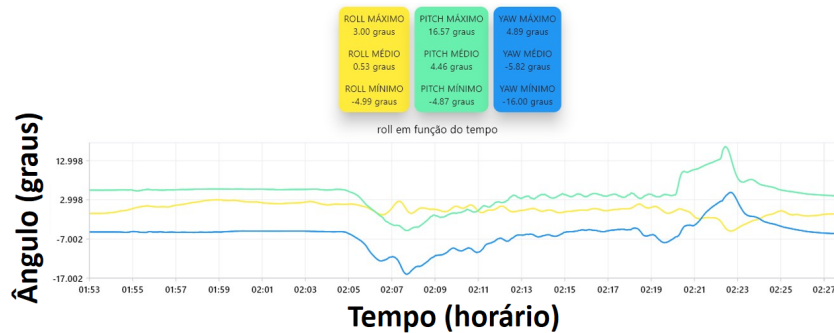
Fonte: Autor.

Com a visualização do *Roll* é possível identificar o momento de entrada na curva, seu incremento por conta do contorno da rótula e depois a sua saída com o início da estabilização. Assim como comprovado anteriormente, quanto maior a velocidade, mais rápida essa estabilização ocorre, o que se reproduz para esse teste também.

4.2.4 Resultados do teste retilíneo

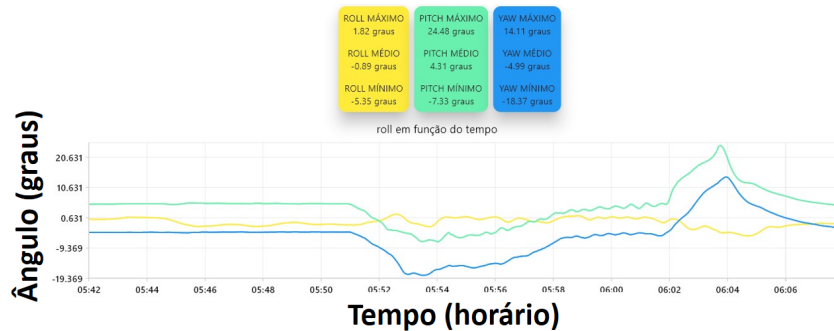
Com o intuito de averiguar a dinâmica vertical da motocicleta BMW G 310 GS, o primeiro teste experimental realizado foi o teste retilíneo. Sendo assim, esse teste visa observar a transferência de carga entre a roda traseira e a dianteira do veículo conforme acelera e freia. Com isso, foram realizadas duas passadas em um trecho retilíneo com velocidades diferentes de 20 km/h e 30k/h. Os resultados podem ser verificados nas Figuras 63 e 64.

Figura 63 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 64 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

Para esse teste, o dado mais importante são os valores de *Pitch*. Os outros parâmetros podem sofrer uma leve alteração por conta do equilíbrio do piloto. Nas simulações, esses outros parâmetros são totalmente estáveis pois no programa não é levado em conta o equilíbrio necessário por parte do piloto para realizar o controle da motocicleta. Sendo assim, nas Figuras 65 e 66 é possível verificar apenas o momento de arfagem.

Figura 65 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 20 km/h somente *Pitch*



Fonte: Autor.

Figura 66 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto retilíneo com velocidade de 30 km/h somente *Pitch*



Fonte: Autor.

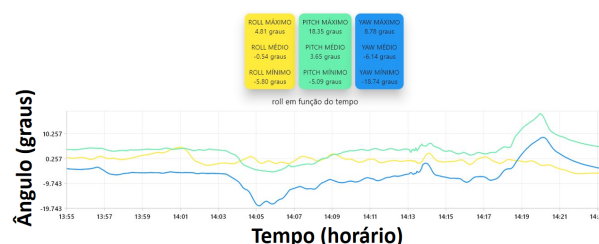
Com esses dados, nota-se que, conforme constatado pelas simulações no programa MotorcycleMaker, para a aceleração existe uma transferência de carga do ponto estático da motocicleta para a traseira, resultando na redução do valor de *Pitch*. Após a chegada na velocidade desejada, é possível notar que esse valor se estabiliza e inicia o processo de constância. Por fim, ao final do teste é possível verificar uma elevação nesse valor causado pela frenagem. Como a motocicleta tende a manter o seu movimento, ao realizar a frenagem, sua carga é transferida para a roda dianteira, causando um acréscimo no valor de arfagem como visualizado no gráfico.

Além disso, no período de aceleração, assim como foi verificado na simulação com o programa, é possível identificar que o ângulo de arfagem começa a elevar, ele decai novamente e retorna a elevar seu valor, identificando o ponto de troca de marcha da motocicleta. Dessa forma, com essa primeira análise, é possível notar que os gráficos resultantes da simulação são condizentes com os dados gerados no experimento com uma motocicleta.

4.2.5 Resultados dos testes sobre lombadas

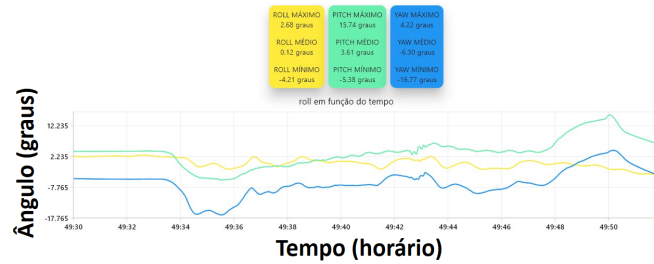
Por fim, o último teste realizado foi a transposição de lombadas. Esse teste tem o intuito de finalizar a análise da dinâmica vertical da motocicleta em questão com a comparação dos resultados com as simulações feitas no programa. Assim, com base nas Figuras 67 e 68 é possível observar os resultados.

Figura 67 – Gráfico com resultados de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* do teste experimental do trajeto com lombadas a direita à 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 68 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto com lombadas a esquerda à 20 km/h



Fonte: Autor.

Com esses gráficos, nota-se que existe uma variação nos parâmetros de rolagem e guinada, assim como a apresentada nas Figuras 63 e 64, resultados do equilíbrio do piloto no início e no decorrer dos testes. Sendo assim, a para análise da dinâmica vertical da motocicleta, foram gerados os gráficos contendo apenas o momento de arfagem, conforme as Figuras 69 e 70.

Figura 69 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto com lombadas a direita à 20 km/h somente *Pitch*



Fonte: Autor.

Figura 70 – Gráfico com resultados do teste experimental do trajeto com lombadas a esquerda à 20 km/h somente *Pitch*



Fonte: Autor.

Diferentemente do resultado da simulação, no teste experimental, torna-se mais difícil a visualização da curva característica do *Pitch* visto que na motocicleta existe a suspensão que realiza o trabalho de amortecimento do veículo ao transpassar algum objeto que poderia gerar essa transferência de carga, reduzindo o impacto direto ao piloto. Porém, ao observar na metade do gráfico, é possível notar que existe

uma elevação no *Pitch* demonstrando que houve um momento de transferência de carga no meio do teste, resultado que corrobora com o evidenciado nas simulações.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

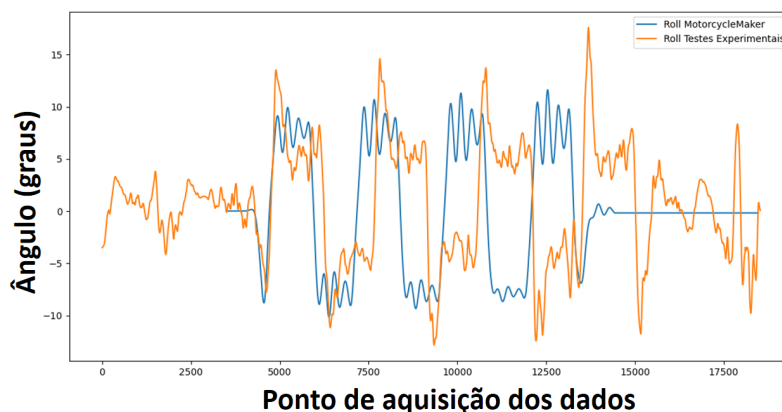
Após a aquisição e a análise dos dados experimentais e do programa MotorcycleMaker, foi possível gerar os gráficos comparativos dos parâmetros principais de cada circuito com o auxílio de um código computacional gerado em linguagem *Python*. Esse código computacional, além de permitir a geração dos gráficos com ambas as informações, permitiu também que fosse feito os ajustes no momento de início da leitura dos dados da simulação, visto que nos testes experimentais a gravação dos dados era iniciada mas somente depois de alguns instantes o piloto saia do repouso com a moto e se iniciavam os testes. Dessa forma, é possível verificar que em todos os gráficos, a linha correspondente aos dados das simulações estará levemente movimentada para o lado para que o início da simulação coincida com o início dos testes experimentais.

Com isso, os dados de *Roll* dos circuitos em formato de 8 e da rótula, incluindo suas variações, foram coletados e gerados gráficos com os dados sobrepostos. Ademais, foi realizado o mesmo para os dados de *Pitch* para o circuito retilíneo e o conjunto de duas e três lombadas.

4.3.1 Comparação circuito em formato de 8

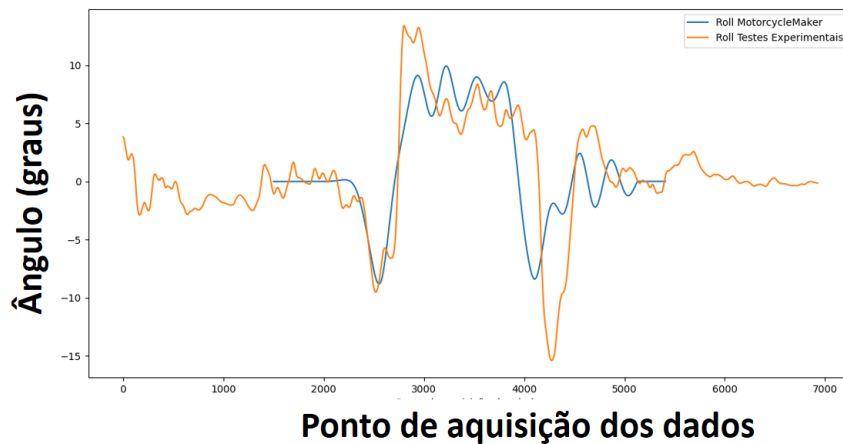
Com as Figuras 71 e 72 é possível observar os dados somente do parâmetro *Roll* do circuito em formato de 8 em suas duas variações (três voltas e somente entrando e saindo) dos dados tanto dos testes experimentais, quanto dos dados da simulação do programa MotorcycleMaker.

Figura 71 – Gráfico com resultados comparativos do circuito em formato de 8 realizando três voltas com o dado somente de *Roll*



Fonte: Autor.

Figura 72 – Gráfico com resultados comparativos do circuito em formato de 8 realizando somente entrada e saída com os dados somente de *Roll*



Fonte: Autor.

Analisando os dados, nota-se que o comprimento e o intervalo dos dados da simulação são ligeiramente menores em comparação com os dados dos testes experimentais. Isso ocorre pois dentro do programa, o piloto consegue realizar um controle muito mais preciso da velocidade, tornando ela de fato constante. Já nos testes experimentais, por se tratar de um piloto humano, ele precisa prestar atenção em mais de uma coisa ao mesmo tempo, ou seja, é necessário ter atenção em seguir o trajeto, manter o equilíbrio e, também, manter a velocidade constante em seus 20 km/h. Além disso, outra variável a ser considerada é o terreno que em um determinado ponto ele possui uma elevação, não sendo totalmente plano, o que dificulta na estabilização da velocidade do teste.

Como o equilíbrio e a permanência na trajetória são parâmetros extremamente importantes, a velocidade acaba sendo verificada com uma frequência menor, já que para isso, o piloto deve tirar de seu campo de visão a trajetória. Sendo assim, o descasamento que ocorre entre as duas linhas do gráfico por volta do ponto 7500 de aquisição de dados refere-se a essa diferença de velocidade média que existe entre os dois modelos.

Porém, por mais que essas linhas não estejam de fato sobrepostas, é possível notar que o padrão de alternância entre uma sequência na parte superior e outra na parte inferior, ademais a oscilação nessas mesmas regiões demonstram o padrão seguido, tanto pela simulação, quanto pelos testes experimentais. Ainda assim, a quantidade de alternâncias também é a mesma comprovando a quantidade de voltas idênticas de ambos os casos.

Outro ponto interessante de ser observado são os pontos de início e fim de ambos os casos. No caso do teste experimental, esse possui uma característica bem oscilatória. Essa oscilação é condizente com a realidade pois, diferentemente da simulação no programa, o teste se inicia com a motocicleta parada e ao iniciar o movimento,

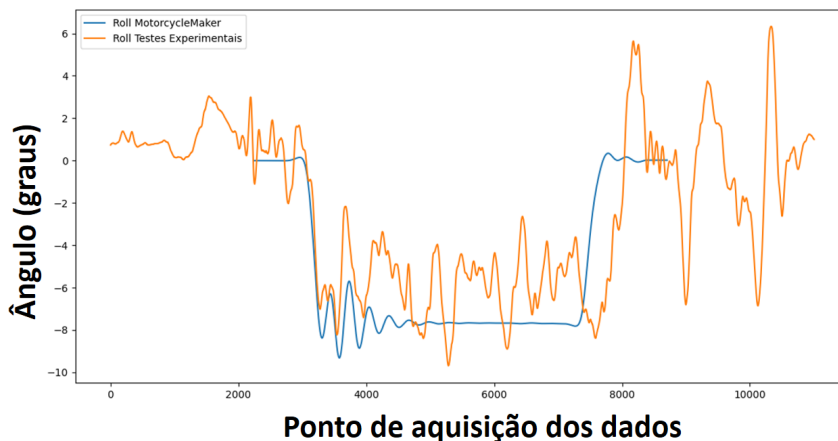
o piloto necessita ter seu equilíbrio estabelecido. Para isso, em certos momentos pode ocorrer uma variação no *Roll* até que seja atingido seu equilíbrio e seu valor comece a ficar estável.

Essa característica mencionada não aparece na simulação pois, como abordado no capítulo 3.2, essa simulação já se inicia com o piloto em movimento a 20 km/h. Sendo assim, tanto em seu início, quanto no final, é possível notar que a linha da característica *Roll* se mantém totalmente estável.

4.3.2 Comparação rôtula com 3 voltas

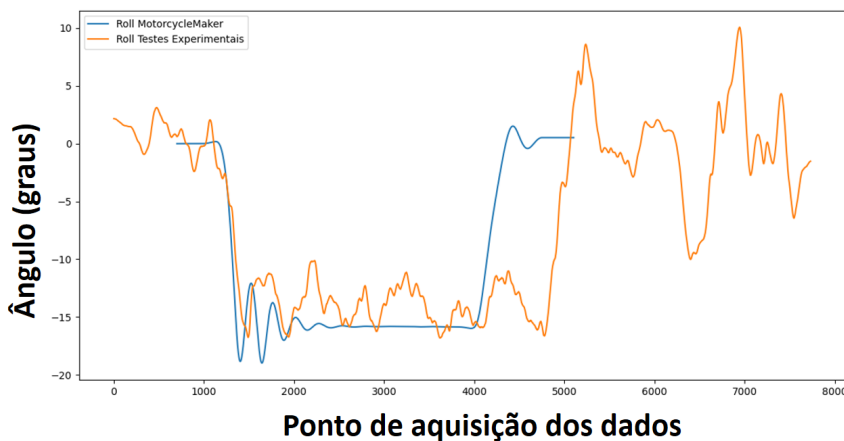
Nas Figuras 73 e 74 observa-se o parâmetro de rolagem da simulação e dos testes experimentais.

Figura 73 – Gráfico com resultados comparativos da rôtula somente *Roll* com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 74 – Gráfico com resultados comparativos da rôtula somente *Roll* com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

Assim como mencionado no capítulo 4.3.1, o início e o final dos dados experimentais possuem uma oscilação por conta de seu equilíbrio para atingimento da

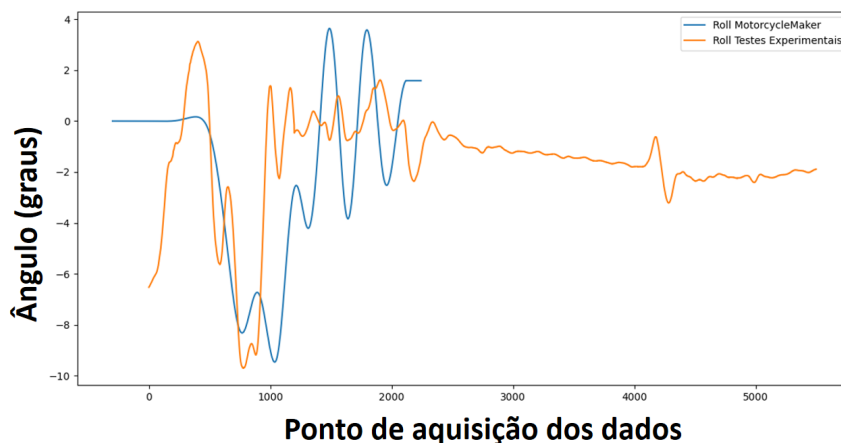
velocidade de testes, o qual não ocorre com a simulação por já ter parametrizada a sua velocidade constante. Ademais, de acordo com a Figura 74, é possível notar que as linhas também não estão em harmonia como na Figura 73. Isso ocorre pela dificuldade no controle da velocidade constante de 30 km/h, o qual o programa realiza com uma parametrização e da utilização de equações matemáticas.

No entanto, um fato interessante de se observar está na concordância entre as duas linhas. Ambas se iniciam em um determinado patamar e em um determinado instante, elas alteram o seu valor se mantendo quase iguais e depois retornam ao mesmo patamar de início, demonstrando a similaridade entre os dados coletados. Essa similaridade traz robustez aos dados adquiridos através dos testes experimentais e também uma robustez aos dados emitidos pelas simulações do programa analisado.

4.3.3 Comparação rótula somente entrando e saindo do circuito

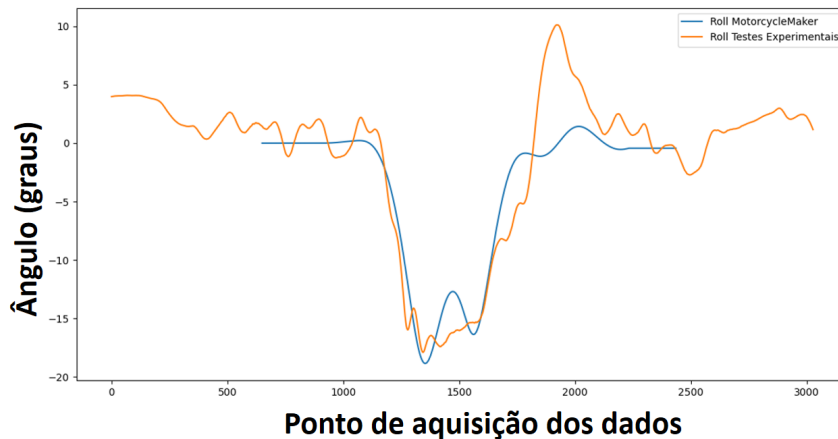
Através dos gráficos demonstrados nas Figuras 75 e 76 é possível observar o comportamento do dado de *Roll* emitido pelos testes experimentais e pelas simulações realizadas no MotorcycleMaker pelo trajeto da rótula entrando e saindo do circuito com velocidades de 20 km/h e 30 km/h, respectivamente.

Figura 75 – Gráfico com resultados comparativos da rótula entrando e saindo do circuito somente *Roll* com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 76 – Gráfico com resultados comparativos da rótula entrando e saindo do circuito somente *Roll* com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

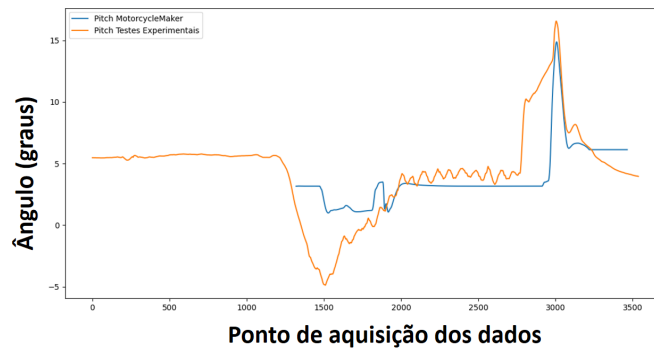
Com esses gráficos, um ponto a ser observado é a facilidade que o piloto dos testes e o piloto do simulador consegue se estabilizar conforme a velocidade aumenta. Essa característica também pode ser observada no capítulo 4.3.2 o qual conforme a velocidade aumenta nos testes, a amplitude das oscilações diminuem. Ao comparar pelas velocidades, essa oscilação é reduzida drasticamente, principalmente ao verificar o tempo que essa oscilação permanece na simulação com o final do percurso.

Outra característica interessante de ser observada está no momento que se inicia a curva e chega a um valor quase ideal de *Roll* para ambos os casos. Esses valores se aproximam e possuem uma oscilação parecida. No caso do teste experimental, esse valor é reduzido principalmente pelo auxílio do piloto em movimentar seu corpo desalinando o centro de gravidade da moto com o do piloto, fazendo com que essa rolagem não seja tão alta e brusca no momento de curva. Porém, mesmo realizando essa manobra, é possível notar que os valores são extremamente próximos, corroborando com a validação da utilização do programa MotorcycleMaker.

4.3.4 Comparação do trajeto retilíneo

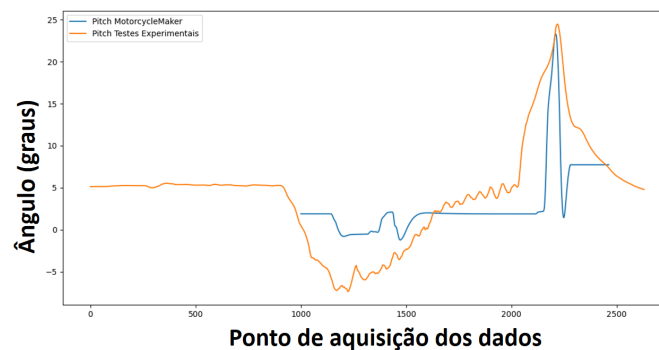
Com o intuito de iniciar a comparação dos dados de *Pitch* para validação do comportamento da motocicleta em comparação com os dados da simulação pelo programa MotorcycleMaker, realizou-se um gráfico comparativo desse dado para o trajeto retilíneo a 20 km/h e a 30 km/h nas Figuras 77 e 78, respectivamente.

Figura 77 – Gráfico com resultados comparativos do trajeto retilíneo somente *Pitch* com velocidade de 20 km/h



Fonte: Autor.

Figura 78 – Gráfico com resultados comparativos do trajeto retilíneo somente *Pitch* com velocidade de 30 km/h



Fonte: Autor.

É possível analisar, para ambos os gráficos, o sincronismo entre os dados. Essa característica pode ser observada pelo período de aquisição de dados para a parte de aceleração (valor negativo de *Pitch*), o período de constância se iniciam quase simultaneamente e, principalmente, no período de frenagem (valor positivo de *Pitch*), o qual atingem quase o mesmo valor de pico no mesmo instante de aquisição de dados.

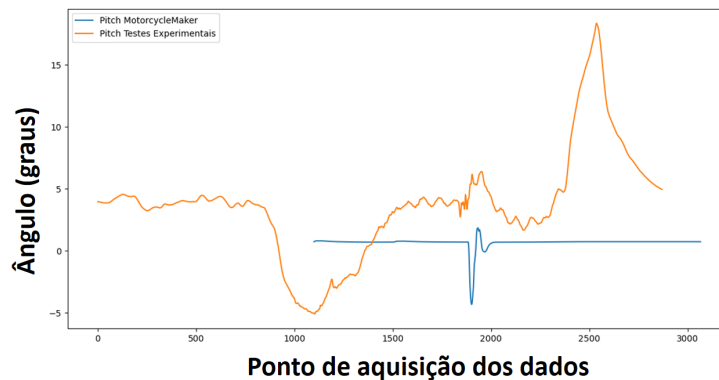
Dessa forma, tanto no teste experimental, quanto na simulação, é possível notar a divisão das três partes do teste (aceleração, velocidade constante e frenagem) e todos no mesmo intervalo de aquisição de dados. A única diferença mais notável está nas oscilações que ocorrem com os dados experimentais. Essas oscilações podem ser justificadas através do controle de velocidade manual que necessita ser feito pelo piloto.

Além disso, outro ponto a ser observado é a amplitude maior do ponto de aceleração. Isso pode ocorrer por uma aceleração mais brusca no início do trajeto. Porém, mesmo com essas pequenas diferenças, é possível notar o quão sólido é a captação dos dados simulados quando comparados diretamente com os dados experimentais.

4.3.5 Comparação do conjunto de lombadas

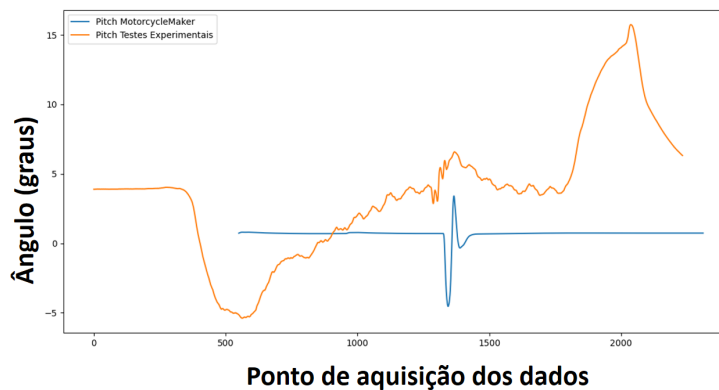
Por fim, com o intuito de realizar mais uma análise dos dados de *Pitch*, foi feita a comparação dos dados de transposição do conjunto de lombadas a direita e a esquerda, representados pelas Figuras 79 e 80, respectivamente.

Figura 79 – Gráfico com resultados comparativos do conjunto de lombadas a direita somente *Pitch*



Fonte: Autor.

Figura 80 – Gráfico com resultados comparativos do conjunto de lombadas a esquerda somente *Pitch*



Fonte: Autor.

Com esses gráficos, algumas divergências podem ser observadas. A primeira delas está no início do teste o qual a simulação permanece perfeitamente estável e os dados experimentais possuem uma oscilação abrupta com um valor negativo de *Pitch*. Essa oscilação está diretamente relacionada a aquisição de velocidade por parte do piloto no teste experimental, já que na simulação, essa velocidade é um parâmetro que não sofre alteração. Outra divergência está no final dos dados que possui uma elevação abrupta do valor de *Pitch*, a qual está relacionada com o instante de frenagem do piloto para o encerramento do teste.

No entanto, ao observar a parte central do teste (faixa de interesse pela transposição pelas lombadas), é possível notar o padrão em ambas as curvas. No gráfico da Figura 79, tanto nos dados experimentais quanto nos dados simulados, nota-se

que existe uma pequena oscilação quando seu valor está em seu patamar superior. Essa pequena oscilação está diretamente ligada a transposição das duas lombadas subsequentes que existe nesse circuito.

Ademais, esse início com um valor negativo na região central dos dados, condiz diretamente com o levantamento abrupto da roda dianteira, característica que ocorre ao transpassar uma lombada. Essa mesma oscilação é notável no mesmo ponto para os dados do teste experimental porém com uma menor amplitude. Isso ocorre por conta do amortecimento gerado pela suspensão dianteira da motocicleta, reduzindo a transmissão desse movimento para a parte traseira da motocicleta, o qual é o local onde o sensor de inclinação WitMotion está instalado.

Essas características da curvatura das linhas dos dados do gráfico relacionado a lombada direita podem ser replicados também para o gráfico da lombada esquerda representado pela Figura 80. O que difere entre ambos está no próprio circuito, visto que no da lombada esquerda não há duas lombadas subsequentes, não gerando assim uma leve oscilação em seu patamar superior.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi possível realizar uma comparação direta dos resultados de um teste experimental com as simulações realizadas com o auxílio de um programa de modelagem de motocicletas, o MotorcycleMaker. Com isso, realizou-se toda a análise teórica e prática da dinâmica vertical, lateral e longitudinal da BMW G 310 GS, motocicleta da categoria *Trail* que vem tomando mercado no Brasil.

Após a coleta dos dados experimentais e a realização de todas as simulações, foi possível verificar ao realizar a parametrização de uma motocicleta com as informações de seu projeto, é possível replicar o seu comportamento dentro de um programa. Essa validação é um ponto crucial para o desenvolvimento de um projeto, o qual pode trazer uma redução de custos de prototipagem para empresa.

Alguns dados tiveram uma divergência entre o seu valor simulado e o seu valor experimental. Grande parte dessa diferença pode ser observada pela dificuldade na padronização de um piloto, tópico extremamente relevante para uma motocicleta, visto que é por meio dele que muitos dos parâmetros são alterados. O segundo fator de alteração dos resultados pode ser observado também pela falta de informações específicas do projeto para parametrização completa da motocicleta, como os dados de suspensão que foram extremamente influenciados na análise experimental do circuito sobre lombadas, gerando uma leve mas notória divergência dos resultados. Ainda, outro ponto de extrema importância é a utilização de apenas um piloto para realização de todos os testes, não sendo possível ter uma média amostral dos dados para verificação de sua similaridade nos estilos de pilotagem com os resultados das simulações.

Além disso, com a comparação dos resultados dos dados experimentais com os dados obtidos nas simulações realizadas no programa MotorcycleMaker, foi possível identificar todos os pontos cruciais de uma análise de dinâmica veicular. Ademais, com essa comparação e com a geração de gráficos com ambos os dados sobrepostos, notou-se a fidelidade dos dados simulados com os dados de testes experimentais. Por fim, também foi possível verificar que, com a utilização dos principais parâmetros para definição da dinâmica de uma motocicleta, é possível realizar uma análise completa, robusta e digna com a realidade. Essa comprovação, sem a utilização de dados específicos de projeto, torna o programa MotorcycleMaker robusto para esse tipo de análise.

O modelo utilizado tem resultados consistentes de forma apropriada às variações propostas, com a alternância de cenários e velocidades, tornando-o robusto para esse modelo de análise. Além disso, é possível notar que o programa é extremamente importante para a verificação da dinâmica com um piloto, visto que nas referências utilizadas nesse trabalho, esse é um tópico crucial e de extrema dificuldade de ser

parametrizado, porém, no MotorcycleMaker, esse piloto pode ser parametrizado de uma forma que se assemelha com os resultados obtidos ao realizar os testes experimentais, principalmente nos momentos que haviam as oscilações dentro das curvas as quais eram resultados do piloto mantendo o equilíbrio do conjunto e ainda assim mantendo-se na trajetória previamente estabelecida.

Dessa forma, com o intuito de analisar a dinâmica total de uma motocicleta, o presente trabalho trouxe uma visualização de dados experimentais com dados de simulação, comprovando seus resultados e que tais programas computacionais podem sim serem utilizados para o desenvolvimento de veículos da categoria *single track*.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para que futuros trabalhos sejam incrementados na área de motocicleta, é recomendado realizar um estudo sobre os padrões de pilotagem para que seja possível realizar uma parametrização mais fiel do piloto dentro do programa.

Além disso, outro viés interessante para ser investigado é o incremento na quantidade de pilotos que realizam os testes para que se possa criar um padrão entre diferentes estilos de condução da motocicleta para que seja realizada a comparação com os dados da simulação. Com essa gama elevada de pilotos, é possível gerar uma curva padrão entre eles e averiguar se essa curva se assemelha aos resultados das simulações com os parâmetros básicos de caracterização do piloto pré-estabelecidos pelo próprio MotorcycleMaker.

Por fim, outro tópico a ser estudado está na realização de testes com outros modelos de motocicletas. Dessa forma, será possível verificar o comportamento dos resultados experimentais com os dados das simulações com outras categorias e verificar a sua similaridade ou divergência com motocicletas de outras categorias.

REFERÊNCIAS

- AG, A. **AS5600 Magnetic Rotary Position Sensor**. 2023. Disponível em: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5600_DS000405_5-00.pdf.
- AUTOESPORTE. **Guia para entender de vez os tipos de motos**. 2019. Acesso em: 21 out. 2024. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/motos/noticia/2019/03/guia-para-entender-de-vez-os-tipos-de-motos.ghtml>.
- COSSALTER, V. **Motorcycle Dynamics**. 2nd. ed. Milão: Lulu.com, 2006.
- COSSALTER, V.; DORIA, A.; LOT, R. Steady turning of two-wheeled vehicles. **Vehicle System Dynamics**, v. 31, n. 2, p. 157–181, 1999.
- NEVES DONADIO, R. das. **MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DIRECIONAL DE MOTOCICLETAS EM CURVA**. 2009. Bacharelado em Engenharia Mecânica — CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA Pe. SABÓIA DE MEDEIROS, São Bernardo do Campo, 2009.
- FALCO, C. **The Art of the Motorcycle and the History of Art (and Condensed Matter Physics)**. Barcelona: APS Meeting Abstracts, 2017.
- FENABRAVE. **Informativo - Emplacamentos**. São Paulo, 2023. 38-44 p. Disponível em: <https://online.fliphtml5.com/ordey/tdvs/#p=39>. Acesso em: 22 de outubro de 2024.
- FENABRAVE. **Informativo - Emplacamentos**. São Paulo, 2024. 43-50 p. Disponível em: <https://online.fliphtml5.com/ordey/psdy/#p=43>. Acesso em: 22 de outubro de 2024.
- FOSSA, S. S. **AVALIAÇÃO DO PERFIL DE PILOTAGEM DO MOTOCICLISTA BRASILEIRO NA CIDADE DE SÃO PAULO E SUA RELAÇÃO COM A DURABILIDADE DO VEÍCULO**. 2019. Dissertação (Mestrado) — CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA Pe. SABÓIA DE MEDEIROS, 2019.
- HAND, D. J. Bicycle dynamics: A review. **Journal of Engineering Mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 114, n. 1, p. 1–12, 1988.
- IPG Automotive. **MotorcycleMaker: Simulation Software for Two-Wheeled Vehicles**. 2023. Disponível em: <https://www.ipg-automotive.com/en/products/motorcyclemaker/>.
- JOINVILLE, U. **Projeto arquitetônico externo**. 2018. Disponível em: <https://direcaoadministrativa.joinville.ufsc.br/projeto-arquitetonico-externo/>.
- KOENEN, C. **Vibrational modes of motorcycle in curves**. Washington D.C.: Motorcycle safety foundation, 1980. II.
- KRENS, T. **The Art of the Motorcycle**. 1st. ed. New York, NY: Solomon R Guggenheim Museum, 1998.

MOTO, A. **Conheça os Principais Tipos de Motos de 2024**. 2024a. Acesso em: 21 out. 2024. Disponível em: <https://albamoto.com.br/tipos-de-motos-conheca/>.

MOTO, A. **A história da motocicleta: da invenção ao estilo de vida**. 2024b. Acesso em: 22 out. 2024. Disponível em: <https://albamoto.com.br/a-historia-da-motocicleta-da-invencao-ao-estilo-de-vida/>.

MOTONLINE. **Tipos de motos: categorias, características e exemplos**. 2023. Acesso em: 22 out. 2024. Disponível em: <https://www.motonline.com.br/noticia/tipos-de-motos-categorias-caracteristicas-exemplos-precos/>.

MOTOS, C. **O que são motos trail?** 2023. Acesso em: 22 out. 2024. Disponível em: <https://www.chapamotoparts.com.br/blog/o-que-sao-motos-trail>.

PACEJKA, H.; BESSELINK, I. Magic formula tyre model with transient properties. **Vehicle System Dynamics**, v. 27, n. S1, p. 234–249, 1997.

PARK, J.; MACKAY, S. **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. Burlington: Elsevier, 2003.

PATSKO, L. F. Tutorial—aplicações, funcionamento e utilização de sensores. **Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica**, p. 84, 2006.

PURCELL, E. M.; MORIN, D. J. **Electricity and Magnetism**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.

SHARP, R. S. The stability and control of motorcycles. **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 13, n. 5, p. 195–213, 1971.

SINGH, S.; GOEL, A. Dynamic stability of a bicycle. **Journal of Applied Mechanics**, American Society of Mechanical Engineers, v. 51, n. 4, p. 1000–1004, 1984.

TANELLI, M.; CORNO, M.; SAVARESI, S. M. **Modelling, Simulation and Control of Two-Wheeled Vehicles**. 1. ed. Milão: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

WHIPPLE, F. J. W. The stability of the motion of a bicycle. **Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 30, n. 22, p. 312–394, 1899.

WIKIPEDIA. **Lista de tipos de motocicletas**. 2023. Acesso em: 21 out. 2024. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_de_tipos_de_motocicletas.

WITMOTION. **WitMotion WTGAHRS1 10-axis High-stability IMU AHRS Inclinometer, Acceleration+Gyro+Angle+Magnet+Air Pressure+GPS Navigation Position Tracker**. 2023. Disponível em: <https://witmotion-sensor.com/products/witmotion-wtgahrs1-10-axis-high-stability-imu-ahrs-inclinometer-high-precision-acceleration-gyro-srsId=AfmBOooC8SqVqgXGZIVTYz-Kmj6EYfNymZb0cphRtyEf7B--48ychZp3>.

ZIMMERMAN, M. **The Essential Guide to Motorcycle Maintenance**. Minneapolis: Motorbooks, 2015.