



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO DE PROJETO DE MOTOCICLETA ELÉTRICA

Igor Bentes Saraiva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha
Castro Pinto Dr.-Ing.

Rio de Janeiro
Abril de 2016

ESTUDO DE PROJETO DE MOTOCICLETA ELÉTRICA

Igor Bentes Saraiva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinado por:

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr.-Ing.

Prof. Fernando Pereira Duda, D.Sc.

Prof. Vitor Ferreira Romano, Dott.Ric.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2016

Saraiva, Igor Bentes

Estudo de projeto de motocicleta elétrica/Igor Bentes
Saraiva. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2016.
XV, 50 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro
Pinto Dr.-Ing.

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso
de Engenharia Mecânica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 38 – 40.

1. Motocicleta. 2. Elétrica. 3. Estrutura. I.
Dr.-Ing., Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,
Curso de Engenharia Mecânica. III. Título.

*À Cecília, minha causa e
consequência.*

Agradecimentos

Agradeço à Cecília por cada palavra, cada sorriso, cada abraço, cada memória eternizada. Foi a mais especial, foi a graça de nossas vidas. E ainda és...

A ti, Mamãe, serei eternamente grato.

Agradeço ao meu Pai, minha maior inspiração e o símbolo mais pleno do homem que almejo um dia me tornar. Por tudo que fez pela Cecília, pela Alessandra e por mim, obrigado.

Agradeço à minha Irmã, minha única eterna companheira e a primeira metade do maior tesouro deixado por Eles. Por ser a mulher da casa tão nova, obrigado.

Agradeço a vocês dois por aprendermos, dia após dia, um com o outro, a viver sem o insubstituível.

Agradeço ao Jônatas pelos 12 anos da mais sincera amizade e confiança mútua. Agradeço ao Hugo pela serenidade ímpar de ver as coisas. Agradeço ao Victor, ao Luiz e ao Eduardo. Sem as risadas e os momentos que tivemos, tudo seria mais difícil.

Agradeço a ela que, durante três anos, foi referência e motivação por trás de cada objetivo. Desculpe-me. Nossos caminhos nos separaram, mas ainda me cativas de alguma forma.

Agradeço ao Colégio Santo Agostinho, meu maior orgulho acadêmico. A gratidão é imensurável.

Agradeço à Equipe Ícarus UFRJ, o melhor primeiro degrau de uma carreira profissional. Os aprendizados que me proporcionou norteiam meus passos e me enchem de orgulho até os dias de hoje.

Agradeço aos brasileiros presentes na *UCLA* em 2014. Viver um ano como aquele cria relações inexplicáveis e a família que formamos é maior que qualquer barreira geográfica.

Agradeço ao Fernando Augusto N. C. Pinto, pelo acolhimento desde meus tempos de fórmula e pela confiança que vai muito além do presente trabalho.

Agradeço ao Programa Forma Engenharia, o que aprendi com aqueles meninos vai muito além de qualquer conhecimento que pude passar a eles.

Agradeço aos meus colegas de classe, pelo companheirismo e pelas disputas saudáveis.

Agradeço ao Átala Freire e à Juliana Loureiro, por me oferecerem a primeira empreitada acadêmica nesta universidade e me apoiarem desde então.

Agradeço à banca, Fernando Duda e Vitor Romano, pela disponibilidade e interesse em participar deste trabalho.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

ESTUDO DE PROJETO DE MOTOCICLETA ELÉTRICA

Igor Bentes Saraiva

Abril/2016

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto Dr.-Ing.

Curso: Engenharia Mecânica

A motocicleta é um meio de transporte simples, versátil e altamente difundido, sendo ideal para iniciar a transição iminente para um futuro de veículos predominantemente elétricos. Escolheu-se uma motocicleta a combustão a ser utilizada como referência e foram definidos os requerimentos do projeto de uma versão equivalente com propulsão elétrica. A metodologia de seleção do motor, da inversora de frequência e da bateria foi detalhada. Foi calculada a razão necessária para transmissão direta, sem necessidade de caixa de marchas. A estrutura foi projetada em CAD e simulada através de análise em elementos finitos. Finalmente, foi feita uma análise financeira comparativa entre a motocicleta a combustão de referência e a elétrica, indicando as vantagens e desvantagens de cada um dos modelos. *Palavras-chaves:* Motocicleta, Elétrica, Estrutura

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

DESIGN STUDY OF ELECTRIC MOTORCYCLE

Igor Bentes Saraiva

April/2016

Advisor: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto Dr.-Ing.

Department: Mechanical Engineering

Motorcycle is a simple, versatile and very popular transportation method, being a perfect candidate to start the imminent transition towards a future where electric vehicles predominate. A combustion powered motorcycle was chosen as a reference model and design requirements were specified for an electric motorcycle alike it. The motor, inverter and battery were selected. The transmission ratio was calculated for a direct drive powertrain. The frame was designed in CAD and simulated through finite element analysis. Finally, a financial study was done, comparing both models and indicating the main advantages and disadvantages of each one.

Keywords: Motorcycle, Electric, Frame

Sumário

| | |
|---|-------------|
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de Tabelas | xiii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivos | 4 |
| 1.3 Organização do Trabalho | 4 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1 Modelagem dinâmica da motocicleta | 5 |
| 2.2 Modelagem mecânica da estrutura | 9 |
| 2.3 Componentes elétricos | 14 |
| 2.3.1 Motores | 14 |
| 2.3.2 Inversoras de frequência | 16 |
| 2.3.3 Baterias | 16 |
| 2.3.4 Freios Regenerativos | 18 |
| 3 Metodologia | 19 |
| 3.1 Requerimentos do projeto | 19 |
| 3.2 Trem de força | 20 |
| 3.3 Bateria | 22 |
| 3.4 Estrutura | 24 |
| 3.5 Transmissão | 30 |
| 3.6 Sistemas Dianteiro e Traseiro | 33 |
| 4 Análise econômica | 34 |
| 4.1 Subsistemas e custos | 34 |
| 4.2 Discussão | 35 |
| 5 Considerações Finais | 36 |
| 5.1 Conclusão | 36 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2 | Trabalhos Futuros | 37 |
| | Referências Bibliográficas | 38 |
| A | Imagens do software <i>Solidworks</i> | 41 |
| B | Vistas geométricas | 45 |
| B.1 | Estrutura | 45 |
| B.1.1 | Vista terceiro diedro | 45 |
| B.1.2 | Vista isométrica | 45 |
| B.1.3 | Tubos para dobra | 45 |
| B.1.4 | Tabela de cortes | 45 |
| B.2 | Motor elétrico | 45 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Hildebrand & Wolfmüller, primeira motocicleta de produção em série | 2 |
| 1.2 | Sokol1000, motocicleta polonesa utilizada na primeira guerra mundial | 2 |
| 1.3 | Comparação de consumo e preço entre diferentes tipos de veículos . . | 3 |
| 1.4 | Evolução da emissão de gases efeito estufa | 3 |
| 2.1 | Graus de liberdade de uma motocicleta na condição de não-deslizamento | 6 |
| 2.2 | Principais parâmetros geométricos nas motocicletas | 7 |
| 2.3 | Efeitos estabilizantes e desestabilizantes de trail positivos e negativos | 8 |
| 2.4 | Pontos de vínculo com as suspensões | 9 |
| 2.5 | Estrutura em alumínio fundido | 9 |
| 2.6 | Principais forças envolvidas na motocicleta e estrutura | 10 |
| 2.7 | Forças longitudinais nos pneus | 11 |
| 2.8 | Diagrama de corpo livre para o garfo dianteiro | 12 |
| 2.9 | Diagrama de corpo livre para a suspensão traseira | 13 |
| 2.10 | Comparação curvas de torque e eficiência | 14 |
| 2.11 | Zonas de torque e potência | 15 |
| 2.12 | Inversora de frequência SEVCON Gen4 | 16 |
| 2.13 | Evolução da eficiência das baterias | 17 |
| 2.14 | Evolução da eficiência das baterias | 17 |
| 3.1 | Honda CB 250 Twister 2016 | 20 |
| 3.2 | Motor PMAC DLC28 | 22 |
| 3.3 | Módulo de bateria com BMS e carregador | 24 |
| 3.4 | Estrutura da Honda CB 250 Twister | 25 |
| 3.5 | Vista isométrica da estrutura proposta | 25 |
| 3.6 | Vista isométrica da montagem da motocicleta | 26 |
| 3.7 | Condições de contorno da simulação | 28 |
| 3.8 | Vista isométrica dos contornos de tensões na frenagem | 29 |
| 3.9 | Vista isométrica dos contornos de tensões na aceleração | 29 |
| A.1 | Vista lateral da estrutura proposta | 41 |
| A.2 | Vista isométrica da estrutura proposta | 42 |

| | | |
|-----|---|----|
| A.3 | Vista lateral da montagem inicial | 42 |
| A.4 | Vista isométrica da montagem inicial | 43 |
| A.5 | Vista lateral do resultado deformado - frenagem | 43 |
| A.6 | Vista isométrica do resultado - frenagem | 43 |
| A.7 | Vista lateral do resultado deformado - aceleração | 44 |
| A.8 | Vista isométrica do resultado - aceleração | 44 |
| | | |
| B.1 | Vista do terceiro diedro da estrutura | 46 |
| B.2 | Vista isométrica da estrutura | 47 |
| B.3 | Tubos para dobra | 48 |
| B.4 | Tabela de cortes - comprimento e ângulos | 49 |
| B.5 | Desenho geométrico do motor selecionado | 50 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Coefficientes de arrasto para diferentes motocicletas | 8 |
| 2.2 | Pontos nas curvas de torque e potência do motor elétrico | 16 |
| 2.3 | Comparação de autonomia | 18 |
| 3.1 | Especificações - Honda CB 250 Twister 2016 | 19 |
| 3.2 | Composição de massa da motocicleta | 26 |
| 3.3 | Dados para cálculos das forças na estrutura | 27 |
| 3.4 | Especificações - Honda CB 250 Twister 2016 | 30 |
| 4.1 | Custos - Motocicleta elétrica | 34 |
| 4.2 | Custos por quilômetro percorrido | 35 |
| B.1 | Tabela de cortes - 25.4x2.4mm | 49 |
| B.2 | Tabela de cortes - 51.3x3.2mm | 49 |

Nomenclatura

$A_{frontal}$ Área frontal da motocicleta

$C_{autonomia}$ Razão entre distância percorrida e energia disposta no eixo da roda

C_D Coeficiente de arrasto

D_1 Distância entre eixo traseiro e ponto de pivoteamento da suspensão traseira

D_1 Distância entre mancal superior do suporte do eixo de direção e eixo da roda dianteira

d_1 Distância entre mancais do suporte do eixo de direção

d_2 Distância entre ponto de ancoragem do amortecedor traseiro e ponto de pivoteamento da suspensão traseira

$D_{percorrida}$ Distância percorrida

$E_{gasolina}$ Energia contida em um litro de gasolina

E_{roda} Energia disposta no eixo da roda

F'_{1-6} Forças exercidas pela estrutura

F_{1-7} Forças exercidas na estrutura

$F_{arrasto}$ Força de arrasto sofrida pela motocicleta

$F_{frenagem}$ Força de frenagem

F_{pneu} Força trativa do pneu traseiro

$F_{t,f}$ Força trativa ou de frenagem

g Aceleração da gravidade local

$i_{motor,roda}$ Razão de transmissão entre eixos do motor e da roda

M_1 Momento exercido na estrutura

m_{total} Massa total da moto
 P_{motor} Potência no eixo do motor
 $P_{piloto,carona}$ Forças devido ao peso do piloto e do carona
 P_{roda} Potência no eixo da roda
 P_{total} Peso total da motocicleta
 R_r Raio do pneu traseiro
 v Velocidade da motocicleta
 v_{max} Velocidade máxima atingida pela moto

Letras gregas

α Ângulo de caster
 β Ângulo de inclinação do amortecedor traseiro com a vertical
 η_{total} Eficiência combinada do motor a combustão, embreagem, caixa de marchas e sistema de transmissão
 $\eta_{transmissao}$ Eficiência do sistema de transmissão
 ω_{motor} Velocidade de rotação no eixo do motor
 ω_{roda} Velocidade de rotação no eixo da roda
 ρ_{ar} Massa específica do ar
 τ_{motor} Torque no eixo motor
 τ_{roda} Torque no eixo da roda

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Motocicletas estão entre os meios de locomoção motorizados mais antigos utilizados pelos humanos e hoje em dia encontram-se presentes de forma significativa em praticamente todas as cidades do mundo. As motocicletas são famosas por sua versatilidade e pelo prazer ligado a sua direção, sendo utilizadas tanto para atividades que requerem locomoção rápida, quanto para viagens ou passeios nos quais o simples ato de dirigi-las é prazeroso.

Os primeiros registros de motocicletas são de 1867, quando Ernest Michaux, filho de um ferreiro francês, colocou um motor a vapor em uma das bicicletas produzidas por seu pai. Os anos seguintes foram marcados por diversos avanços e diferentes modelos sendo utilizados experimentalmente por toda a Europa e América do Norte, principalmente por parte de fabricantes de bicicletas interessados em adaptar motores de combustão internas aos seus produtos. Em 1894, Hildebrand & Wolfmüller se tornou a primeira motocicleta de produção em série, sendo também a primeira a ser chamada por tal nome. Observando o modelo, ainda fica clara sua diferença quando comparada às motocicletas atuais, principalmente devido ao sistema de transmissão entre o motor e a roda traseira.

Durante a primeira guerra mundial, as motocicletas passaram a ser de utilização estratégica para comunicação e envio de suprimentos para as tropas na linha de frente. Grandes esforços foram concentrados para desenvolvimento das mesmas e, observando um modelo de tal época já é possível perceber sua grande semelhança com as motocicletas atuais.

Justamente devido a sua simplicidade, grande parte da evolução das motocicletas ocorreu de forma rápida e estagnou-se logo em seguida. Em linhas gerais, a Sokol 1000 (figura 1.2), utilizado em 1915 pelo exercito polonês, pouco difere de uma motocicleta atual e dificilmente seria classificada como uma bicicleta centenária se



Figura 1.1: Hildebrand & Wolfmüller, primeira motocicleta de produção em série.
Fonte: HYPESCIENCE [2016].



Figura 1.2: Sokol1000, motocicleta polonesa utilizada na primeira guerra mundial.
Fonte: CONTRIBUTORS [2016]

fosse vista circulando por uma cidade.

A não-evolução de sistemas como estrutura, suspensões e direção, não é alarmante uma vez que, de fato, se caracterizam sistemas relativamente simples e que satisfazem muito bem as necessidades das motocicletas.

A estagnação de maior preocupação vem do sistema principal que a caracteriza como mais do que uma motocicleta: o motor. Este, por incrível que pareça, teve uma evolução tímida no último século e é o principal foco deste trabalho. Os motores a combustão possuem aproximadamente 150 anos (THE COLUMBIA ELECTRONIC ENCYCLOPEDIA [2012]) e sua eficiência energética, apesar de ter evoluído bastante deste então, continua sendo baixa quando comparada a fontes elétricas de potência. A (figura 1.3) mostra uma comparação entre diferentes tipos motores

(em veículos de medio porte), seus diferentes consumos (equivalência de milhas por galão) e preços. Fica clara a inferioridade de motores a combustão frente as outras tecnologias.

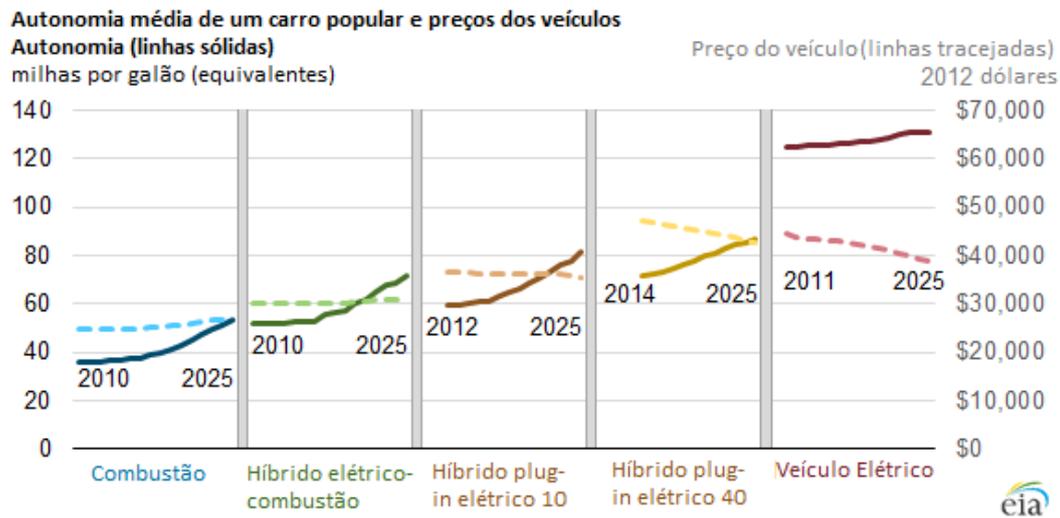


Figura 1.3: Comparação de consumo e preço entre diferentes tipos de veículos. Fonte: U.S. Energy Information Administration.

Prospectando-se um futuro em que a matriz energética deixará de depender majoritariamente de combustíveis fósseis, a utilização de propulsão elétrica em veículos vem se intensificando nos últimos anos mas ainda é tímida ao perceber a importância de tal transição. A emissão de gases do efeito estufa, comprovadamente maléfica para o planeta e principais causadores do atual aquecimento global, se dá em grande parte devido a grande utilização de combustíveis fósseis. A figura 1.4

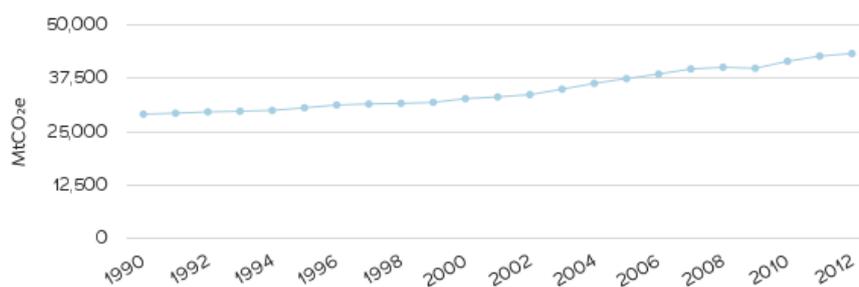


Figura 1.4: Evolução da emissão de gases efeito estufa. Fonte: INSTITUTE [2016].

mostra a evolução dos níveis de emissão de 1990 até 2012, indicando um aumento de aproximadamente 50%. Além disso, a emissão proveniente de meios de transporte representa atualmente 14% da emissão total (INSTITUTE [2016]).

Sendo assim, é clara a importância da transição para esta nova forma de propulsão e a motocicleta, dada sua simplicidade, versatilidade e difusão em todo o mundo, é uma ótima candidata para se tornar pioneira nestas mudanças.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é realizar o estudo de projeto para motocicleta movida unicamente a motor elétrico, explicitando a metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento. Espera-se que o conteúdo deste trabalho seja suficiente para fabricação de um protótipo funcional a partir de uma motocicleta a combustão de referência.

Uma vez definidos os requerimentos para a motocicleta elétrica, o trabalho deve ser capaz de expôr com clareza as metodologias necessárias para:

- Selecionar o motor elétrico;
- Dimensionar e selecionar as baterias;
- Projetar a estrutura;
- Dimensionar e selecionar o sistema de transmissão;
- Ponderar as vantagens e desvantagens entre as motocicletas elétricas e a combustão.

1.3 Organização do Trabalho

O capítulo dois é destinado à contextualização dos principais conceitos utilizados por todo o projeto. Há uma introdução à modelagem dinâmica da motocicleta e alguns dos parâmetros geométricos determinantes, seguida por uma análise detalhada da mecânica da estrutura. Finalmente, os sistemas elétricos e seus componentes são abordados, explicitando alguns conceitos importantes para a seleção dos mesmos.

É importante notar que nem todos os conceitos mencionados neste capítulo serão utilizados durante o trabalho. No entanto são interessantes de se ter em mente em caso de não utilização de parâmetros geométricos iguais ao da motocicleta a combustão.

No capítulo três apresenta-se a metodologia utilizada e nele são feitas as principais escolhas de projeto que culminam no produto final. São apresentadas as metodologias para dimensionamento do motor elétrico e do banco de baterias, para o desenvolvimento da estrutura e para o dimensionamento e seleção dos componentes de transmissão. Finalmente, os sistemas dianteiros e traseiros são abordados.

O capítulo quatro mostra uma quebra de custos da motocicleta proposta seguida, comparando e discutindo a cerca das vantagens econômicas de longo prazo na utilização veículos elétricos ao invés de veículos a combustão.

No capítulo cinco são feitas as conclusões finais e sugeridos possíveis trabalhos futuros para complementar o presente estudo.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Modelagem dinâmica da motocicleta

Do ponto de vista de modelagem dinâmica, as motocicletas estão entre os veículos mais simples de serem modeladas e, desconsiderando as atuações das suspensões, ela pode ser definida a partir de quatro corpos rígidos:

- Montagem traseira (estrutura, tanque de combustível, motor e trem de força)
- Montagem dianteira (garfo dianteiro, e sistema de direção)
- Roda dianteira
- Roda traseira.

Esses corpos estão conectados por três juntas de revolução: o eixo de direção e os dois eixos de rotação das rodas. Cada uma destas juntas possui cinco graus de liberdade, enquanto que cada uma das rodas possui também a condição de contato com o solo. Considerando a hipótese de não-deslizamento dos pneus com o solo, o sistema terá três graus de liberdade:

- Deslocamento longitudinal da motocicleta (representado pela rotação da roda traseira)
- Rolagem através da linha que une os pontos de contato de ambos os pneus (no plano do solo)
- Rotação da direção.

É importante notar que a hipótese de não-deslizamento é uma simplificação uma vez que ocorre deslizamento entre os pneus e o solo. Tanto as forças longitudinais quanto as forças laterais produzidas pelos pneus decorrem de pequenos deslizamentos que acontecem entre o pneu e o solo e que são responsáveis pela deformação da borracha

do pneu, resultando nas forças exercidas pelo mesmo. No entanto, para uma análise em regimes estacionários ou com pequenos ângulos de inclinação da motocicleta e de rotação do guidão, este modelo com três graus de liberdade atende bem ao objetivo do trabalho. A figura 2.1 ilustra os corpos rígidos e os graus de liberdade.

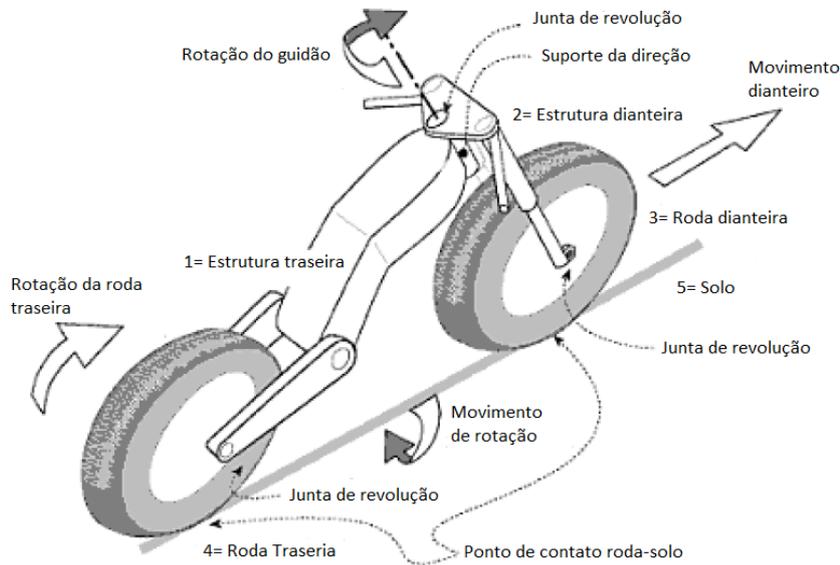


Figura 2.1: Graus de liberdade de uma motocicleta na condição de não-deslizamento. Adaptado de COSSALTER [2006].

A simplicidade das motocicletas é ainda mais notória quando se pensa nos parâmetros geométricos envolvidos. É possível que se definam cinco parâmetros responsáveis por grande parte dos aspectos dinâmicos das motocicletas, sendo estes determinantes na dirigibilidade, *performance* e estilo entre diferentes modelos. São eles:

- Distância entre eixos;
- *Trail*;
- Ângulo de caster;
- Raio da roda traseira;
- Raio da roda dianteira;

A figura 2.2 explicita cada um dos parâmetros e também outras relações decorrente dos mesmos e que também são importantes para a dinâmica da motocicleta. Vale ressaltar estes tópicos são aprofundados apenas tanto quanto necessário para este trabalho uma vez que uma análise dinâmica mais profunda está fora do escopo deste trabalho.

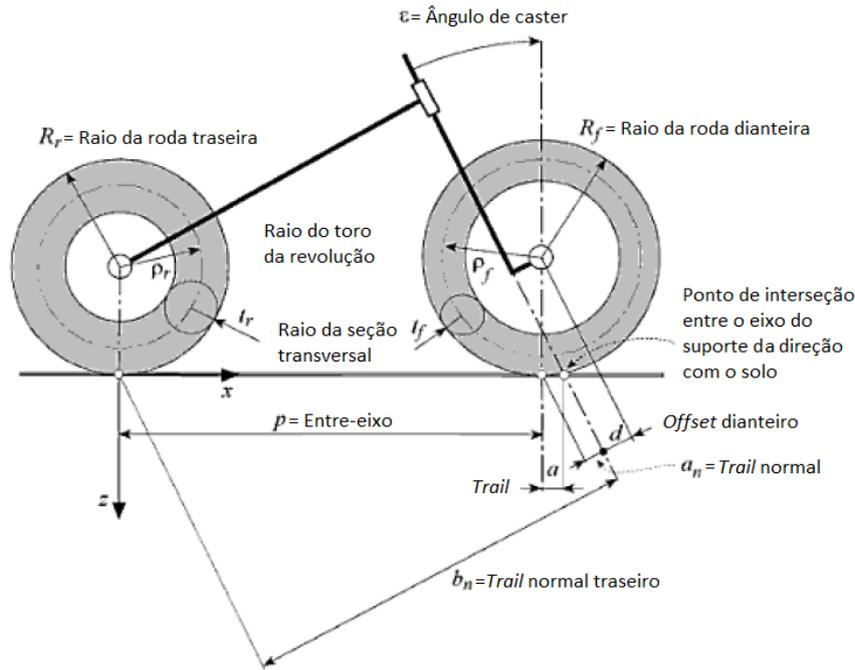


Figura 2.2: Principais parâmetros geométricos nas motocicletas. Adaptado de COS-SALTER [2006].

A distância entre eixos, aliada ao ângulo de caster, são especialmente importantes para a dirigibilidade da motocicleta na percepção do motorista. Um aumento no entre-eixo causa:

- Aumento desfavorável na deformação flexional e torsional da estrutura (quanto menos rígida pior a dirigibilidade);
- Diminuição desfavorável na raio mínimo de curvatura;
- Aumento desfavorável no torque necessário para rotação do guidão;
- Diminuição favorável na transferência de carga entre os eixos;
- Redução favorável nas variações de ângulo de ataque (ângulo entre o plano que passa pelos eixos das rodas e o plano do solo) da motocicleta devido a imperfeições na estrada;
- Aumento favorável na estabilidade direcional da motocicleta.

O ângulo de caster, por sua vez, está diretamente associado ao desalinhamento do garfo e ao raio da roda dianteira, e juntos definem o *trail* (vide figura 2.2) da motocicleta, um dos mais importantes parâmetros para a estabilidade da motocicleta, principalmente em movimentos retilíneos.

O *trail* é determinante pois irá definir a forma como as forças exercidas na roda dianteira serão passadas para o garfo e conseqüentemente para o guidão,

Tabela 2.1: Coeficientes de arrasto para diferentes motocicletas

| Modelo | Piloto inclinado | Piloto sentado |
|------------------|------------------|----------------|
| Honda Blackbird | 0,44 | 0,72 |
| Ducati 916 | 0,49 | 0,61 |
| Yama R1 (1998) | 0,57 | 0,62 |
| Kawasaki GPZ900R | 0,36 | 0,46 |
| Suzuki Hayabusa | 0,31 | - |

refletindo na dirigibilidade do piloto. Um *trail* negativo (figura 2.3a), causa um efeito desestabilizante em que uma perturbação gera um momento desestabilizante indesejado na motocicleta. Desta forma, o *trail* desejado é sempre positivo, de forma que qualquer perturbação gere um momento estabilizante, afetando minimamente o movimento da motocicleta. No entanto, *trails* muito grande irão necessitar de torques maiores no guidão para vencer as forças de reação na roda (uma vez que o braço é maior), prejudicando a dirigibilidade. De forma geral, busca-se valores pequenos de *trail* que balanceiem um torque auto-alinhante capaz de passar ao motorista boa percepção da direção com um torque não muito alto necessário para girar o guidão sem causar desconfortos.

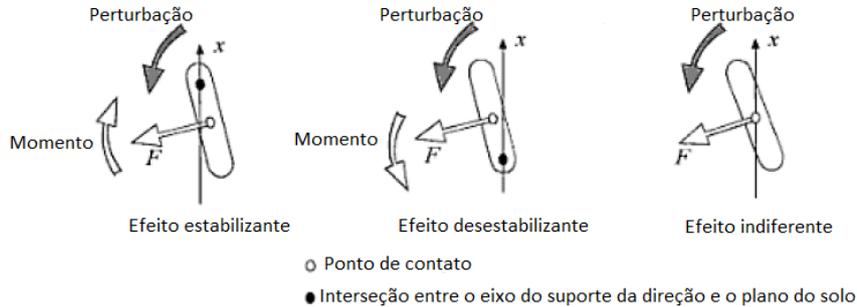


Figura 2.3: Efeitos estabilizantes e desestabilizantes de trail positivos e negativos. Adaptado de COSSALTER [2006].

Um outro conceito importante que será necessário nas seções seguintes é o de velocidade limite da motocicleta. Essa velocidade representa o limite que motocicleta pode atingir e dependerá do torque disponível na roda. Ela pode ser calculado a partir da força de arrasto que a motocicleta sofre (equação (2.1)) e também da força tratativa que o pneu exerce no solo (equação (2.2)).

$$F_{arrasto} = \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 C_D A_{frontal} \quad (2.1)$$

$$F_{pneu} = \tau_{roda} R_r \quad (2.2)$$

Alguns exemplos de coeficientes de arrasto de motocicletas estão presentes na tabela 2.1.

2.2 Modelagem mecânica da estrutura

A estrutura da motocicleta, também chamada de quadro, é o principal componente responsável por garantir a rigidez do veículo e a união entre os sistemas suspensos e os sistemas não suspensos.

A estrutura se liga à suspensão dianteira através de um tubo no plano vertical que permite o pivoteamento do garfo dianteiro e se estende até a parte traseira, onde possui um tubo no plano horizontal que permite o pivoteamento da suspensão traseira (figura 2.4). Existem diferentes tipos de estruturas, sendo as mais comuns compostas por tubos de aço soldados ou alumínio fundidos (figura 2.5).

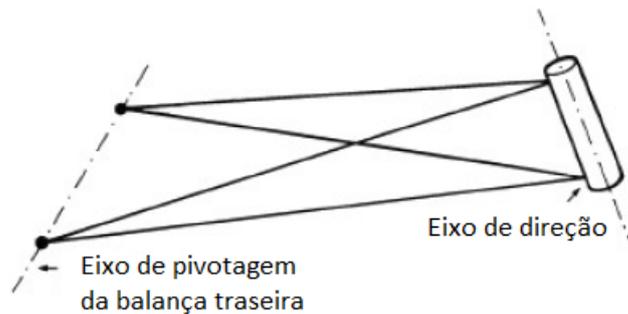


Figura 2.4: Pontos de vínculo com as suspensões. Adaptado de FOALE [2002].



Figura 2.5: Estrutura em alumínio fundido. Fonte: FOALE [2002].

De forma geral, busca-se a melhor rigidez possível ao se desenvolver uma estrutura para motocicletas, tendo como contrapartida o peso da mesma. Sendo assim, a relação rigidez/peso é bastante importante no desenvolvimento de uma estrutura.

Para otimizar esta relação é necessário entender quais cargas são submetidas a estrutura. A figura 2.6 mostra as principais forças que a estrutura da motocicleta irá receber para o caso de um regime estacionário em linha reta.

- A força F_1 na direção do eixo de direção e a força F_2 na direção do amortecedor

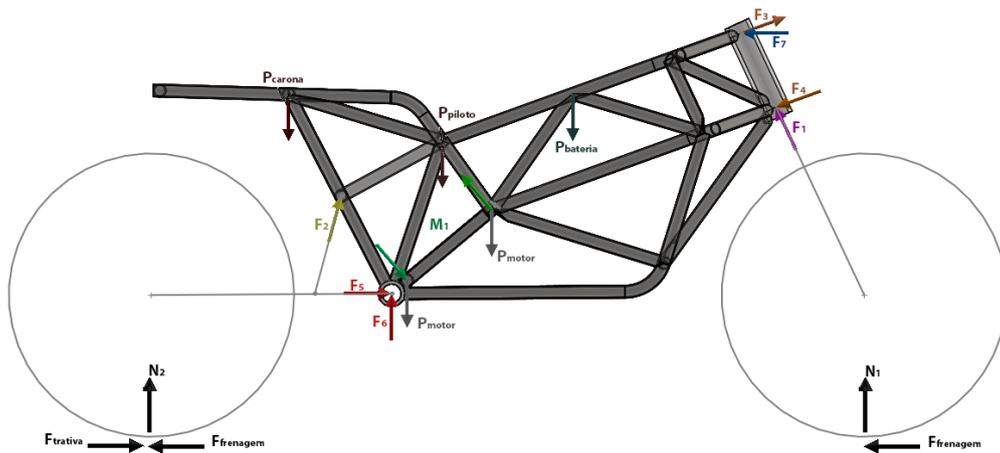


Figura 2.6: Principais forças envolvidas na motocicleta e estrutura.

traseiro. Ambas estas forças tem, em condições normais, sentido para cima e são em sua maior parte devido as reações do peso da motocicleta;

- As força F_3 e F_4 também são reação ao peso suspenso mas surgem com maior intensidade quando há frenagem devido a força $F_{frenagem}$ transmitida da roda para o quadro pelo garfo. Elas geram um momento em relação a este tubo da estrutura;
- O par de forças F_5 e F_6 é relativo ao vínculo de pivoteamento da suspensão traseira. A direção e os sentidos destas forças pode variar dependendo se a moto está sob aceleração ou sob frenagem;
- A força F_7 é a reação na estrutura da força que o piloto faz no guidão durante acelerações e frenagens. Sua magnitude pode ser calculada sabendo a massa do piloto e a aceleração a qual ele está submetido.
- O momento M_1 (representado por duas forças de mesma direção e sentidos opostos) surge devido ao torque aplicado pelo motor. É importante notar que, na realidade, o torque que o motor aplica na estrutura é de mesmo módulo que o torque sofrido na roda traseira devido a força trativa que a mesma exerce. Sendo assim, o torque está condicionado ao não-deslizamento da roda traseira e portanto pode-se calculá-lo através da força máxima trativa que ela pode exercer. No entanto, pode ocorrer uma situação de travamento total da roda traseira (devido a atuação do freio ou quaisquer outros motivos) em que o motor é acionado, podendo então aplicar a estrutura o seu torque máximo.
- As forças P_{piloto} , P_{carona} , P_{motor} e $P_{bateria}$ são relativas aos pesos que o piloto, do carona, do motor e da bateria, respectivamente, exercem na estrutura. Tais

forças foram consideradas como cargas distribuídas ao longo dos tubos que suportam o banco da motocicleta e as fixações do motor e da bateria.

Para achar a magnitude das forças, convêm separar a análise em duas partes: uma para as forças envolvendo os sistemas dianteiras (F_1 , F_3 e F_4) e outra para as forças envolvendo o sistema traseiro (F_2 , F_5 e F_6). Para o projeto da estrutura, é interessante saber as cargas as quais ela será submetida em suas condições limite, para as quais as tensões em seus elementos serão máximas. Pode-se assumir que no caso limite todo o peso da motocicleta se concentrará em cada um dos sistemas em uma condição de transferência total de carga, caracterizam as duas partes da análise.

Além disso, é preciso saber a magnitude máxima das forças de frenagem e tração que a motocicleta sofre. Para tal, é necessário determinar o coeficiente de atrito no par pneu-solo. A determinação deste coeficiente de forma teórica é de grande complexidade e muitos autores apresentam extensos trabalhos abordando unicamente este tema. Uma vez que a determinação deste coeficiente está fora do escopo deste trabalho, se fará uso da curva na figura 2.7 que relaciona a força longitudinal exercida pelo pneu com a carga ao qual ele está submetido, conforme PACEJKAA e BAKKERB [1992]). Como é possível observar, o pico das curvas (para

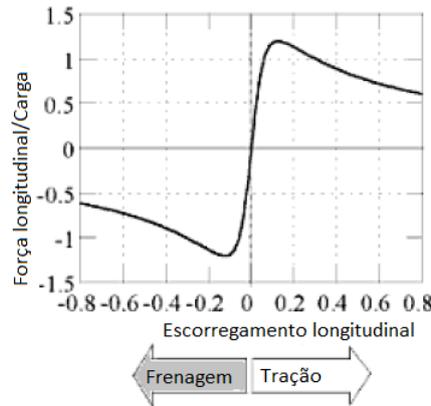


Figura 2.7: Forças longitudinais nos pneus. Adaptado de COSSALTER [2006]

escorregamento longitudinal de aproximadamente 0,2) indica uma relação de 1,3 e 1,2 para as razões força de frenagem e força de tração sob carregamento, respectivamente.

Isolando os sistemas conforme mencionado anteriormente, tem-se o diagrama para a suspensão dianteira conforme figura 2.8. Resolvendo as equações para o equilíbrio da suspensão dianteira, tem-se no eixo da direção:

$$F_1' - P_{total} \cos \alpha - F_{frenagem} \sin \alpha = 0 \quad (2.3)$$

$$F_1' = P_{total} \cos \alpha + F_{frenagem} \sin \alpha \quad (2.4)$$

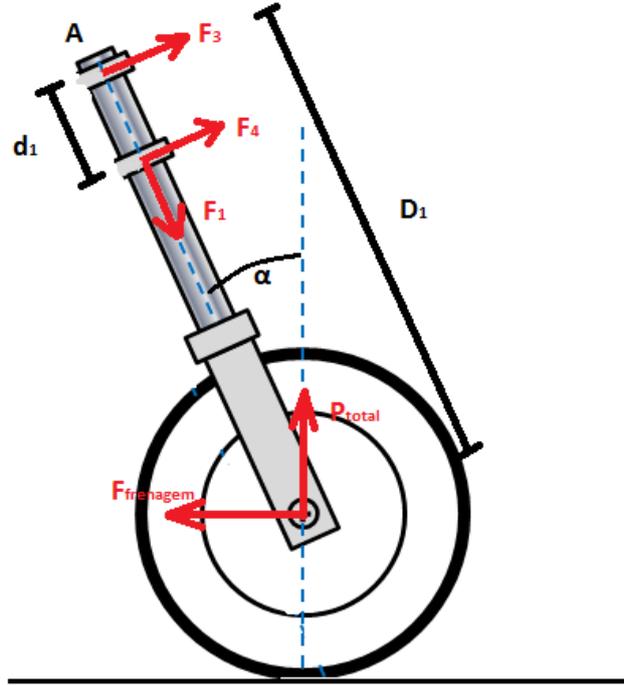


Figura 2.8: Diagrama de corpo livre para o garfo dianteiro.

Fazendo o equilíbrio de forças no eixo perpendicular ao da direção, tem-se:

$$F'_3 + F'_4 - F_{frenagem} \cos \alpha + P_{total} \sin \alpha = 0, \quad (2.5)$$

isolando F'_3 :

$$F'_3 = F_{frenagem} \cos \alpha - P_{total} \sin \alpha - F'_4 \quad (2.6)$$

e, em seguida, fazendo o somatório dos momentos em relação ao ponto A, tem-se:

$$F'_4 d_1 + (P_{total} \sin \alpha - F_{frenagem} \cos \alpha) D_1 = 0. \quad (2.7)$$

Logo:

$$F'_4 = (F_{frenagem} \cos \alpha - P_{total} \sin \alpha) \frac{D_1}{d_1}, \quad (2.8)$$

e

$$F'_3 = F_{frenagem} \cos \alpha - P_{total} \sin \alpha - (F_{frenagem} \cos \alpha - P_{total} \sin \alpha) \frac{D_1}{d_1}. \quad (2.9)$$

Sendo F'_1 , F'_3 e F'_4 as forças que a estrutura exerce na suspensão dianteira. As

forças F_1 , F_3 e F_4 exercidas na estrutura possuem a mesma direção, mesmo módulo e sentidos sentidos contrário.

Para a suspensão traseira, o diagrama de corpo livre é apresentado na figura 2.9. As forças $F_{frenagem}$ e $F_{trativa}$ são representadas por $F_{t,f}$ para simplificação uma vez que não irão coexistir e pode-se apenas alterar o sinal e módulo para substituir uma pela outra, não impactando na resolução literal para as forças.

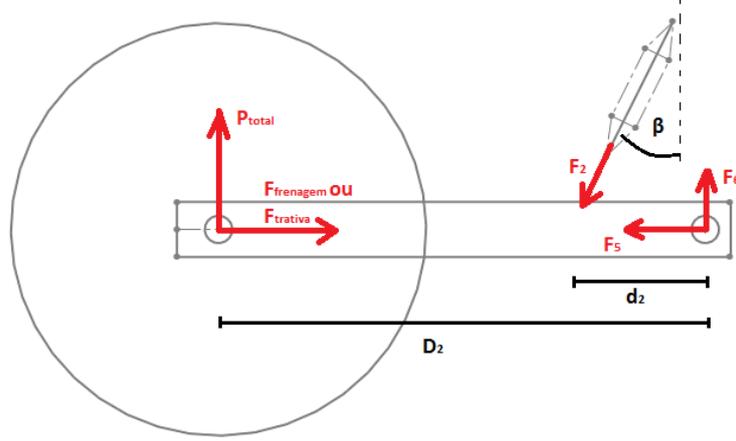


Figura 2.9: Diagrama de corpo livre para a suspensão traseira.

Resolvendo as equações para o equilíbrio da suspensão traseira, tem-se no eixo horizontal:

$$F_{t,f} - F'_5 - F_2 \sin \beta = 0, \quad (2.10)$$

logo:

$$F'_5 = F_{t,f} - F_2 \sin \beta. \quad (2.11)$$

Fazendo o equilíbrio no eixo vertical:

$$P_{total} - F_2 \cos \beta + F_6 = 0, \quad (2.12)$$

logo:

$$F'_6 = F_2 \cos \beta - P_{total}. \quad (2.13)$$

Fazendo o somatório dos momentos em relação ao ponto de pivotação da suspensão traseira:

$$P_{total} D_2 - F_2 \cos \beta d_2 = 0, \quad (2.14)$$

logo:

$$F'_2 = P_{total} \frac{D_2}{d_2 \cos \beta}. \quad (2.15)$$

Sendo assim:

$$F'_5 = F_{t,f} - P_{total} \frac{D_2}{d_2} \tan \beta \quad (2.16)$$

e

$$F'_6 = P_{total} \left(\frac{D_2}{d_2} - 1 \right). \quad (2.17)$$

Novamente sendo F'_2 , F'_5 e F'_6 as forças que a estrutura exerce na suspensão dianteira. As forças F_2 , F_5 e F_6 exercidas na estrutura possuem a mesma direção, mesmo módulo e sentidos sentidos contrário.

2.3 Componentes elétricos

2.3.1 Motores

Os motores elétricos, de forma geral, são capazes de produzir elevados torques mesmo em baixas rotações e mantê-los praticamente constantes durante uma ampla faixa de rotações. Isso é uma ótima vantagem frente a motores a combustão interna, que em geral possuem picos de torque e potência em rotações específicas e valores mais baixos para outras. Além disso, conforme já mencionado, a eficiência dos motores elétricos é muito superior aos motores de combustão interna, podendo chegar a mais de 90% dependendo do ponto de operação. A figura 2.10 mostra uma comparação de torque e eficiência entre um motor elétrico e um motor a combustão.

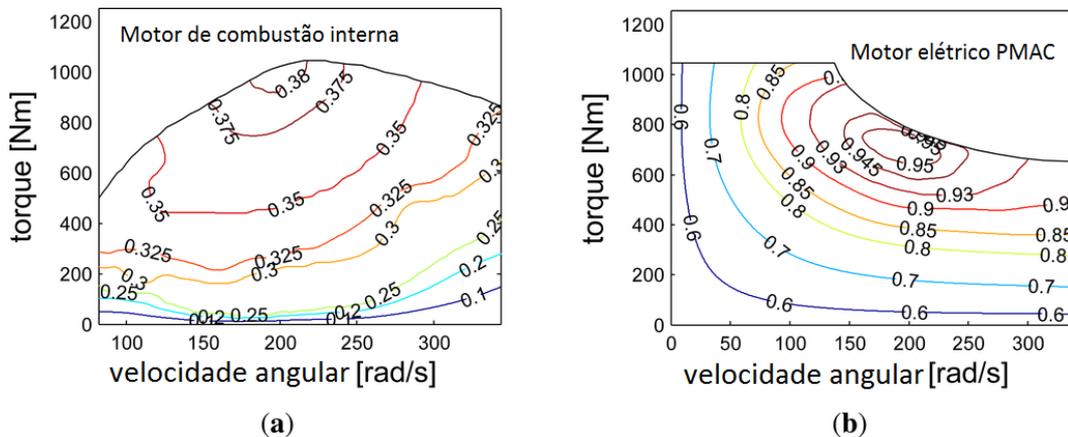


Figura 2.10: Comparação curvas de torque e eficiência. Adaptado de FRANCESCO BOTTIGLIONE e MANTRIOTA [2007]

Apesar de extremamente simples em termos de número de peças, os motores elétricos podem ser de muitos tipos diferentes, possuindo diversas classificações quanto aos seus princípios de funcionamento. Diferentes especificações podem tornar o motor mais eficiente dependendo da aplicação para a qual ele será utilizado.

No presente trabalho, a família de motores selecionada foi a de ímãs permanentes e corrente alternada. A nomenclatura em inglês para estes motores é *permanent*

magnet AC e muitas vezes são referenciados como PMAC.

Algumas características que fazem este tipo de motores muito utilizados para tração automotiva são:

- Síncrono: o rotor gira a mesma velocidade que o campo magnético em seu interior e conseqüentemente na mesma frequência da corrente fornecida. Ou seja, o motor síncrono não depende da indução da corrente para produzir o campo magnético, facilitando seu controle;
- Sem escovas (*brushless*): dentre as várias vantagens em relação a motores com escovas, é possível destacar a redução de ruídos, menor necessidade de manutenção e maior eficiência (torque gerado por Watt consumido);
- Controle de torque: permitem controle preciso de torque para diferentes rotações, o que é altamente favorável para sistemas de transmissão direta (*direct-drive*) em que não há embreagem;
- Geradores: podem se tornar geradores uma vez que há presença de força eletromotiva reversa (*back-eletromotive force*), gerando uma voltagem capaz de carregar a bateria.

É importante lembrar que os motores elétricos possuem em geral duas faixas de operação: a faixa contínua, na qual o torque e a potência apresentados podem ser mantidos por longos períodos de tempo, e a faixa intermitente, na qual o torque e a potência são maiores mas apenas podem ser mantidos por curtos períodos de tempo. A figura 2.11 mostra as faixas contínuas e intermitentes de um motor elétrico, bem como as definições de cada uma das zonas contendo os pontos de referência em geral utilizadas na seleção, conforme tabela 2.2.

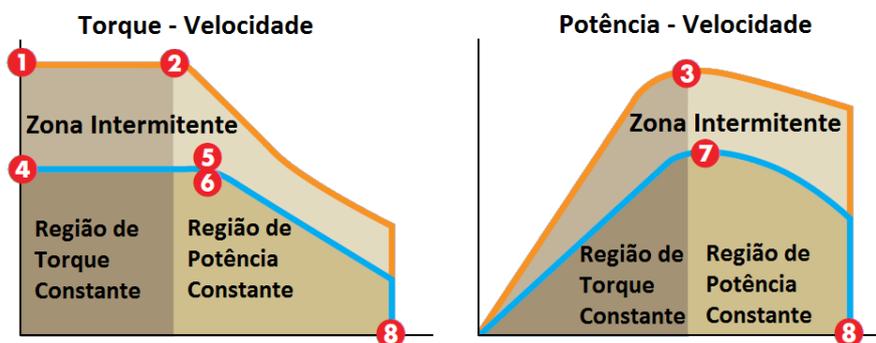


Figura 2.11: Zonas de torque e potência.

Tabela 2.2: Pontos nas curvas de torque e potência do motor elétrico

| | |
|---|-------------------------|
| 1 | Torque de pico |
| 2 | Rotação base |
| 3 | Potência de pico |
| 4 | Torque contínuo |
| 5 | Torque especificado |
| 6 | Rotação especificada |
| 7 | Potência especificada |
| 8 | Máxima rotação contínua |

2.3.2 Inversoras de frequência

As inversoras de frequência podem ser entendidas como análogos a bomba de gasolina e ao sistema de controle de injeção de um motor a combustão. Eles são responsáveis em dosar a forma como a carga armazenada na bateria será distribuída ao motor elétrico de forma a controlar o torque e a rotação de saída.

As inversoras também possuem uma série de classificações quanto a sua aplicação e o motor elétrico que devem controlar. A figura 2.12 mostra uma inversora de frequência utilizada para motores do tipo PMAC, modelo SEVCON Gen4, e que apresenta as seguintes funcionalidades:

- Controle de fluxo vetorial;
- Suporte para sistemas regenerativos;
- Suporte para reversão do sentido de rotação do motor;
- Circuito lógico integrado com leitura de entradas analógicas e digitais;



Figura 2.12: Inversora de frequência SEVCON Gen4. Fonte: SEVCON [2016]

2.3.3 Baterias

As baterias são análogas ao tanque de combustível e armazenam toda a energia elétrica que será convertida em energia mecânica pelo motor. As baterias sempre

foram um dos principais fatores que impediram a difusão de veículos elétricos devido a sua limitada capacidade carga, impedindo altas autonomias para os veículos elétricos.

No entanto, a evolução nas tecnologias das baterias tem sido substancial nos últimos anos em que a carga específica e a densidade de carga vem aumentando significativamente. As figuras 2.13 e 2.14 mostram esta evolução ao longo dos anos e a comparação entre as diferentes tecnologias existentes.

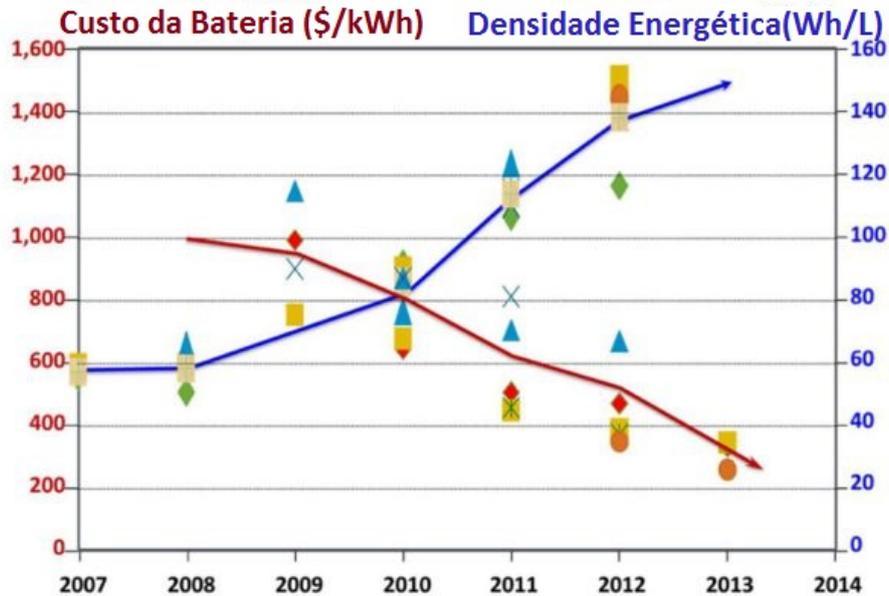


Figura 2.13: Evolução da eficiência das baterias ao longo dos anos. Fonte: *U.S. Department of Energy*.

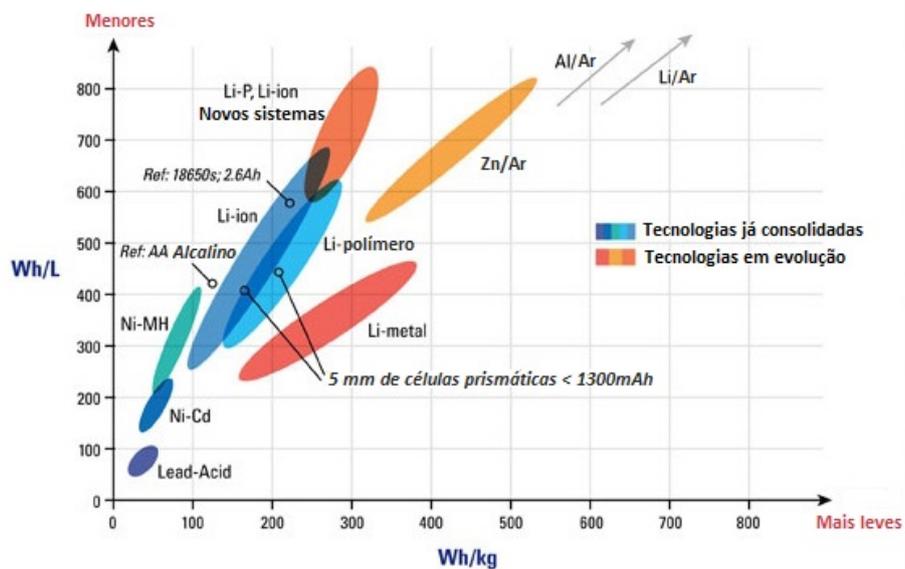


Figura 2.14: Evolução da eficiência das baterias. Adaptado de SILATRONIX [2016].

Essa evolução nas baterias vem permitindo cada vez mais avanços nesta indústria e hoje em dia já existem veículos elétricos no mercado com autonomia próxima a

Tabela 2.3: Comparação de autonomia

| Tipo | Veículo | Potência (hp) | Autonomia (km) |
|-------------------------|--------------------|---------------|----------------|
| Carro elétrico | Tesla Model S P90D | 463 | 430 |
| Carro a combustão | Mercedes E250 | 195 | 653 |
| Carro elétrico | Nissan Leaf | 110 | 230 |
| Carro a combustão | Ford Fiesta | 120 | 535 |
| Motocicleta elétrica | Zero S | 67 | 259 |
| Motocicleta a combustão | Honda CB500F | 50 | 350 |
| Motocicleta elétrica | Energica EGO | 136 | 150 |
| Motocicleta a combustão | Honda CBR1000 | 154 | 301 |

veículos a combustão. A tabela 2.3 mostra um comparativo de veículos elétricos e similares a combustão. Ainda assim, é importante lembrar que a densidade energética das baterias ainda é menor do que a da gasolina e o peso das baterias neste veículos elétricos é de 5 a 10 vezes maior do que o peso da gasolina. A alta eficiência dos motores elétricos é o fator determinante que permite que tais autonomias sejam alcançadas. Ainda assim, é evidente que a bateria é um ponto chave na difusão dos veículos elétricos e um aumento na sua densidade de carga permitiria grandes avanços na autonomia.

2.3.4 Freios Regenerativos

Conforme comentado anteriormente, a maioria dos motores utilizados em veículos elétricos pode ser usado como gerador, sendo capazes de recarregar a bateria em situações de frenagem quando há suporte por parte da inversora.

Para motocicletas, no entanto, a utilização deste sistema não é tão interessante uma vez que, devido a transferência de carga, a maior parte do torque de frenagem se dá no eixo dianteiro. Além disso, a transferência de carga faz com que a roda traseira, que é acoplada ao motor e que poderia ser utilizada no freio-motor, tenha uma grande diminuição no par de forças verticais entre ela e o solo, o que conseqüentemente também diminui o coeficiente de atrito e a torna mais suscetível para uma situação de total travamento dependendo do torque de frenagem aplicado, caracterizando uma situação de risco para a estabilidade da motocicleta.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Requerimentos do projeto

Definir os requerimentos da motocicleta a ser projetada é uma tarefa difícil dado o grande número de estilos presentes no mercado hoje em dia, cada um suprimindo as necessidades de um certo nicho, com características de *performance*, dirigibilidade e preço compatíveis com seu público-alvo.

Foi definido que, para o presente trabalho, a motocicleta a ser projetada deve ser comparável a uma de entrada de mercado. O racional por trás da escolha é tentar manter o custo do projeto o menor possível e maximizar a autonomia da mesma através da redução do peso e da potência consumida pelo motor.

Sendo assim, levantaram-se algumas especificações da motocicleta Honda CB 250 Twister na tabela 3.1.

A partir das especificações na tabela 3.1, definiram-se os seguintes requerimentos para a motocicleta elétrica a ser proposta:

- Potência contínua de 20 hp: a potência pico do motor elétrico, conforme mencionado anteriormente, certamente ultrapassará os 22,4 hp da CB 250 (que analogamente também podem ser considerada a potência pico uma vez que o regime de 7.500 rpm não é comum por longos períodos em uma CB 250);

Tabela 3.1: Especificações - Honda CB 250 Twister 2016

| | |
|----------------------|---------------------|
| Potência | 22,4 hp @ 7.500 rpm |
| Torque máximo | 22,4 Nm @ 6.000 rpm |
| Capacidade do tanque | 16,5 l |
| Autonomia na cidade | 25 km/l |
| Velocidade máxima | 145 km/h |
| Peso seco | 137 kg |
| Entre-eixos | 1.386 mm |



Figura 3.1: Honda CB 250 Twister 2016. Fonte: HONDA [2016].

- Autonomia de 200 km por carga: este requerimento é o mais distante da CB 250 (autonomia de aproximadamente 410 km por tanque). O racional neste caso é que em raríssimos casos alguém utiliza uma motocicleta como a CB 250 fazer uma viagem de 410 km sem paradas. Sendo assim, uma autonomia de 200 km por carga faz sentido dado que o usuário deste tipo de motocicleta costuma circular menos do que isso em um dia, podendo deixá-la recarregando durante a noite. É importante notar que o fato da autonomia da motocicleta elétrica ser menor não quer dizer que seu custo por quilômetro percorrido seja maior e uma análise econômica detalhada será feita mais adiante, comparando os dois modelos;
- Velocidade máxima de 120km/h: conforme mencionado, espera-se que a moto seja de utilização diária na cidade, onde em poucos casos a velocidade deve exceder 120km/h.
- Parâmetros geométricos similares: manter parâmetros como distância entre-eixo, ângulo de caster, *trail*, ângulo do amortecedor traseiro, etc, o mais próximo possível da motocicleta de referência visando diminuir as influências na dinâmica da motocicleta.

3.2 Trem de força

O dimensionamento do trem de força se inicia pelo motor elétrico. Conforme calculado na seção anterior, os requisitos da motocicleta que se deseja projetar definem que a motocicleta deve ter uma potência contínua de pelo menos 15 hp. Os

fabricantes de motores elétricos em geral disponibilizam suas potências em kilowatt. Sendo assim, é interessante manter todos os cálculos em tal unidade. Pela equação (3.1), a potência contínua da motocicleta deve ser portanto 11,2 kW.

$$1hp = 0,7457kW \quad (3.1)$$

É importante lembrar que tal potência é a de saída, produzida no eixo da roda da motocicleta e não a potências produzida no eixo do motor. Portanto para encontrar a potência do motor é necessário aplicar as perdas envolvidas no processo de transmissão do eixo do mesmo para o eixo da roda. Uma vez que o sistema de transmissão ainda não foi dimensionado, faz sentido supor uma eficiência para o sistema de transmissão e, uma vez definido o motor e o sistema de transmissão (nas próximas seções), uma checagem pode ser feita para confirmar se a potência de saída ainda atende aos requerimentos do projeto.

De forma geral, um sistema de transmissão por corrente e rodas dentadas tem uma eficiência de pelo menos 96% (BURGESS e LODGE [2004]) para velocidades abaixo de 110 km/h quando corretamente instalada e lubrificada. Sendo assim, pela equação (3.2), a potência de saída do motor deverá ser 11,7 kilowatts.

$$P_{motor} = \frac{P_{roda}}{\eta_{transmissao}} \Rightarrow P_{motor} = \frac{11,2}{0,96} = 11,7kW \quad (3.2)$$

Dentre os motores para tração automotiva, o modelo selecionado foi o PMAC DLC28, mostrado na figura 3.2 e disponível em forma de kit pré-montado (MOTORSPORT [2016a]). Os principais motivos para escolha deste motor foram:

- Potência especificada de 15kW, aproximadamente 30% acima do requerimento;
- Potência de pico de 38 kW (51 hp), sendo quase o dobro da pico da CB 250;
- Torque contínuo de 27 Nm e torque de pico de 100 Nm;
- Rotação especificada de 5.000 rpm;
- Eficiência de 92% e alta relação potência-peso;
- Relação potência peso de 1,25hp/kg no regime contínuo e 3,2hp/kg no regime intermitente;
- Opcional de inclusão de kit pré-montado com inversora, painel de visualização, sistema de resfriamento a água, cabos para ligação e manete de controle;



Figura 3.2: Motor PMAC DLC28. Fonte: MOTORSPORT [2016a].

3.3 Bateria

A bateria está diretamente ligada com a autonomia que a motocicleta elétrica terá. No entanto, os cálculos de autonomia dos veículos para regimes de trânsito em cidade são de difícil obtenção de forma teórica, sendo a maioria dos valores divulgados pelos fabricantes resultados de testes regulamentados pela SAE (teste SAE J1321). Desta forma, para estimar a autonomia que a motocicleta elétrica terá, será calculado um fator de autonomia ($C_{autonomia}$) por energia utilizada. É esperado que esse fator seja muito similar para motocicletas de modelos similares. Desta forma, é possível estimar quantos km a CB 250 consegue rodar pra cada kJ de energia que é utilizada na saída do eixo da roda. Assim, para uma motocicleta similar a ela, espera-se que a demanda por energia seja a mesma. Desta forma, pode-se calcular a autonomia total do módulo de baterias uma vez conhecida a carga total que o mesmo armazena.

$$C_{autonomia} = \frac{D_{percorrida}}{E_{roda}} \quad (3.3)$$

Para calcular energia disponível no eixo da roda CB 250, é possível estimar a energia liberada na queima de um litro de gasolina e em seguida aplicar os rendimentos esperados da combustão até a saída do eixo da roda. Os rendimentos serão a maior fonte de incerteza mas a literatura (FRANCESCO BOTTIGLIONE e MANTRIOTA [2007]) diz que, de forma geral, motocicletas a combustão tem rendimentos de aproximadamente 15%. Este valor é o rendimento total do processo, incluindo a transformação da energia contida na gasolina para energia mecânica na saída do eixo do motor e o rendimento dos componentes da transmissão (embreagem, caixa de marcha e corrente).

Sendo assim o rendimento total combinado dos processos de transformação da

energia contida na gasolina para a energia na saída do eixo da roda será:

$$\eta_{total} \approx 0,15 \quad (3.4)$$

Deste modo, a energia disponível na roda pode ser calculada usando a equação (3.5), que aplica todas os rendimentos do sistema à energia disponível na gasolina (33,4 megajoules por litro, CONTRIBUTORS [2016]), resultando na energia que de fato se dá disponível na roda.

$$E_{roda} = E_{gasolina}\eta_{total} \Rightarrow E_{roda} = 33,4 \times 10^6 \times 0,15 = 501kJ \quad (3.5)$$

Finalmente, se conclui que um litro de gasolina significa na verdade 501 kilojoules disponíveis na roda. Calculando agora o coeficiente de autonomia, é possível calcular quantos quilômetros espera-se que as motocicleta similares a este modelo percorram por cada Joule de energia disponível na roda.

$$C_{autonomia} = \frac{D_{percorrida}}{E_{roda}} = \frac{25km}{501kJ} = 0,05km/kJ \quad (3.6)$$

É possível então calcular a energia total disponível no banco de baterias para que a autonomia total da motocicleta elétrica seja 200 km, conforme previsto.

$$E_{total} = \frac{D_{total}}{C_{autonomia}\eta_{motor}\eta_{transmissao}} = \frac{200}{0,05 \times 0,92 \times 0,96} \approx 4.500kJ \quad (3.7)$$

Logo, o banco de baterias deve ter uma disponibilidade total de 4.500 kilojoules para que a motocicleta tenha uma autonomia de 200 km por carga.

Dentre as baterias disponíveis para aplicações automotivas, o modelo selecionado foi a *GBS 48V 60Ah Li-Ion Battery Pack* (figura 3.3). Os principais motivos para escolha deste modelo de bateria foram:

- Energia total de 2,9 kilowats-hora ou 10.440 kilojoules;
- Alta densidade de carga: 80 Wh / kg;
- Taxa de auto-descarga de 3% ao mês;
- Venda em forma de módulo pré-montado, sem necessidade de que as células individuais sejam soldadas;
- Voltagem de amperagem compatíveis com o motor elétrico e a inversora de frequência selecionados anteriormente.
- Opcional de inclusão de sistema de gerenciamento de bateria (*battery management system*, ou BMS) e carregadores de carga rápida.



Figura 3.3: Módulo de bateria com BMS e carregador. Fonte: MOTORSPORT [2016b].

3.4 Estrutura

Uma vez definidos o motor elétrico, o módulo de baterias e a inversora, os mesmos podem ser modelados em CAD para que seja iniciado o projeto da estrutura. As seguintes considerações devem ser feitas:

- A estrutura é de aço-carbono, em sua maioria composta por tubos cilíndricos com perfis comumente encontrados na indústria de forma a facilitar sua fabricação;
- Algumas características geométricas da CB 250 foram mantidas uma vez que um aprofundamento na dinâmica da motocicleta está fora do escopo do projeto e a dirigibilidade da mesma já foi amplamente testada e aprovada pelo seu público. São elas: ângulo de caster, posição de pilotagem, pontos de pivotagem dos eixos de direção, suspensão traseira e amortecedor traseiro;

As figuras 3.5 e 3.6 mostram as vistas isométricas da estrutura e da montagem da mesma com os demais componentes elétricos no software *Solidworks*. Mais detalhes e imagens do processo de modelagem da estrutura podem ser encontradas no apêndice A.

Em seguida, uma simulação mecânica foi feita de forma a validar a rigidez da estrutura garantindo que a mesma seja capaz de resistir aos esforços aos quais será submetida. Para isso, se fez uso das equações obtidas na seção 2.2. Para calcular os valores das forças que atuam na estrutura, é primeiro necessário saber o peso da motocicleta. Para tanto, são feitas as seguintes considerações:

- As massas dos componentes como motor, módulo de baterias e inversora de frequência foram obtido através dos respectivos catálogos dos fabricantes;
- A massa da estrutura foi obtida diretamente do software *Solidworks*, que calcula o volume de cada uma das peças e em seguida aplica a densidade do material escolhido para determinar a massa;



Figura 3.4: Estrutura da Honda CB 250 Twister. Fonte: HONDA [2016].

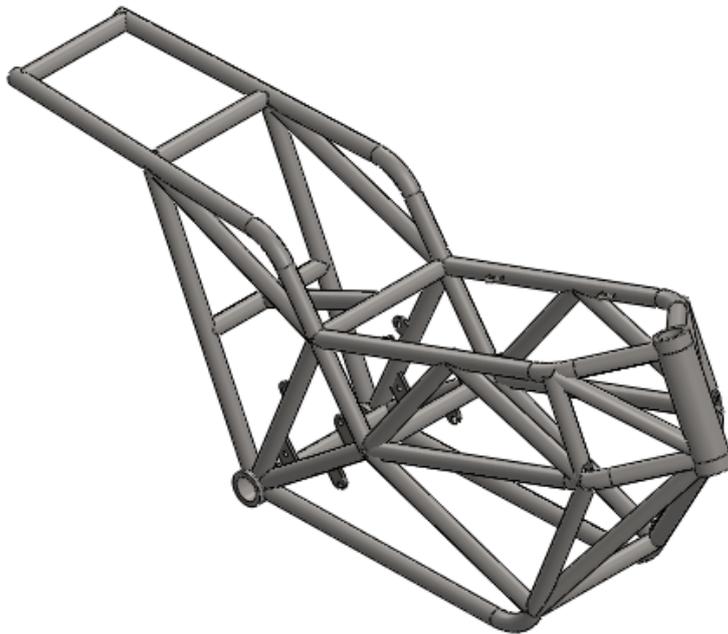


Figura 3.5: Vista isométrica da estrutura proposta.

- A massa dos sistemas dianteiros e da traseiros foram aproximadas para 40% da massa-seca da motocicleta CG 250;
- Outros componentes como sistema de transmissão, parafusos, banco, acabamentos estéticos, etc, foram considerados como tendo massa igual a 15% da massa total;



Figura 3.6: Vista isométrica da montagem da motocicleta.

Tabela 3.2: Composição de massa da motocicleta

| | |
|--------------------------------|--------|
| Motor | 16 kg |
| Inversora | 5 kg |
| Bateria | 36 kg |
| Estrutura | 15 kg |
| Sistemas dianteiro e traseiros | 55 kg |
| Demais componentes | 19 kg |
| Passageiros | 160 kg |
| Total sem passageiros | 146 |
| Total com passageiros | 306 |

- A massa do piloto e do carona foi considerada 160 kg.

A tabela 3.2 apresenta a quebra de massa detalhada por item. É interessante notar que a massa sem passageiros é bastante similar a massa da CB 250, mostrando que há um equilíbrio entre os diferentes componentes. O motor elétrico por exemplo, é mais leve do que o da CB 250 (com aproximadamente 25kg). A bateria, por outro lado, compensa essa diferença. Outros componentes como caixa de marcha, escapamento, embreagem, etc, por sua vez, não estão presentes na motocicleta elétrica. Em suma, espera-se que a motocicleta elétrica tenha uma massa próxima da massa da motocicleta a combustão.

Voltando a tabela 3.2 e a partir da massa com passageiros, o peso total da motocicleta pode ser calculado:

Tabela 3.3: Dados para cálculos das forças na estrutura

| | |
|----------------|---------|
| P_{total} | 3.002 N |
| P_{piloto} | 784 N |
| P_{carona} | 784 N |
| P_{motor} | 157 N |
| $P_{bateria}$ | 353 N |
| $F_{frenagem}$ | 3.902 N |
| $F_{trativa}$ | 3.602 N |
| D_1 | 687 mm |
| d_1 | 160 mm |
| α | 25° |
| D_2 | 480 mm |
| d_2 | 150 mm |
| β | 45° |

$$P_{total} = m_{total}g \Rightarrow P_{total} = 3.002N. \quad (3.8)$$

A força F_7 pode ser calculada usando as massas dos passageiros e a de módulo $1,3g$ para frenagem e $1,2g$ para aceleração (valor máximo, limitado pelo força longitudinal do pneu conforme seção 2.2):

$$F_7 = m_{passageiros}a \quad (3.9)$$

Finalmente, é possível montar a tabela 3.3 com os dados necessários para resolver as equações da seção 2.2 e encontrar os valores das forças atuantes na estrutura:

$$F_1 = 4.370N \quad (3.10)$$

$$F_2 = 9.945N \quad (3.11)$$

$$F_3 = -7.471N \quad (3.12)$$

$$F_4 = 9.739N \quad (3.13)$$

$$F_{5,trativa} = 1.028N \quad (3.14)$$

$$F_{5,frenagem} = -6.476N \quad (3.15)$$

$$F_6 = 6.604N \quad (3.16)$$

$$F_{7,trativa} = 1.882N \quad (3.17)$$

$$F_{7,frenagem} = -2.038N \quad (3.18)$$

$$M_1 = 100Nm \quad (3.19)$$

Nota-se que as forças F_3 , $F_{5,frenagem}$ e $F_{7,frenagem}$ possuem valores negativos, indicando que as mesmas são nos sentidos contrário aos apresentados na seção 2.2.

As forças encontradas são úteis para realização de simulações em partes específicas da estrutura e a compreensão de tensões locais em membros individuais da mesma.

Para a simulação completa da estrutura, convém apoiarmos os pontos de vínculo da mesma com a suspensão dianteira e aplicar as cargas inerciais, facilitando a solução numérica e simplificando o modelo. A figura 3.7 mostra as condições de contorno do modelo simulado, sendo a os vetores de cor rosa a carga distribuida relativa às forças de aceleração e desaceleração. A intensidade das mesmas é:

$$F_{dist,aceleracao} = ma = m1,2g = 146 \times 1,2 \times 9,8 = 1.716N \quad (3.20)$$

e

$$F_{dist,frenagem} = ma = m1,2g = 146 \times 1,2 \times 9,8 = 1.860N \quad (3.21)$$

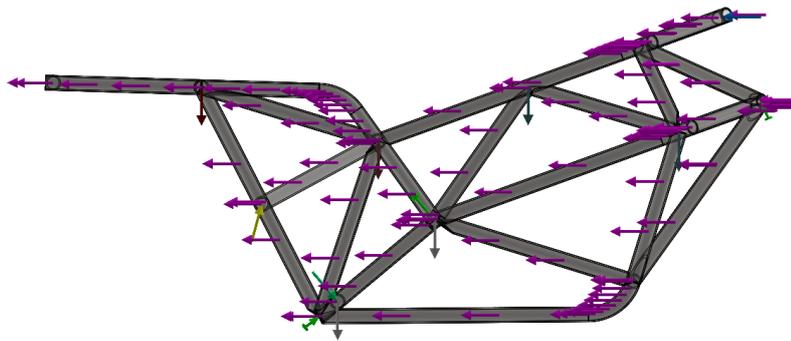


Figura 3.7: Condições de contorno da simulação.

O software utilizado na simulação foi o *Solidworks Simulation* e as principais configurações do modelo simulado são:

- Elementos de viga formados por tubos de perfil circular com diâmetro externo de 1", parede de 2,4 mm e material aço SAE 4340;
- Cargas as quais a estrutura é submetida foram calculadas conforme seção 2.2;
- O momento M_1 foi representado através de um par de forças atuando nos tubos que sustentam o motor elétrico;
- As forças peso do piloto e peso do carona, peso do motor e peso da bateria foram consideradas como distribuídas ao longo dos tubos diretamente ligados aos suportes do banco, motor e bateria;
- Elementos de malha do tipo viga, refinados por curvatura e proximidade - total de 559 elementos da malha e 628 nós;

- O fator de segurança requerido para esta simulação foi definido em 2 dado que as condições de simulação já indicam casos extremos de funcionamento da motocicleta.

As figuras 3.8 e 3.9 mostram algumas imagens da simulação realizada. Mais detalhes e imagens do processo de simulação da estrutura podem ser encontradas no apêndice A.

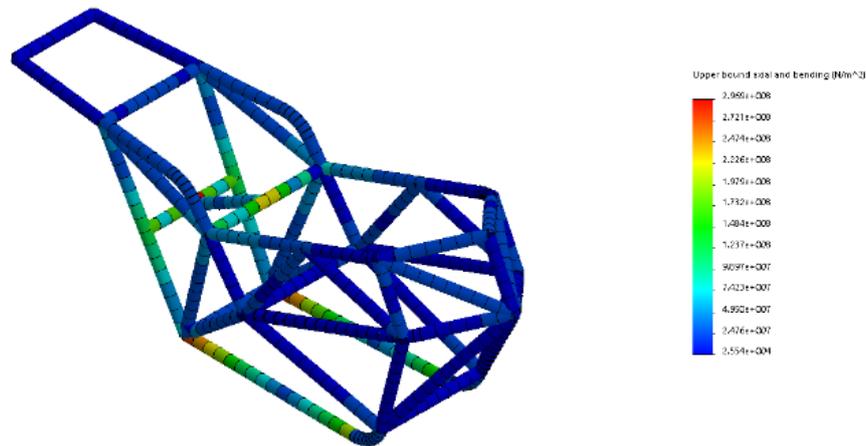


Figura 3.8: Vista isométrica dos contornos de tensões na frenagem.

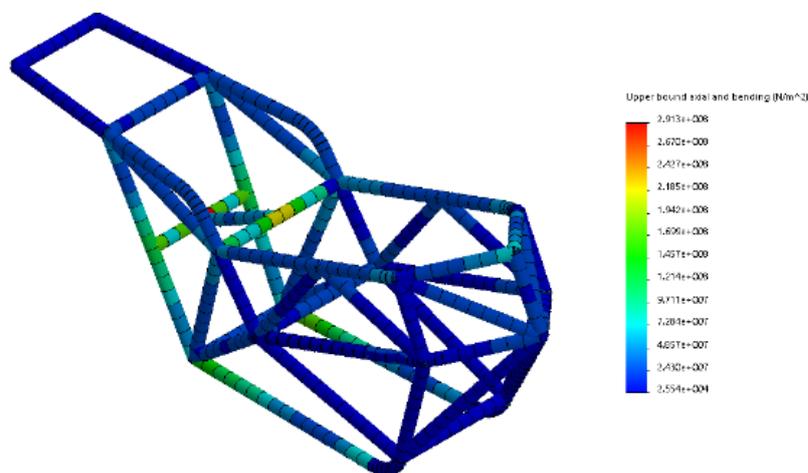


Figura 3.9: Vista isométrica dos contornos de tensões na aceleração.

Analisando o gradiente de tensões é possível perceber que o ponto de maior tensão está perto de 300 MPa . Este valor é inferior ao escoamento de 815 MPa do aço SAE 4340 (CRANDALL [2008]). O fator de segurança de 2 desejado é portanto atendido.

É importante ressaltar que a simulação realizada é apenas um estudo inicial e o principal objetivo deste exercício é validar de forma superficial o modelo de estrutura proposto. Aspectos como as condições de contorno (magnitude das forças, inclusão

Tabela 3.4: Especificações - Honda CB 250 Twister 2016

| | |
|-----------------------|--------------|
| Potência especificada | 15kW |
| Potência pico máximo | 38 kW |
| Torque contínuo | 27 Nm |
| Torque de pico | 100 Nm (60s) |
| Rotação especificada | 5.000 rpm |
| Peso seco | 137 kg |
| Velocidade requerida | 120 km/h |

dos regimes dinâmicos), refinamento de malha, etc, devem ser analisados com maior cuidado para que sejam tiradas maiores conclusões das características mecânicas da estrutura a ser projetada.

3.5 Transmissão

Em posse das características do motor e da montagem da estrutura, é possível iniciar o projeto do sistema de transmissão de forma a garantir os requerimentos estipulados. O objetivo desta seção é garantir que o torque disponível na roda e a velocidade de rotação da mesma sejam tais que a motocicleta elétrica cumpra os requerimentos sem a necessidade de um sistema de marchas. A tabela 3.4 apresenta um resumo dos requerimentos de propulsão da motocicleta e também os principais dados do motor selecionado.

O sistema de transmissão é composto por:

- Uma roda dentada motora (também chamada de pinhão), acoplada ao eixo de saída do motor elétrico;
- Uma corrente de transmissão;
- Uma roda dentada movida (também chamada de coroa), acoplada ao eixo traseiro;

Para dimensionar o sistema é necessário primeiramente calcular o torque e a velocidade de rotação do eixo traseiro no caso extremo de funcionamento. Esta situação ocorrerá quando a motocicleta estiver em velocidade máxima, momento em que a rotação no eixo traseiro é máxima e o torque necessário para vencer a força de arrasto é máximo. A velocidade de rotação do eixo traseiro pode ser calculada a partir da velocidade máxima desejada e do raio de rolagem do pneu traseiro conforme equação (3.22).

$$\omega_{roda} = \frac{v_{max}}{R_r} = \frac{120}{3,6 \times 0,271} = 123rad/s = 1175rpm \quad (3.22)$$

Sendo o raio de rolagem do pneu calculado a partir da especificação do pneu traseiro da CB 250, 140/70R17.

Em seguida, o cálculo da força de arrasto pode ser feito a partir da equação (2.1) conforme revisão bibliográfica da seção 2.1.

O coeficiente de arrasto de motocicletas é de difícil obtenção e como aproximação será usado o coeficiente de arrasto médio entre as motos BMWK100RS e Kawasaki GPZ900R. Dentre as motos com C_d disponíveis na tabela 2.1, essas são as que mais se assemelham com a Honda CB 250 em dimensão. A área frontal também foi aproximada para a área frontal típica de uma motocicleta estilo *naked*, para $0,7 \text{ m}^2$, conforme referência FOALE [2002].

$$F_{arrasto} = \frac{1}{2}\rho_{ar}v^2C_D A = \frac{1}{2}1,225 \times 33^2 \times 0,45 \times 0,7 = 210N. \quad (3.23)$$

Logo, o torque necessário no eixo da roda será:

$$\tau_{roda} = F_{arrasto} \cdot R_r = 210 \times 0,271 = 56Nm. \quad (3.24)$$

Sabendo-se que o motor dispõe de um torque máximo de 27 Nm para o regime contínuo, é possível calcular o fator de transmissão conforme a equação (3.26):

$$i_{motor,roda} = \frac{\tau_{roda}}{\tau_{motor}} = \frac{56}{27} = 2,07. \quad (3.25)$$

Aplicando a razão de transmissão a velocidade de rotação da roda, encontra-se a velocidade de rotação necessária na saída do motor:

$$\omega_{motor} = \omega_{roda} i_{motor,roda} = 123 \times 2,07 = 254rad/s = 2.432rpm. \quad (3.26)$$

Conclui-se então que a velocidade de rotação necessária é bem menor do que a máxima recomendada para o regime contínuo de 5.000 rpm.

Para esta razão de transmissão, pode-se calcular a aceleração máxima e a velocidade final máxima a partir da força máxima trativa disponível no pneu traseiro para o torque de pico do motor.

$$F_{trativa,max} = \frac{\tau_{motor,max} i_{motor,roda}}{R_r} = \frac{100 \times 2,07}{0,271} = 764N. \quad (3.27)$$

A aceleração máxima (considerando apenas o piloto) será

$$a = \frac{F_{trativa,max}}{m_{total}} = \frac{764}{204} = 3,75m/s^2, \quad (3.28)$$

e a velocidade máxima será

$$F_{trativa,max} = F_{arrasto} \Rightarrow v_{max} = \sqrt{\frac{2F_{trativa,max}}{\rho_{ar}C_D A}} = 62m/s = 223km/h \quad (3.29)$$

É importante notar que este valor foi calculado igualando a força máxima trativa com a força de arrasto da equação (2.1), o que caracteriza uma simplificação uma vez que desconsidera fatores como forças de resistência a rolagem, alterações nas eficiências do trem de força, dentre outros, que podem se tornar relevantes em altas velocidades.

Em posse da razão de transmissão, é possível dimensionar as rodas dentadas. Para isso, é importante notar que a razão de transmissão é relativamente alta e portanto a roda dentada movida terá raio 2,07 vezes maior do que a roda dentada motora. Sendo assim, é interessante atentar ao dimensionar a roda dentada motora para que seu raio não seja grande a ponto de inviabilizar a roda dentada movida (caso em que a mesma tem diâmetro próximo ao da roda).

O dimensionamento da corrente e das rodas dentadas foi feito a partir do catálogo DAIDO, DAIDO [2016], fabricante líder de mercado para correntes de motocicletas no Brasil. Um resumo das etapas de dimensionamento recomendados no catálogo e as dimensões finais dos componentes são relatadas as seguir:

- Corrente de rolo com norma ANSI do tipo simples;
- Potência de trabalho corrigida de $20kW$ calculada a partir da potência especificada do motor elétrico e considerando um grau de impulsividade de 1,5.
- Corrente DID 60 (carga máxima admissível de $720kgf$ ou $7060N$);
- Roda dentada motora com diâmetro primitivo de $127,82mm$ e 21 dentes;
- Roda dentada movida com diâmetro primitivo de $273,09mm$ e 45 dentes;
- Carga máxima na corrente de $1.574N$, atingida na situação de torque pico do motor e eixo traseiro travado;
- Critérios de limite de velocidade e efeito poligonal aprovados;

A transmissão sugerida respeita as restrições geométricas da motocicleta e apresenta uma carga máxima de ruptura de aproximadamente quatro vezes a carga máxima esperada no sistema, sendo portanto considerada satisfatória para o projeto.

3.6 Sistemas Dianteiro e Traseiro

Os sistemas dianteiros e traseiros englobam os seguintes componentes principais:

- Peças estruturais: balança traseira e garfo dianteiro;
- Amortecedores e molas;
- Cubos de roda e sistemas de freio (discos e pinças);
- Rodas e pneus;
- Sistemas eletro-eletrônicos auxiliares (painel de instrumentos, luzes indicadoras, etc)

Apesar de não serem componentes específicos para motocicletas elétricas eles irão influenciar na *performance*, na dirigibilidade e na experiência do piloto e são, portanto, importantes para o projeto. No entanto, conforme mencionado anteriormente, o projeto detalhado dos sistemas dianteiros e traseiros para a motocicleta elétrica está fora do escopo deste trabalho.

Sendo assim, é indicado que, para uma primeira versão do protótipo, sejam utilizadas as peças já prontas da motocicleta de referência com objetivo é minimizar as possíveis perturbações na dinâmica do veículo e restringir as mudanças ao sistema de propulsão.

Capítulo 4

Análise econômica

4.1 Subistemas e custos

Com o intuito de estimar os custos da motocicleta elétrica é possível montar a tabela 4.1. Para os componentes motor elétrico e bateria, foram aplicadas uma taxa de câmbio de reais brasileiros para dólares americanos de 3,60:1, conforme BLOOMBERG [2016]. Além disso, foram inclusos custo de frete de 10% do valor do componente e também taxas relativas a importação de 60% conforme DO BRASIL [2016].

A partir da tabela completa, compara-se o custo final de desenvolver o protótipo com o preço da motocicleta a combustão de referência, CB 250 Twister, na faixa de R\$ 14.000 conforme HONDA [2016].

É interessante também analisar de custo por quilômetro percorrido em cada tipo de motocicleta, explicitado na tabela 4.2. Para cálculo dos quilômetros por kilojoules consumidos, usou-se o coeficiente da seção 3.3. Para o cálculo do preço por kilojoule, assumiu-se um custo por litro de gasolina de R\$ 3,90 e um preço por kWh de R\$ 0,84.

Logo, o preço por quilômetro percorrido na motocicleta a combustão é aproximadamente três vezes maior do que na motocicleta elétrica.

Tabela 4.1: Custos - Motocicleta elétrica

| Componente | Preço (R\$) | Comentário |
|---------------------------------|---------------|------------------------|
| Kit motor elétrico | 28.500 | Valor em US\$: 4.500 |
| Kit bateria | 14.000 | Valor em US\$: 2.200 |
| Estrutura | 1.500 | Material e fabricação |
| Sistemas dianteiros e traseiros | 5.500 | 40% do preço da CB 250 |
| Outros componentes | 2.500 | 5% do sub-total |
| Total | 52.000 | |

Tabela 4.2: Custos por quilômetro percorrido

| Item | Motocileta a combustão | Motocicleta elétrica |
|-------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Eficiência total | 15% | 88% |
| quilômetros / kilojoules consumidos | 0,0075 | 0,044 |
| Preço do megajoule | R\$ 0,1167 | R\$ 0,23 |
| Preço do quilômetro percorrido | R\$ 0,0155 | R\$ 0,0052 |

4.2 Discussão

O custo inicial da motocicleta elétrica é de fato muito superior ao da motocicleta a combustão de referência, mas é importante notar os seguintes pontos:

- Os preços dos componentes elétricos foram retirados diretamente de sites de venda de peças destinado para pessoas entusiasmadas com a eletrificação de veículos. Existe a possibilidade de obter componentes similares por preços menores através de contatos diretos com os fabricantes e/ou através da utilização de uma economia de escala ao comprar mais de um item;
- Não estão sendo considerados custos de manutenção ou custos de oportunidade devido a desvalorização das motocicletas. Espera-se que a motocicleta a elétrica tenha um custo de manutenção muito inferior ao da motocicleta a combustão devido a menor número de peças móveis no motor, e também que o desgaste do mesmo seja menor, caracterizando uma motocicleta com vida útil maior e conseqüentemente com uma desvalorização anual menor;
- O custo por quilômetro percorrido é também muito inferior para as motocicletas a combustão conforme visto na tabela 4.2;
- Existe a possibilidade de recarregar a motocicleta elétrica através de fontes com custo reduzidos, como por exemplo a energia solar. Nesse caso, o tempo necessário para compensar a diferença de custo é ainda menor;
- Espera-se que o valor dos componentes elétricos caia bastante com a evolução dos veículos elétricos e o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente para as baterias.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusão

Foi feito um estudo de projeto para uma motocicleta elétrica usando como referência o modelo a combustão Honda CB 250 Twister. O trabalho se restringiu apenas à estrutura e aos componentes necessários para o funcionamento do trem de força elétrico (motor elétrico, bateria e inversora de potência).

O produto final do trabalho é a metodologia necessária para que, a partir dos requerimentos de projeto levantados, seja possível:

- Dimensionar o motor elétrico tendo em vista a potência e o torque necessários;
- Dimensionar o banco de baterias a partir da autonomia desejada;
- Projetar a estrutura de forma a respeitar os parâmetros geométricos pré-determinados, garantir a rigidez necessária e suportar todos os componentes necessários;
- Projetar o sistema de transmissão sem marchas capaz de balancear a *performance* da motocicleta tanto em sua aceleração quanto em sua velocidade final;
- Escolher as suspensões dianteiras e traseiras a serem utilizadas a partir de motos já existentes no mercado.

Além disso, o trabalho também permite algumas conclusões sobre diferenças entre modelos de motocicletas elétricas e a combustão. São elas:

- O motor elétrico é mais eficiente em termos de propulsão do que o motor a combustão, tendo ampla disposição de torque mesmo em baixas rotações e portanto é esperado que a versão elétrica tenha uma aceleração mais rápida do que a versão a combustão (0 a 100km/h em 7,4s e 10,0s, respectivamente) e também uma velocidade máxima maior;

- O custo por quilômetro rodado é três vezes maior para a motocicleta a combustão do que para a motocicleta elétrica;
- A motocicleta elétrica é 3,7 vezes mais cara do que a combustão, principalmente devido ao câmbio e as taxas de importação dos componentes elétricos, mas é possível que essa diferença se torne menor nos próximos anos, conforme exemplificado na seção 4.2.

5.2 Trabalhos Futuros

Conforme comentando em cada seção, o projeto completo de uma máquina como uma motocicleta elétrica é bastante complexo e envolve muitos conceitos que requerem aprofundamentos fora do escopo deste trabalho. Nestes casos, optou-se por soluções mais simples como utilizar partes já existentes, não entrando em detalhes técnicos de algumas áreas.

No entanto, prospectando-se uma customização da motocicleta elétrica e deixando de usar como base o modelo de referência a combustão, alguns destes temas precisam ser abordados. Sendo assim, é possível propor os seguintes trabalhos futuros:

- Projeto de sistemas dianteiros e traseiros: aprofundamento na análise dinâmica e utilização de parâmetros geométricos customizados (distância entre-eixos, ângulos de caster, *trail*, posição do centro de gravidade, etc);
- Bancada de teste e regulagem do motor elétrico: detalhamento das ligações entre o motor elétrico, a inversora e a bateria, bem como a comunicação dos mesmos com as centrais de gerenciamento de carga e painel de visualização de dados para o piloto;
- Simulação estrutural: refinamento da simulação estrutural realizada, incluindo diferentes regimes da motocicleta e seus respectivos esforços;
- Fabricação da motocicleta elétrica: etapas do processo de fabricação da estrutura proposta e da montagem da motocicleta, tendo como produto um protótipo funcional.

Referências Bibliográficas

- HYPESCIENCE. “Hildebrand and Wolfmuller”. <http://hypescience.com/wp-content/uploads/2010/05/Hildebrand-Wolfmuller-small.jpg>, 2016. Acessado em 20/03/2016.
- CONTRIBUTORS, W. “Sokol1000”. https://en.wikipedia.org/wiki/Sok%C3%B3%C5%82_1000, 2016. Acessado em 20/03/2016.
- THE COLUMBIA ELECTRONIC ENCYCLOPEDIA, P. A. I. “Evolution of the Internal-Combustion Engine”. <http://www.infoplease.com/encyclopedia/science/internal-combustion-engine-evolution-internal-combustion-engine.html>, 2012. Acessado em 20/03/2016.
- INSTITUTE, W. R. “CAIT Climate Data Explorer”. <http://cait.wri.org/>, 2016. Acessado em 17/03/2016.
- COSSALTER, V. *Motorcycle Dynamics*. LULU, 2006.
- FOALE, T. *Motorcycle Handling and Chassis Design The Art and Science*. Tony Foale, 2002.
- PACEJKAA, H. B., BAKKERB, E. “The magic formula tyre model”, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, v. 21, n. 001, pp. 1–18, 1992.
- FRANCESCO BOTTIGLIONE, TOMMASO CONTURSI, A. G., MANTRIOTA, G. “The Fuel Economy of Hybrid Buses: The Role of Ancillaries in Real Urban Driving”, *Energies*, v. 7, n. 007, pp. 1–18, 2007.
- SEVCON. “SEVCON Gen4”. <http://www.sevcon.com/ac-controllers/>, 2016. Acessado em 20/03/2016.
- SILATRONIX. “Rechargeable Li-Ion batteries”. <http://silatronix.com/applications/rechargeable-li-ion-batteries/>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

- HONDA. “Ficha técnica motocicleta Honda”. <https://www.honda.com.br/motos/Paginas/cbtwister.aspx>, 2016. Acessado em 25/03/2016.
- BURGESS, S., LODGE, C. “Optimisation of the chain drive system on sports motorcycles”, *Sports Engineering*, v. 2, n. 007, pp. 65–73, 2004.
- MOTORSPORT, E. “Electric Motorsport PMAC motor kit specifications”. <http://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motor-drive-kits/brush-less-pmac-motor-kits/pmac-15kw-cont-38kw-pk-liquid-cooled-motor-drive-system-72-84v-550a.html>, 2016a. Acessado em 20/03/2016.
- CONTRIBUTORS, W. “Gasoline (petrol) energy density”. https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density, 2016. Acessado em 20/03/2016.
- MOTORSPORT, E. “Electric Motorsport GBS 48/60 battery pack specifications”. <http://www.electricmotorsport.com/ev-parts/batteries/battery-packages/48v/gbs-48v-60ah-li-ion-battery-pack-with-emus-bms-and-charger.html>, 2016b. Acessado em 20/03/2016.
- CRANDALL. *Mechanics of Solids*. Tata McGraw-Hill Education, 2008.
- DAIDO. “Catálogo de correntes de transmissão DAIDO”. 2016.
- BLOOMBERG. “USBRL Spot Exchange Rate”. <http://www.bloomberg.com/quote/USDBRL:CUR>, 2016. Acessado em 28/03/2016.
- DO BRASIL, R. F. “Importação de Bens Via Remessa Postal ou Encomenda Aérea Internacional, Inclusive para Remessa de Compras Realizadas Via Internet – RTS (Regime de Tributação Simplificada)”. <http://www.receita.fazenda.gov.br/aduana/rts.htm>, 2016. Acessado em 20/03/2016.
- ENERGY, U., INFORMATION. “Annual Energy Outlook 2015”. 2015.
- PAGE, V. W. *Early Motorcycles: Construction, Operation and Repair*. Dover Publications, 2004.
- HUGHES, A. *Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications*. Newnes, 2006.
- CONTRIBUTORS, W. “History of the internal combustion engine”. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_the_internal_combustion_engine&oldid=707696853, 2016a. Acessado em 20/03/2016.

CONTRIBUTORS, W. “Brushless electric motors”. https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor#Brushless_vs._brushed_motors, 2016b. Acessado em 20/03/2016.

CONTRIBUTORS, W. “Synchronous Motors”. https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_motor, 2016c. Acessado em 20/03/2016.

MOTORS, F. “Ford Fiesta specifications”. <http://www.ford.com/cars/fiesta/specifications/view-all/>, 2016a. Acessado em 20/03/2016.

MOTORS, T. “Tesla Model S specifications”. <https://www.teslamotors.com/models>, 2016b. Acessado em 20/03/2016.

NISSAN. “Nissan Leaf specifications”. <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/>, 2016a. Acessado em 20/03/2016.

MERCEDES-BENZ. “Mercedes E250 specifications”. <http://www.mercedes-benz.ca>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

MOTORCYCLES, Z. “Zero S specifications”. <http://www.zeromotorcycles.com/zero-s/>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

NISSAN. “Energica EGO specifications”. <http://www.energicasuperbike.com/energica-ego-electric-superbike/>, 2016b. Acessado em 20/03/2016.

UOL, C. “Primeiras impressões CB250 Twister”. <http://carplace.uol.com.br/volta-rapida-nova-honda-cb-250-twister/>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

CARROS, P. “Nova Twister 2016”. <http://precoscarros.com.br/nova-twister-2016/>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

MOTO, F. “Teste nova CB 250 Twister 2016”. <http://www.financiarmoto.com.br/2015/10/testamos-cb-250-twister-2016-acelere.html>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

CHANSON. “GRABCAD Rad 999 model”. <https://grabcad.com/library/radical-999/files>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

HENDRICKS. “GRABCAD 120mm radiator model”. <https://grabcad.com/library/alphacool-nexxos-st30-120mm-1>, 2016. Acessado em 20/03/2016.

Apêndice A

Imagens do software *Solidworks*

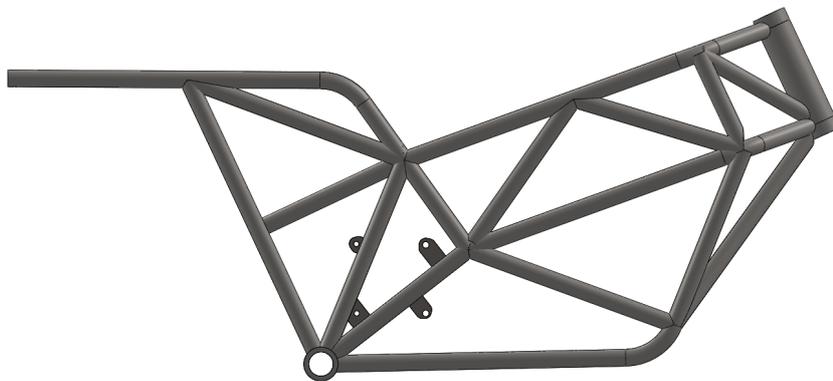


Figura A.1: Vista lateral da estrutura proposta.

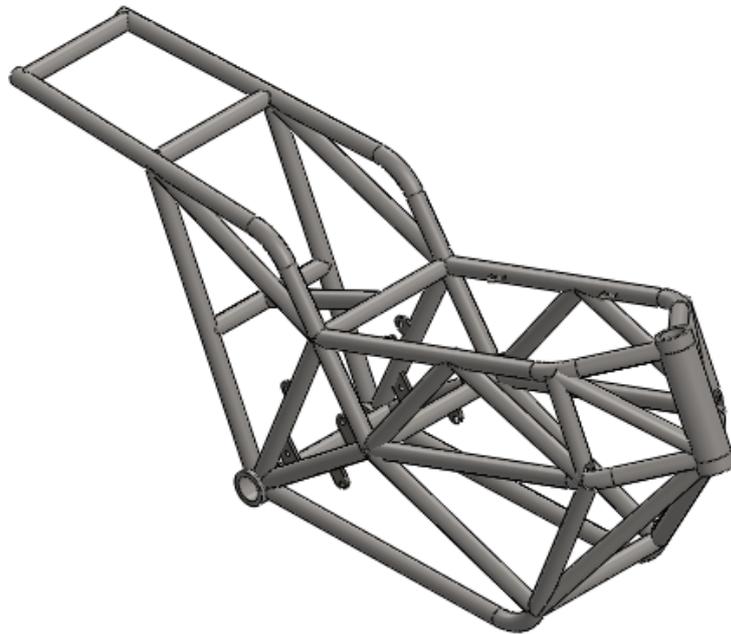


Figura A.2: Vista isométrica da estrutura proposta.

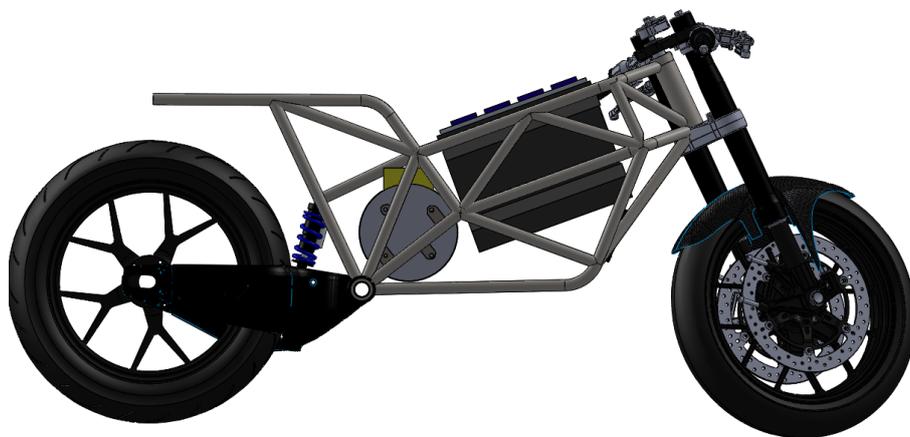


Figura A.3: Vista lateral da montagem inicial.



Figura A.4: Vista isométrica da montagem inicial

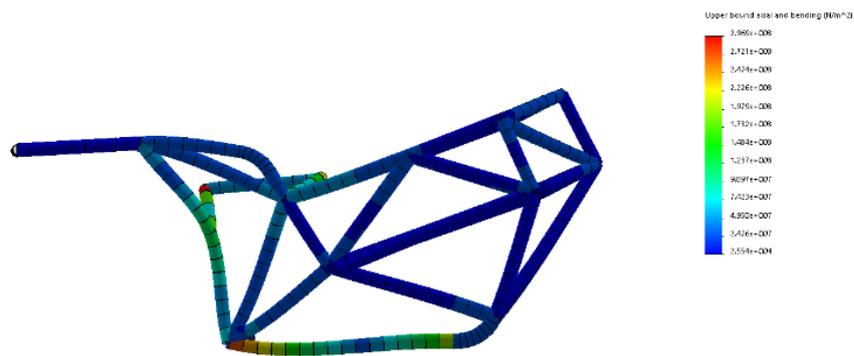


Figura A.5: Vista lateral do resultado deformado - frenagem.

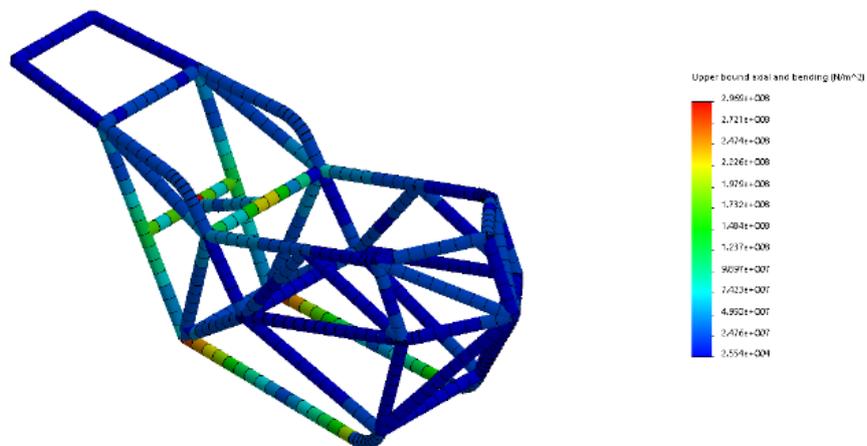


Figura A.6: Vista isométrica do resultado - frenagem.

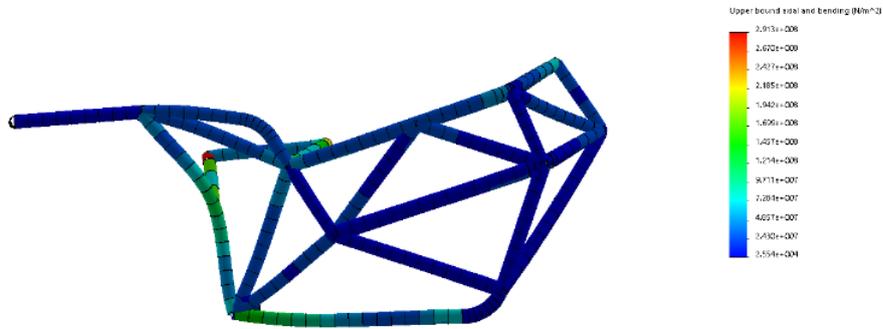


Figura A.7: Vista lateral do resultado deformado - aceleração.

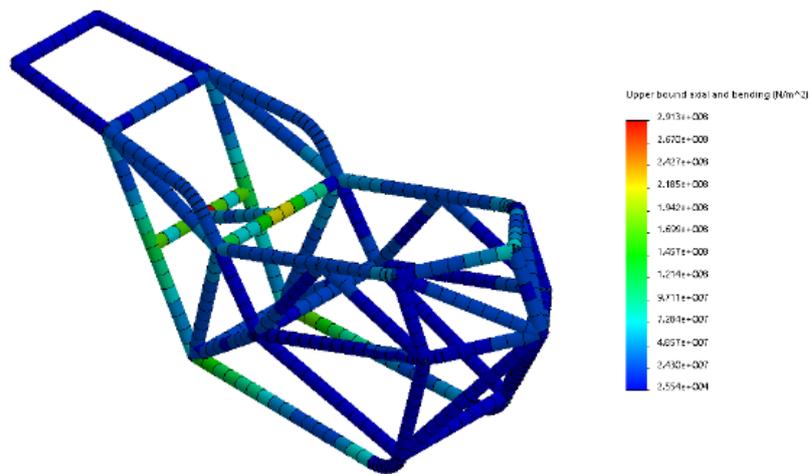


Figura A.8: Vista isométrica do resultado - aceleração.

Apêndice B

Vistas geométricas

B.1 Estrutura

B.1.1 Vista terceiro diedro

B.1.2 Vista isométrica

B.1.3 Tubos para dobra

B.1.4 Tabela de cortes

B.2 Motor elétrico

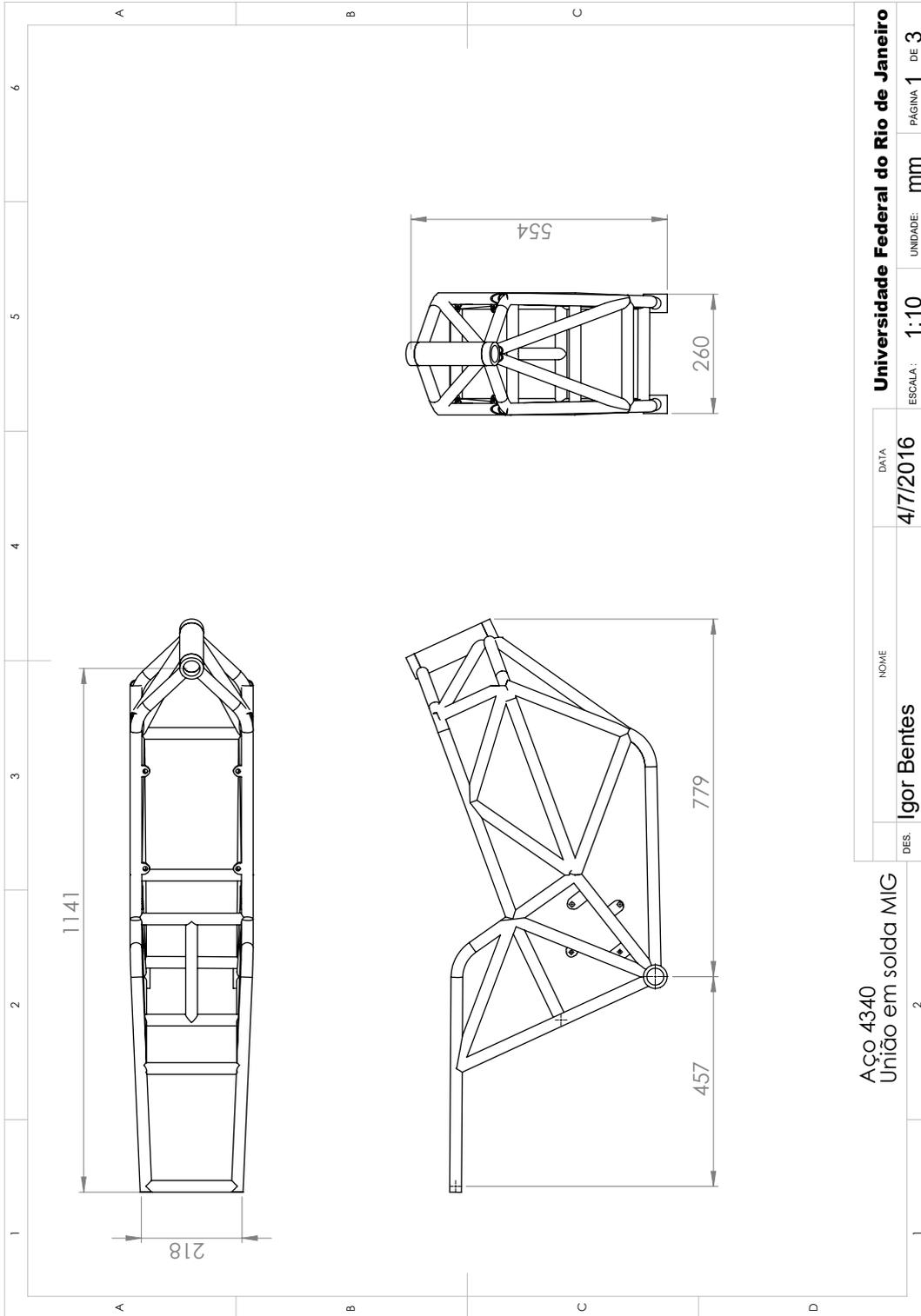
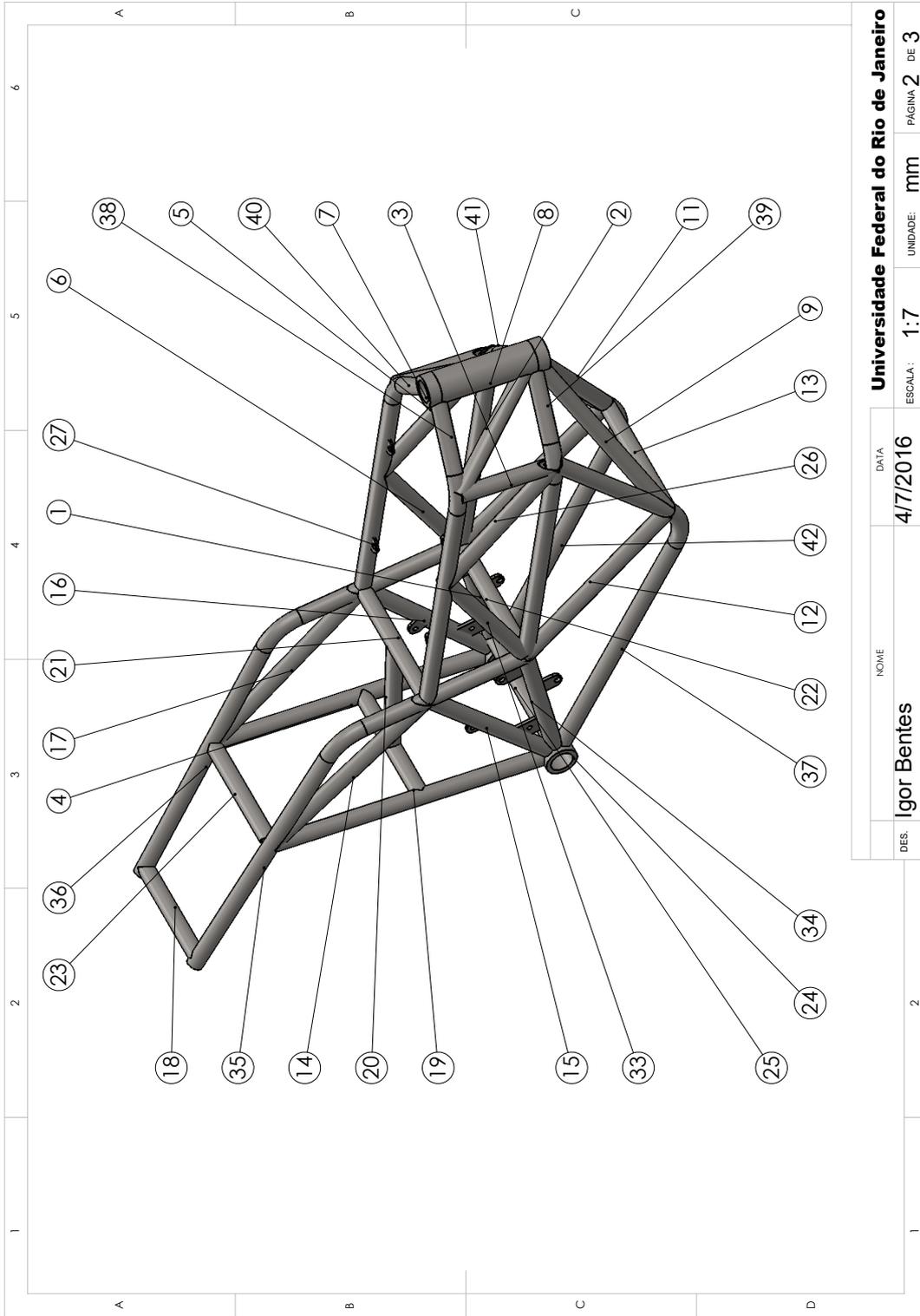


Figura B.1: Vista do terceiro diedro da estrutura.



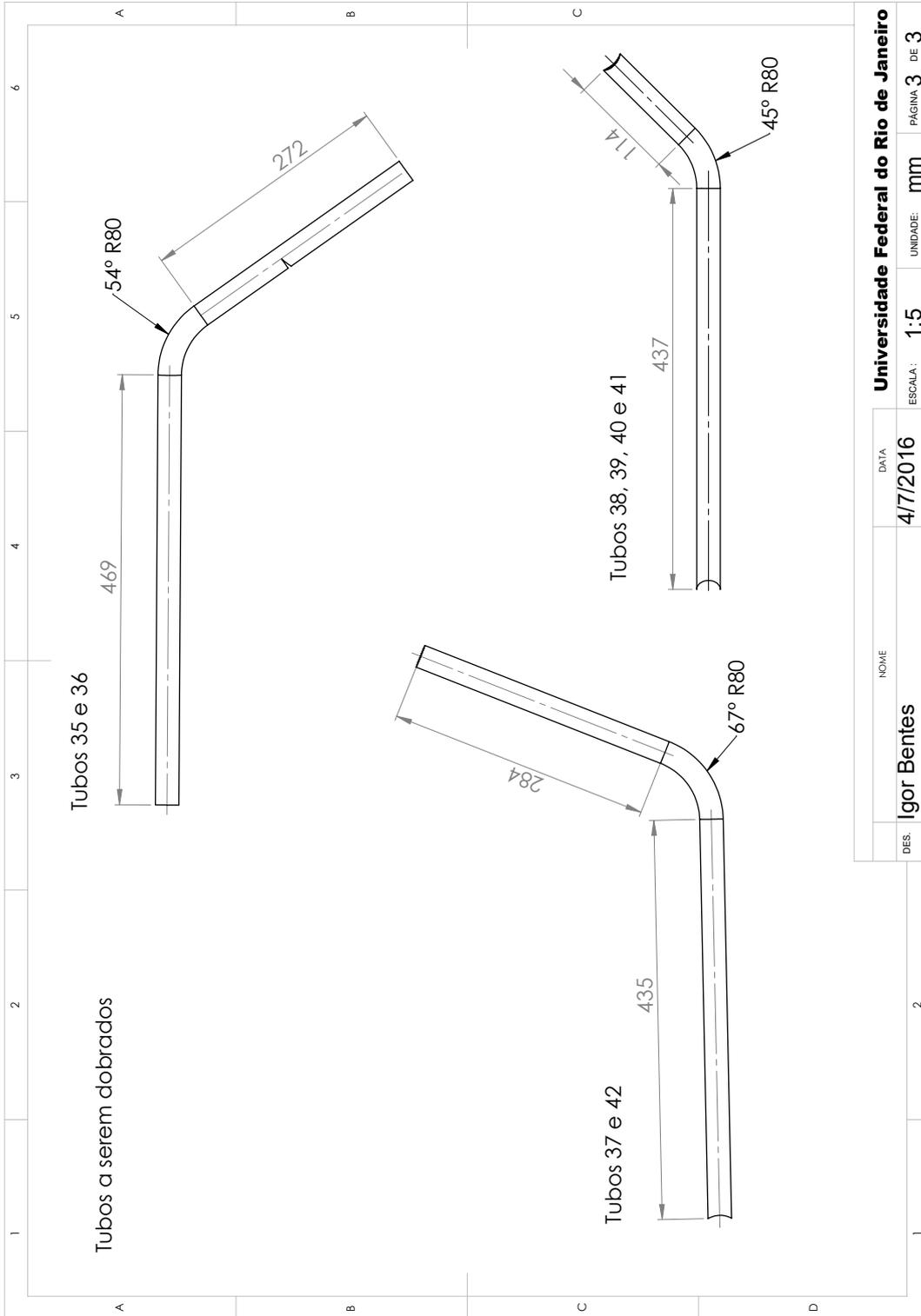


Figura B.3: Tubos para dobra.

Tabela B.1: Tabela de cortes - 25.4x2.4mm

| No. | Quantidade | Comprimento (mm) | Âng. 1 (°) | Âng. 2 (°) |
|--------|------------|------------------|------------|------------|
| 1, 34 | 2 | 264.21 | 29.16 | - |
| 2 | 2 | 215.7 | - | 0 |
| 3, 8 | 2 | 160 | 0 | - |
| 4 | 2 | 451.95 | - | - |
| 5, 26 | 2 | 266.79 | - | - |
| 6, 33 | 2 | 266.63 | - | - |
| 9, 11 | 2 | 369.64 | - | - |
| 10, 12 | 2 | 336.09 | 29.16 | - |
| 13 | 1 | 226.59 | - | - |
| 14, 17 | 2 | 351.5 | - | 17.05 |
| 15, 16 | 2 | 333.66 | 61.21 | - |
| 18 | 1 | 198.11 | - | - |
| 19 | 1 | 220 | - | - |
| 20 | 1 | 243.65 | - | - |
| 21, 22 | 2 | 225.03 | - | - |
| 23 | 1 | 206.7 | - | - |
| 25 | 1 | 227.44 | 0 | - |
| 35, 36 | 2 | 817.44 | - | 54.27 |
| 37, 42 | 2 | 812.85 | - | 67.17 |
| 38, 40 | 2 | 614.27 | - | - |
| 39, 41 | 2 | 584.27 | - | - |



Figura B.4: Tabela de cortes - comprimento e ângulos.

Tabela B.2: Tabela de cortes - 51.3x3.2mm

| No. | Quantidade | Comprimento (mm) |
|-----|------------|------------------|
| 8 | 2 | 180 |
| 23 | 2 | 40 |

