



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Projeto de Sistemas Térmicos e Fluídicos

***Simulação de um Veículo Elétrico Solar dentro das Normas da
Competição Bridgestone World Solar Challenge 2025***

ALICE CZYZ FROES FONTES - 11802478
AMANDA HIKARI SILVA TANAKA - 12550153
ANDRÉ VICTOR KOVALSKI - 12549752
EDUARDO MORELLI FARES - 12686036
FELIPE MENDES BORTOLOZO - 12752523
GUILHERME REBECCHI DOS SANTOS - 12550107
JOÃO AIRES MARSICANO - 12609971
JUAN THOMÁS DE LIMA BUENO - 12685550
NÍCOLAS ANGELO DA SILVA - 12610006
PAULA CORRÊA DA CUNHA CARVALHO - 13678863
RENAN RIBEIRO MACHADO - 12550066

Professores:

CRISTIANO BIGONHA TIBIRIÇA
PAULO SELEGHIM JUNIOR

Dezembro de 2025

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUÇÃO..... | 4 |
| OBJETIVOS..... | 4 |
| Funcionamento do Algoritmo Genético..... | 5 |
| MODELAGEM/SIMULAÇÃO/OTIMIZAÇÃO - MEMORIAL DE CÁLCULO..... | 6 |
| Condições ambientais do projeto:..... | 6 |
| PAINEL SOLAR..... | 6 |
| MOTOR..... | 7 |
| Características do motor:..... | 7 |
| FORÇAS RESISTIVAS..... | 10 |
| MASSA TOTAL..... | 10 |
| PNEUS E RODAS..... | 11 |
| FREIOS..... | 12 |
| Tabela 1: Parâmetros de Entrada da Simulação Térmica..... | 12 |
| Tabela 2: Resultados Chave da Simulação Térmica..... | 13 |
| SUSPENSÃO..... | 13 |
| DIREÇÃO..... | 16 |
| CABINE..... | 17 |
| Tabela 3: Parâmetros Chave Utilizados na Simulação da Cabine..... | 18 |
| ESPECIFICAÇÕES DO VEÍCULO ÓTIMO..... | 19 |
| 1) Nome do Carro..... | 19 |
| 2) Rodas..... | 20 |
| 3) Pneus e pressão interna..... | 20 |
| 4) Freios..... | 20 |
| 5) Suspensão..... | 20 |
| 6) Motor, eficiência e potência máxima..... | 20 |
| 7) Transmissão..... | 20 |
| 8) Baterias..... | 20 |
| 9) Fiação elétrica..... | 21 |
| 10) Painel fotoelétrico, área e eficiência..... | 21 |
| 11) Controladoras, eficiência e controles..... | 21 |
| 11.2) Assento e cinto de segurança..... | 21 |
| 12) Direção..... | 21 |
| 13) Chassi e Santo Antônio..... | 22 |
| 14) Carenagem, cor e transparência..... | 22 |
| 15) Portas e aberturas..... | 22 |
| 16) Resfriamento de componentes..... | 23 |
| 17) Ventilação Interna..... | 23 |
| CÁLCULO DE PARÂMETROS..... | 23 |
| 18) Massa Total (kg)..... | 23 |
| 19) Coef. de Arrasto (Cd)..... | 23 |
| 20) Crr base:..... | 23 |
| 21) Area Frontal (m2):..... | 23 |
| 22) Capacidade da Bateria:..... | 24 |
| 23) Curva de potência do motor elétrico..... | 24 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 24) Curva de eficiência do motor..... | 25 |
| 25) Custo total de material em reais..... | 26 |
| SIMULAÇÃO E ANÁLISE..... | 26 |
| 26) Simulação temperatura freio..... | 26 |
| 27) Simular a temperatura nos fios de alimentação do motor na potência máxima do motor..... | 27 |
| 28) Alcance Máximo Diário (c/ 30% bat.):..... | 28 |
| 29) Autonomia a 60 km/h (sem sol):..... | 28 |
| 30) Velocidade Máxima (Plano):..... | 28 |
| 31) Tempo p/ 3000km:..... | 28 |
| 32) Perfil de Velocidade Otimizado (km/h):..... | 28 |
| 33) Simulação temperatura da bateria ao longo do dia..... | 28 |
| 34) Simulação temperatura do ar da cabine ao longo do dia..... | 28 |
| 35) Consumo energético do motor instantâneo(W):..... | 29 |
| REFERÊNCIAS..... | 30 |

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de veículos de alta eficiência energética representa um desafio complexo na engenharia e que exige a integração de múltiplas disciplinas e conhecimentos. Dessa forma, no âmbito da disciplina em questão, este relatório apresenta o desenvolvimento completo de um veículo elétrico e solar, abrangendo desde a especificação técnica de componentes mecânicos como chassi, suspensão, direção e pneu, até o dimensionamento do sistema elétrico e armazenamento de energia.

Ademais, além das definições estruturais, o projeto enfatiza a análise do comportamento físico do veículo sob condições de estresse. Nesse sentido, inclui-se a simulação de fenômenos térmicos transientes, como a elevação de temperatura nos freios durante desacelerações bruscas, o aquecimento dos condutores elétricos em regime de potência máxima e a variação térmica da cabine e das baterias ao longo de um ciclo de operação. Portanto, a viabilidade do projeto depende da convergência entre uma aerodinâmica otimizada, representada pelos coeficientes de arrasto e área frontal, e uma estratégia energética que seja eficiente.

OBJETIVOS

Desse modo, o trabalho em questão destina-se a projetar, especificar, avaliar e simular um veículo elétrico solar dentro das normas da competição World Solar Challenge 2025 na classe Challenger, porém com algumas limitações locais que deverão considerar a incidência solar num dia de céu limpo na data 21 de junho e nas coordenadas e altitude da cidade de São Carlos-SP com a temperatura ambiente de 25 °C, umidade relativa de 50% e velocidade do vento zero.

Para a resolução dos itens 18,19,21,28,29,30,31,32 e 35 e também usado como referência para os outros cálculos foi desenvolvido um algoritmo genético adaptativo em linguagem C. A sua lógica foi dividida em dois estágios iterativos, um que define a geometria básica do carro e a segunda que faz sua avaliação na corrida ao longo do dia com diferentes insolações. A primeira buscava otimizar a geometria com os sete genes (largura do casco, comprimento do casco, altura do casco, diâmetro do pod, comprimento do pod, área do painel solar e Wsep (parâmetro que define o formato da asa solar)) maximizando a sobra de potência a uma velocidade de cruzeiro fixa; e a segunda parte tem esse modelo resultante da primeira parte e coloca-o na otimização de velocidade para os nove genes (horas do dia), sua função é maximizar a distância percorrida respeitando a restrição de bateria. O código roda esses dois estágios em looping até atingir a convergência ou um número bem grande de iterações (em torno de 6 a 8 horas rodando).

Os códigos do projeto foram dividido em 4 arquivos, o `main.c` que gerencia o fluxo de execução, define os limites dos genes e chama cada estágio de otimização; o `physics.c` e o `physics.h` nesses dois arquivos estão guardados toda a modelagem física do problema (aerodinâmica, mecânica e a parte de geração de energia solar), além de guardar a ideia do modelo assimétrico e as restrições de componentes, piloto e rodas; `ga_engine.c` e `ga_engine.h` aqui fica o algoritmo evolutivo em si, ele foi construído com mutação variável, diminuindo para escalar picos de máximos locais e aumentando para fugir de estagnações, se a estagnação for atingida ela ativa um modo de repulsão do melhor indivíduo e se ainda

assim estiver estagnado metade da população é substituída para dar lugar a novos indivíduos com genes aleatórios; e por fim os arquivos *reports.c* e *reports.h* eles são responsáveis por compilar os dados brutos e gerar os relatórios detalhados de performance e as especificações resultantes.

Para a modelagem física foi observado o modelo de carro das equipes reais e basicamente existem dois, o bullet e o outrigger, o primeiro se parecendo com uma bolha e empacotando todos os elementos dentro do casco e o segundo conhecido também como catamarã que coloca duas rodas do mesmo lado e constrói os pods das rodas assimétricos. Ao longo da modelagem e otimização percebeu-se que o modelo bullet não conseguia chegar a resultados e geometrias satisfatórias, por isso, optou-se por focar somente no catamarã e definir algumas penalidades de morte como o tamanho do piloto e das rodas fazendo assim com que o otimizador não criasse carros onde o piloto e as rodas não coubessem.

Após as otimizações com os valores estimados iniciais, os itens foram definidos e consertados nos códigos para atualizá-los e deixá-los mais precisos e fiéis às escolhas feitas.

Funcionamento do Algoritmo Genético

Ele se baseia na modelagem do carro a partir de equações gerais que vão influenciar nos 7 genes geométricos do modelo (com ranges delimitados de acordo com a física/espaco disponível e especificações da competição), 7 genes definem um indivíduo e eles são avaliados a partir do resultado que produzem definindo o carro que percorrerá a maior distância com velocidade de cruzeiro de 60 km/h maximizando a sobra de potência. O indivíduo com o melhor resultado terá seus genes (parâmetros do carro) mesclados com de todos os indivíduos daquela geração por meio de média aritmética simples, como se fosse um cruzamento genético onde você herda metade dos genes do pai e metade da mãe) para que eles deem origem a nova geração, com isso o melhor de todos “puxa” a variabilidade genética da população para mais perto dele fazendo com que após múltiplas gerações a população escale aquele pico da função. Após níveis de estagnação serem detectados, mecanismos de mutação, já existentes, começam a aumentar seus níveis até um limite de 20% e forçar as novas gerações a explorar o ambiente, se mesmo assim o melhor indivíduo não for trocado, o algoritmo ativa um modo de repulsão do melhor de todos e passa a explorar mais ainda, se isso ainda não gerar um indivíduo melhor que o melhor de todos a última arma de exploração é a eliminação de 50% dos piores indivíduos daquela geração e reposição na próxima geração por novos indivíduos aleatórios.

Após 100.000 gerações dessa primeira otimização, o melhor indivíduo é levado a outra otimização para descobrir a melhor estratégia de gerenciamento do pacote de energia ao longo das nove horas (os nove genes) de duração da competição por mais 100.000 gerações a fim de completar os 3000 km no menor tempo possível.

MODELAGEM/SIMULAÇÃO/OTIMIZAÇÃO - MEMORIAL DE CÁLCULO

Condições ambientais do projeto:

Localização São Carlos - SP o que implica que a densidade do ar é de 1,184 kg/m³ definida a 25 °C. A irradiação solar no dia 21 de Junho é demonstrada na tabela abaixo:

| | |
|---------|--------------|
| 08-09 h | - 188.2 W/m2 |
| 09-10 h | - 353.8 W/m2 |
| 10-11 h | - 486.1 W/m2 |
| 11-12 h | - 566.6 W/m2 |
| 12-13 h | - 586.2 W/m2 |
| 13-14 h | - 542.6 W/m2 |
| 14-15 h | - 440.7 W/m2 |
| 15-16 h | - 292.7 W/m2 |
| 16-17 h | - 122.7 W/m2 |

A classe Challenger impõe algumas restrições como dimensões máximas do carro, 5,8 m de comprimento por 2,3 m de largura, área solar de 6,0 m², a capacidade da bateria é de 11 MJ no máximo e o motorista com o lastro, se necessário, deve(m) ter no mínimo 80 kg. A bateria para otimização foi modelada como um reservatório de energia ideal somente limitada pelo seu limite que convertido fica em 3,056 kWh.

PAINEL SOLAR

O painel fotoelétrico foi modelado com base no modelo NOCT(Nominal Operating Cell Temperature) que faz com que sua eficiência varie de acordo com base na irradiância e na temperatura ambiente:

$$T_{célula} = T_{amb} + (NOCT - 20)(Irradiância/800)$$

A eficiência ajustada fica como:

$$\eta_{painel} = \eta_{ref}(1 + k_T(T_{célula} - 25))$$

A potência gerada por ele como:

$$P_{solar} = irradição \cdot A_{solar} \cdot \eta_{painel}$$

A eficiência de referência do painel foi obtida e determinada como EFF_PANEL_REF= 0,245, PANEL_TEMP_COEFF(coeficiente térmico)= -0,37 %/°C e o NOCT= 47 °C.

Após a pesquisa de células comerciais os valores foram atualizados para $EFF_PANEL_REF = 0,248$, $PANEL_TEMP_COEFF$ (coeficiente térmico)= $-0,29 \text{ }^\circ\text{C}$ e o $NOCT = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

BATERIA

A bateria foi modelada com base no valor máximo de carga que o regulamento permite para a classe Challenger, de 11MJ, e escolhendo uma célula de bateria que se adequasse a uma estratégia de “Alta Energia” com a menor massa, definindo então a célula da Samsung INR21700-50E disposta numa configuração de 28 células em série e 6 células em paralelo:

$$E_{célula} = 3600 \times V \times q \Rightarrow E_{célula} = 3600 \times 3,6 \times 5 = 64800 \text{ J}$$

$$E_{total} = 168 \times 64800 \Rightarrow E_{total} = 10886400 \text{ J} = 10,88 \text{ MJ}$$

Tensão:

$$u = 28 (\text{paralelo}) \times 3,6 \Rightarrow u = 100,8 \text{ V}$$

Corrente:

$$i = 6 (\text{série}) \times 15 \Rightarrow i_{pico} = 90 \text{ A}$$

Essa configuração foi escolhida com o intuito de atingir uma tensão nominal de 100,8 V, tentando reduzir a corrente de operação para minimizar as perdas por efeito Joule. O agrupamento em 6 paralelos garante uma corrente de pico de 90 A, sendo suficiente para demandas de aceleração e subida.

MOTOR

Para determinar um motor comercialmente viável, utilizou-se como base as forças de aceleração, arrasto e rolagem que o carro precisaria superar durante a operação. Além disso, outro parâmetro importante para o motor era a velocidade máxima que o veículo poderia atingir, com o objetivo de otimizar o tempo de prova. Um limitante para os parâmetros do motor era a potência que ele iria consumir, o objetivo foi não se distanciar muito da geração média do painel solar.

Características do motor:

| | |
|---------------------------|-------|
| Potência Nominal (W) | 900 |
| Tensão Nominal (V) | 48 |
| Corrente sem carga (A) | ≤5.0 |
| Revolução sem carga (RPM) | 3700 |
| Torque Nominal (N•m) | 2.6 |
| Torque máximo (N•m) | 13.5 |
| Revolução Nominal (RPM) | 3300 |
| Corrente Nominal (A) | ≤24.0 |
| Ciclo de trabalho (min.) | S2-60 |
| Classe de Isolamento | F |
| Nível de proteção | IP44 |
| Comprimento (L/mm) | 265 |

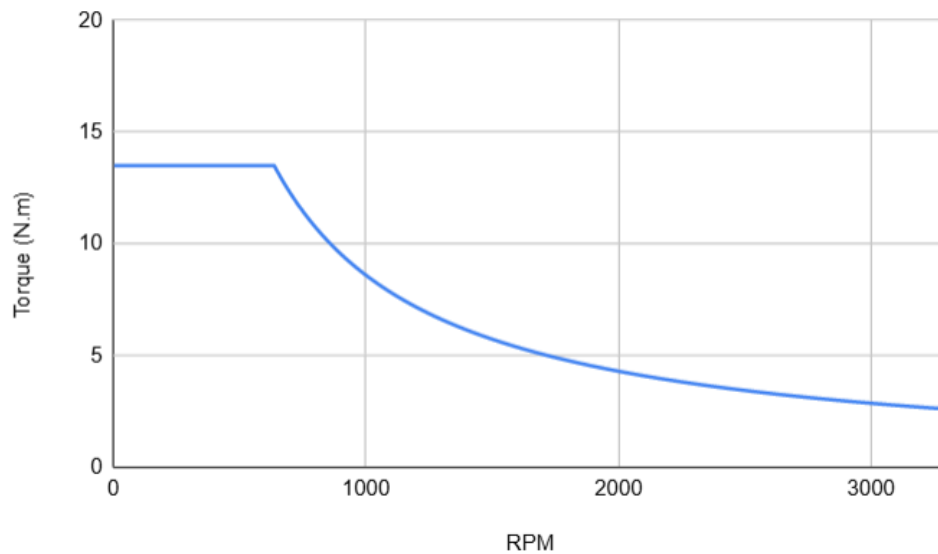
O motor tem uma eficiência de 78%, desse modo, há uma diferença entre a potência elétrica fornecida ao motor e a potência mecânica gerada pelo mesmo. Essa diferença pode ser analisada no gráfico a seguir, que relaciona ambas as potências com a rotação do motor em RPM:

Potência x RPM



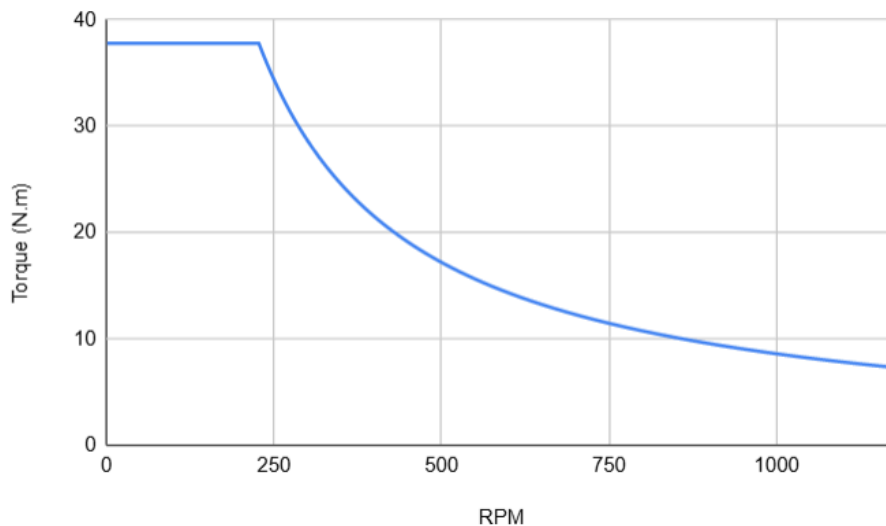
Outra relação importante para o projeto é entre o torque e a rotação do motor, com o motor escolhido, conseguimos a seguinte curva de torque em função do RPM:

Torque x RPM - Sem redução



Com o objetivo de otimizar a velocidade do motor e de garantir o torque necessário, foi selecionada uma transmissão de engrenagens de 2,8:1, utilizada em motos populares. Com a escolha de utilizar esse tipo de transmissão, garantimos mais segurança para o eixo do motor, já que o mesmo não fica diretamente conectado à roda, evitando impactos causados por irregularidades no terreno. Após a redução nas rotações, obtemos a seguinte curva de torque por RPM:

Torque x RPM - Após redução



O conjunto motor e transmissão, somados, apresentam uma massa de aproximadamente 11 kg e, por meio do mesmo, o veículo tem capacidade de atingir uma velocidade máxima de 95 km/h em um terreno plano, baseado nas seguintes equações:

$$V_{\text{máx}} = (RPM * \pi * A_{ro} * 3.6) / (60 * \text{Redução})$$

$$\text{Torque} > ((\rho * C_a * V^2 * A) / 2) + (g * m * C_{rr})$$

Para realizar a simulação e otimização dos parâmetros no algoritmo genético, o motor foi modelado como uma cadeia de perdas de eficiência não linear e dependente da carga de trabalho:

EFF_MPPT(Controladora do painel solar)= 0,985
 EFF_DRIVER(Controladora do motor)=0,975
 EFF_TRANS(Transmissão mecânica)=0,98

E após consulta de itens comerciais atualizamos os valores para:

EFF_MPPT(Controladora do painel solar)= 0,985
 EFF_DRIVER(Controladora do motor)=0,975
 EFF_MOTOR(Motor Elétrico)=0,78
 EFF_TRANS(Transmissão mecânica)=0,95

A curva de eficiência do motor é implementada da seguinte forma:

$$carga = P_{resist} / P_{motorNominal}$$

A potência nominal do motor é de 900,0 W e as faixas de eficiência foram feitas como abaixo:

Carga < 20%: $\eta_{nominal}$ aumenta linearmente de 80% para 90%
 Carga 20% a 80%: $\eta_{nominal}$ aumenta linearmente de 90% para 95%
 Carga 80% a 250%: $\eta_{nominal}$ diminui linearmente de 95%
 Carga > 250%: $\eta_{nominal}$ cai para 70%

FORÇAS RESISTIVAS

A potência resistiva total(P_{resist}) que o motor deve vencer é a soma das forças de arrasto aerodinâmico(F_{ad}) e resistência ao rolamento(F_{rr}) multiplicada pela velocidade(v).

O coeficiente de resistência ao rolamento foi modelado dinamicamente e é dependente da velocidade do veículo e da temperatura do asfalto.

$$C_{rr} = C_{rr,base} \cdot (1 + k_v \cdot v_{km/h}) \cdot (1 + k_T \cdot (T_{asfalto} - 25, 0))$$

Algumas constantes utilizadas foram o CR_ROLLING_BASE(Coeficiente de rolamento base)= 0,0078, CR_TEMP_COEFF (Dependência da temperatura) =

0,0015(baseado na referência bibliográfica 10, porém estimada com valor positivo como margem de segurança de Engenharia) , CR_SPEED_COEFF (Dependência da velocidade) = 0,0001(baseado na referência bibliográfica 7) e a força final é igual a:

$$F_{rr} = C_{rr} \cdot M_{total} \cdot 9,81$$

O arrasto aerodinâmico é modelado de acordo com a fórmula abaixo:

$$F_{ad} = 0,5 \cdot \rho \cdot A_{frontal} \cdot C_d \cdot v^2$$

$A_{frontal}$ e C_d são calculados como uma soma de componentes a área frontal é composta da seguinte forma:

$$A_{frontalTotal} = A_{frontalPods} + A_{frontalCasco}$$

Já para o C_d ele é calculado como o produto do $C_d \cdot A_{frontal}$ no código e depois dividido pela $A_{frontalTotal}$ para se obter o C_d isolado.

$$C_d \cdot A_{total} = (C_d \cdot A_{pods} + C_d \cdot A_{casco} + C_d \cdot A_{asa}) \cdot 1,10$$

essa multiplicação por 1,10 estabelecida como penalidade por interferência

O $C_d \cdot A$ é calculado fazendo uso do Número de Reynolds $Re = \rho v L / \mu$ e a fórmula de placa plana turbulenta $C_f = 0,074 / Re^{0,2}$ e o $C_d \cdot A$ de forma dos pods depende da relação comprimento/diâmetro do pod.

MASSA TOTAL

A massa total também é feita de uma composição de massas, a massa do motorista(80kg), a massa fixa dos componentes(baseado no Sonnenwagen equipe alemã 92kg) e a massa estrutural baseada nas densidades dos componentes reais.

Constantes de densidade utilizados RHO_CHASSI= 4,5kg/m² (representa a massa da estrutura de segurança metálica normalizada pela área do painel) , RHO_CARENAGEM= 0,8kg/m² (Refere-se às estruturas aerodinâmicas de “pele” do modelo) e RHO_PAINEL= 5,5kg/m² (Engloba o sistema fotovoltaico completo junto das estruturas que a suportam, painel sanduíche de compósito).

E a massa estrutural destrinchada com a fórmula abaixo:

$$M_{estrutura} = M_{asa} + M_{pods} + M_{casco}$$

$$M_{asa} = (\rho_{chassi} + \rho_{painel}) \cdot A_{solar}$$

$$M_{pods} = 2 \cdot (\rho_{carenagem} \cdot A_{molhadaPod})$$

$$M_{total} = M_{estrutura} + 92,0 + 80,0$$

A área molhada consiste na soma das áreas superficiais do casco, do pod e da asa.

Na previsão inicial, a massa total foi obtida diretamente por esse modelo analítico. Entretanto, após refinarmos o dimensionamento real de cada subsistema — canopy, chassi, carenagem, bancos, sistema de fixação, elétrica, suspensão e demais itens especificados — observou-se que a massa final ficou aproximadamente **8 kg menor** que a previsão original. Assim, a massa final passou a ser calculada como:

M_final = Massa do piloto + Massa dos componentes dimensionados e estruturas

resultando em aproximadamente **234 kg**.

Essa diferença é explicada por elementos que não foram dimensionados no escopo deste projeto, mas que, em uma previsão inicial, estavam embutidos nas densidades médias utilizadas. Dessa forma, adotar o valor de **242,79 kg** como massa total estimada é plenamente admissível e realista para esta fase do desenvolvimento do veículo.

PNEUS E RODAS

Para a escolha dos pneus, foi levado em consideração a necessidade de economia de energia do carro dado o contexto do projeto. Dessa forma, optou-se por um pneu estreito com 155mm de largura e para que o coeficiente de resistência à rolagem fosse o menor possível, o que foi encontrado no pneu Bridgestone Ecopia EP500 155/70R19, o qual é usado na BMW I3 elétrica. Ademais, tal pneu consegue suportar uma carga de 500kg e uma velocidade de 160 km/h, o que está de acordo com as métricas estipuladas para o carro.

Além disso, outro parâmetro analisado foi a pressão interna a qual ficou em torno de 46 psi. De acordo com algumas informações encontradas das equipes que participaram da competição, as pressões utilizadas eram mais altas, em torno de 90 psi, mas a Bridgestone havia fabricado pneus específicos para a competição, os quais não foram possíveis de encontrar à venda, tornando o pneu escolhido a melhor opção.

Por fim, o Crr foi adquirido seguindo a norma “REGULAMENTO (UE) 2020/740 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO”. Como, de acordo com o fabricante do pneu, ele é considerado classe C, o coeficiente de resistência à rolagem tabelado está entre 0,0078 e 0,009.

Ademais, a roda escolhida foi a mesma roda que é utilizada na BMW I3 também (modelo BMW I3 estilo 428), por ser adequada para as dimensões do pneu, o qual exige uma geometria de roda muito específica de grande diâmetro e largura estreita que não é o padrão da indústria, e a roda de liga leve apresenta uma superfície mais uniforme e menos turbulenta do que rodas comuns em opções leves de prateleira, o que contribui para a redução do arrasto aerodinâmico Cd na região crítica das caixas de roda.

FREIOS

A análise do desempenho térmico do sistema de freios foi realizada através da aplicação do princípio de Balanço de Energia. A simulação foi dividida em cálculo do calor total(dinâmica veicular) e modelagem da taxa de variação de temperatura(transferência de calor).

Os parâmetros de entrada foram ajustados para modelar um sistema de Ferro Fundido(FoFo) com resfriamento otimizado.

Tabela 1: Parâmetros de Entrada da Simulação Térmica

| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade | Justificativa |
|--------------------------|--------------------|--------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Massa Total do Veículo | M | 249,37 | kg | Estimativa total(Estrutura+ Piloto+Packs) |
| Massa Total dos Freios | m_{freio} | 6,0 | kg | Aumento de massa para maior inércia térmica |
| Calor Específico | c_{freio} | 500 | J/(kg.°C) | Valor padrão para o Ferro Fundido |
| Área de Dissipação | A | 0,13 | m ² | Simula discos ventilados e dutos de resfriamento |
| Coeficiente de Convecção | h | 100 | W/m ² .°C) | Alto valor, refletindo fluxo de ar forçado |

O calor(Q_{total}) que deve ser absorvido é determinado pela variação da Energia Cinética(ΔE_c), considerando $V_i = 30\text{m/s}$ e $V_f = 10\text{m/s}$.

Energia Cinética Dissipada:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}M(V_i^2 - V_f^2) = \frac{1}{2}(249,37 \text{ kg})(30^2 - 10^2)\text{m}^2/\text{s}^2 = 99,748 \text{ J} \quad (1)$$

Calor Absorvido pelo Freio: (Com $\eta = 0,95$ e $\phi = 0,90$)

$$Q_{\text{total}} = \eta \cdot \phi \cdot \Delta E_c = 0,95 \cdot 0,90 \cdot 99,748 \text{ J} = 85,281 \text{ J} \quad (2)$$

Aumento da Temperatura Adiabático:

$$\Delta T_{\text{adib}} = \frac{Q_{\text{total}}}{m_{\text{freio}} \cdot c_{\text{freio}}} = \frac{85,281 \text{ J}}{6,0 \text{ kg} \cdot 500 \text{ J/(kg.°C)}} = 28,43^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$T_{pico, adib} = 25\text{ }^{\circ}\text{C} + 28,43\text{ }^{\circ}\text{C} = 53,43\text{ }^{\circ}\text{C}$$

A temperatura real é obtida pela integração numérica da Equação Diferencial Ordinária(EDO) de Balanço de Energia:

$$\frac{dT}{dt} = K1 - K2(T - T_{ambiente}) \quad (4)$$

Onde K1 é a Taxa de Aquecimento e K2 é a Constante de Resfriamento:

$$K1: K1 = \frac{Q_{total} / \Delta t}{m_{freio} \cdot c_{freio}} \approx 5,03\text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$K2: K2 = \frac{h \cdot A}{m_{freio} \cdot c_{freio}} \approx 0,00433\text{ s}^{-1}$$

A simulação em MATLAB gerou o perfil de temperatura T(t), com os seguintes resultados:

Tabela 2: Resultados Chave da Simulação Térmica

| Resultado | Valor | Análise |
|--------------------------------|----------|-----------------------------------------|
| Calor Absorvido pelo freio | 85,281 J | Energia total a ser convertida em calor |
| Pico de Temperatura Adiabático | 53,43 °C | Limite superior teórico de temperatura |
| Temperatura Máxima Simulada | 53,13 °C | Pico real atingido no final da frenagem |

SUSPENSÃO

Para atender aos requisitos de estabilidade dinâmica (Testes de *Slalom* e *Figure-8*), eficiência aerodinâmica e baixo peso, a estratégia de suspensão foi dividida por eixo:

Configuração Geométrica:

- Dianteira (Ambos os lados): Suspensão Independente de Duplo Braço Triangular (Double Wishbone) Desigual.
- Traseira (Lado Piloto): Suspensão Independente de Braço Arrastado (Trailing Arm).

Solução para Assimetria de Massa:

Como o veículo possui distribuição de peso severamente deslocada para a direita (lado do piloto/baterias), adotou-se a estratégia de Rigidez Assimétrica:

- Utilização de amortecedores idênticos (para intercambiabilidade e manutenção).

- Utilização de Molas com Constantes Elásticas (K) Distintas: Uma mola "dura" para o lado esquerdo e uma "macia" para o direito, calculadas para manter a Frequência Natural (f_n) equalizada em ambos os lados.

Justificativa:

- Controle Cinemático (Duplo A): Permite o controle preciso de Câmbio e Toe durante o curso da suspensão. Isso garante que os pneus mantenham contato ideal com o solo, minimizando a resistência ao rolamento (C_{rr}).
- Aerodinâmica (Trailing Arm): A suspensão traseira de braço arrastado é compacta verticalmente, permitindo que a carenagem traseira do casco principal seja afilada ("em ponta"), reduzindo o coeficiente de arrasto (C_d) e a esteira de turbulência.
- Segurança (Regulamento 2.19.4): A geometria foi dimensionada para garantir estabilidade estática em inclinações superiores a 45°, compensando o CG alto e deslocado típico de catamarãs.

Definição de Parâmetros:

- Frequência Natural (f_n): Meta de 1,8 Hz (conforto e estabilidade aerodinâmica).
- Curso Total (Travel): 50mm (+20mm compressão / -30mm extensão).
- Estabilidade Lateral: O veículo deve suportar aceleração lateral de pelo menos 0,8g sem tombar.
- Altura de Rodagem (Ride Height): 150 mm (para superar lombadas conforme Reg. 2.3.5)

Dimensionamento dos Componentes:

1. Distribuição de Massa:

Roda dianteira esquerda:

$$m_{FE} = M_{total} \cdot \frac{Y_{cg}}{W} = 68,6 \text{ kg}$$

Roda dianteira direita:

$$m_{FD} = \frac{M_{total} \times X_{cg} - m_{FE} \times L_E}{L_D} = 57,0 \text{ kg}$$

Roda traseira:

$$m_T = M_{total} - m_{FD} - m_{FE} = 124,4 \text{ kg}$$

Sendo:

m_T : massa efetiva apoiada na roda traseira;

M_{total} : Massa total do veículo;

m_{FE} : massa efetiva apoiada na roda dianteira esquerda;

m_{FD} : massa efetiva apoiada na roda dianteira direita;

L : distância entre-eixos;

W : distância lateral entre rodas dianteiras.

2. Dimensionamento das Molas:

Massa suspensa:

$$m_s = m_{roda} - m_{ns}$$

$$m_{sE} = 60,6 \text{ kg}; m_{sD} = 49,0 \text{ kg}; m_{sT} = 109,4 \text{ kg}$$

Rigidez na roda:

$$K_{roda} = 4\pi^2 \cdot f_n^2 \cdot m_s$$

$$K_{rE} = 7750 \text{ N/m}; K_{rD} = 6270 \text{ N/m}; K_{rT} = 14000 \text{ N/m}$$

Rigidez na mola:

$$K_{mola} = \frac{K_{roda}}{MR^2 \cdot \cos^2(\theta)}$$

$$K_{mE} = 28700 \text{ N/m}; K_{mD} = 23220 \text{ N/m}; K_{mT} = 51850 \text{ N/m}$$

Convertendo para lbs/in:

$$K_{mE} = 164 \text{ lbs/in}; K_{mD} = 132 \text{ lbs/in}; K_{mT} = 296 \text{ lbs/in}$$

Sendo:

m_s : massa suspensa;

m_{roda} : massa total na roda;

m_{ns} : massa não-suspensa;

K_{roda} : rigidez na roda;

K_{mola} : constante elástica da mola;

MR : razão de movimento da mola e deslocamento da roda (estimado 0,6);

f_n : frequência natural alvo do projeto;

$\theta = 30^\circ$.

3. Estabilidade:

Verificação se o CG está baixo o suficiente para evitar tombamento conforme regulamento.

Menor distância horizontal do CG até as linhas de tombamento laterais:

$$d_{crit} = 318mm$$

Altura máxima permitida para passar no teste de inclinação de 45°:

$$h_{CG} \leq d_{crit} \cdot \tan(45^\circ) \Rightarrow h_{CG} \leq 318mm$$

DIREÇÃO

O projeto do sistema de direção foi desenvolvido considerando as particularidades geométricas do veículo solar do tipo catamarã assimétrico, cujo arranjo estrutural apresenta entre-eixos de 1560 mm, bitola dianteira de 1160 mm e um escalonamento lateral de 832,52 mm, resultando em uma roda direita significativamente recuada em relação à esquerda. A massa total do veículo, de 242 kg, impõe requisitos adicionais de robustez estrutural ao mecanismo de transmissão da direção, sobretudo tendo em vista as solicitações dinâmicas durante manobras, frenagem e impactos provenientes de irregularidades da pista. Diante dessas condições, a solução adotada foi o emprego de um sistema de direção por reenvio do tipo bell crank.

A concepção do sistema baseia-se em três componentes cinemáticos fundamentais: a caixa de direção localizada no cockpit, responsável pela conversão do movimento rotacional do volante em deslocamento linear; o balancim central posicionado no interior da asa estrutural, que modifica a direção das forças transmitidas; e a barra secundária que conecta o balancim à manga de direção da roda direita. Essa segmentação é necessária porque, devido ao vão estrutural existente entre a roda esquerda e a roda lateral direita, uma única barra apresentaria elevado risco de instabilidade elástica quando submetida a esforços de compressão.

Para o dimensionamento das barras de direção, empregou-se a teoria clássica de flambagem de Euler. A carga crítica foi calculada pela fórmula:

$$P_{cr} = \frac{(\pi^2 \cdot E \cdot I)}{(K \cdot L)^2}$$

em que E representa o módulo de elasticidade, I o momento de inércia, L o comprimento livre e K o coeficiente de restrição (adotado como 1). O momento de inércia foi calculado por:

$$I = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}$$

Considerando tubos de fibra de carbono com módulo $E \approx 70$ GPa e comprimento crítico $L \approx 0,65$ m, verificou-se que tubos de 20 mm apresentavam carga crítica próxima de 4400 N, resultando em fator de segurança inadequado. A adoção de tubos de 25 mm elevou a capacidade para aproximadamente 12500 N, garantindo fator de segurança superior a 8.

Dessa forma, concluiu-se que apenas tubos com diâmetro externo mínimo de 25 mm

e espessura entre 1,5 mm e 2,0 mm atendem adequadamente às exigências estruturais do veículo, assegurando rigidez e estabilidade mesmo sob condições dinâmicas severas. A estimativa é de 5kg todo o conjunto.

CABINE

A análise da temperatura interna da cabine(T_{cab}) é essencial para validar o projeto de ventilação, em conformidade com o Regulamento 3.1 da BWSC, que exige medidas para garantir que os ocupantes não superaqueçam. A simulação foi realizada utilizando um modelo de Balanço de Energia Transiente(Capacitância Global).

A variação da temperatura interna é modelada por uma Equação Diferencial Ordinária (EDO) de primeira ordem, que considera o acúmulo de energia térmica em relação à capacidade total do sistema:

$$\frac{dT_{cab}}{dt} = \frac{1}{C_{total}} \cdot (\bar{Q}_{solar} + \bar{Q}_{convecção} + \bar{Q}_{gerada} - \bar{Q}_{ventilação}) \quad (1)$$

Os componentes do balanço de energia ($\Sigma \bar{Q}$) são:

- \bar{Q}_{solar} : Ganho de calor pelo efeito estufa(Através da área transparente $A_{glazing}$).
- $\bar{Q}_{convecção}$: Troca de calor com o ambiente externo pela carcaça opaca(A_{shell}).
- \bar{Q}_{gerada} : Potência de calor gerada internamente pelo piloto(100 W) e eletrônica(50 W).
- $\bar{Q}_{ventilação}$: Perda de calor devido à renovação forçada do ar(sistema de ventilação).

A obtenção de uma curva de temperatura fisicamente realista(subida suave) dependeu da correta definição da Capacidade Térmica Total(C_{total}).

O Problema da Abruptidez: Se apenas a capacidade térmica do ar ($C_{ar} \approx 2,400 J/^{\circ}C$) for considerada, a inércia do sistema é desprezível. Isso faz com que a taxa de variação da temperatura($\frac{dT}{dt}$) seja exageradamente alta, resultando em um aumento súbito e irrealista logo no início da simulação.

A Solução Física: O calor solar e metabólico é absorvido majoritariamente pela massa dos componentes da cabine e pelo piloto. A inércia do sistema é dominada pela Capacidade Térmica Equivalente da Estrutura($C_{estrutura eq}$) que inclui piloto, baterias, assento e carcaça.

Parâmetro Corrigido: Foi adotado $C_{estrutura eq} \approx 334,000 J/^{\circ}C$, que representa uma massa estrutural e interna equivalente a ≈ 160 kg. A Capacidade Térmica Total utilizada na EDO é:

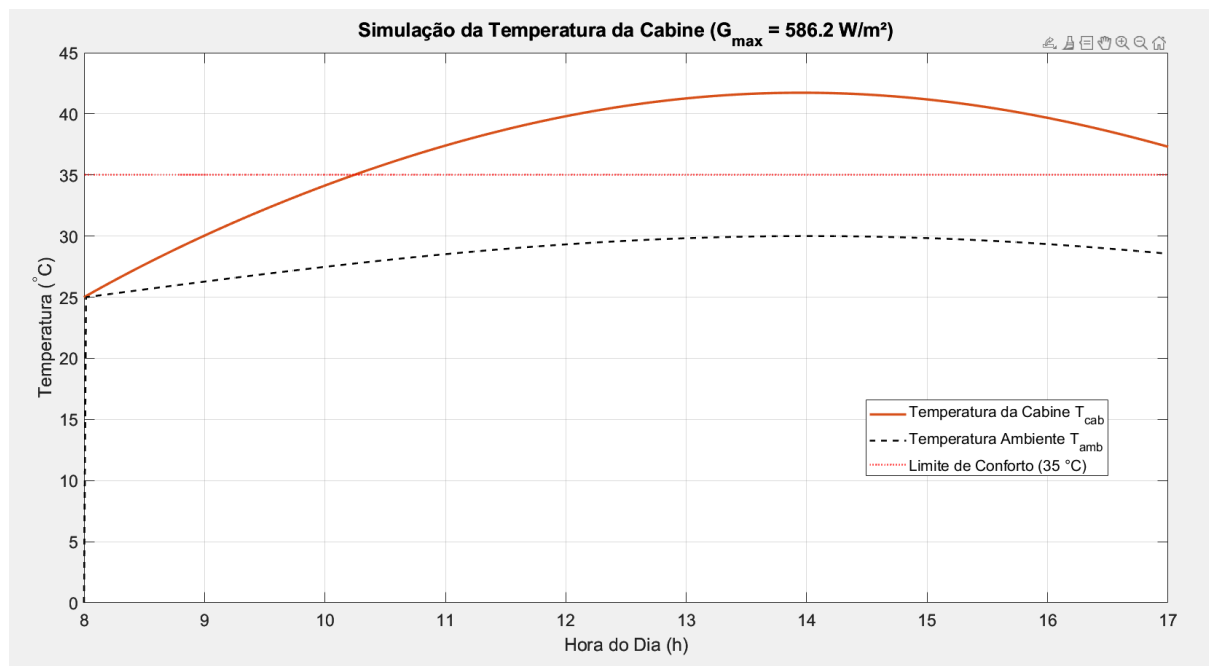
$$C_{total} = C_{ar} + C_{estrutura eq} \approx 336,414 J/^{\circ}C$$

Esta alta inércia garante que a temperatura suba gradualmente ao longo das horas de competição, como esperado em um veículo real.

Tabela 3: Parâmetros Chave Utilizados na Simulação da Cabine

| Parâmetro | Símbolo | Valor |
|--------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|
| Capacidade Térmica Total | C_{total} | 336,414 J/°C |
| Área de Vidro/Acrílico | $A_{glazing}$ | 1,5 m ² |
| Transmissividade Solar | τ | 0,85 |
| Potência de Ventilação | $\bar{Q}_{ventilação}$ | $\propto \bar{V}_{vent} \cdot (T_{cab} - T_{amb})$ |
| Vazão de Ventilação | \bar{V}_{vent} | 0,05 m ³ /s |

Com estes parâmetros foi realizado uma simulação térmica do interior da cabina durante o tempo de utilização do veículo, chegou-se na temperatura máxima de 41,73° por volta das 14h, o restante do resultado está no gráfico abaixo:



ESPECIFICAÇÕES DO VEÍCULO ÓTIMO

Envergadura total: Largura do carro; Corda média da Asa: Média matemática que define a profundidade da asa se ela fosse retangular e tivesse a mesma área total do carro, utilizada para cálculo aerodinâmico do número de Reynolds; Pod: É a carenagem destinada a roda isolada oposta ao lado do piloto e do casco principal.

- Área do Painel Solar: 5.35 m² (máx. 6.0)

- Envergadura Total (W_sep): 1.63 m (máx. 2.3)
- Corda Média da Asa: 3.28 m
- Comprimento do Casco: 5.69 m (Finura: 7.04)
- Largura do Casco: 0.74 m
- Altura do Casco: 1.03 m
- Comprimento do Pod: 1.53 m (Finura: 2.60)
- Diâmetro do Pod: 0.65 m
- Comprimento Total: 5.69 m (máx. 5.8)
- Área Molhada Total: 25.62 m²

1) Nome do Carro

- Só Roda De Dia

2) Rodas

- Quantidade: 3 rodas
- Modelo: BMW I3 estilo 428
- Dimensão: 19 polegadas de diâmetro
- Massa: 10 kg cada
- Material: Liga de alumínio
- Preço: 3.980,00 reais cada

3) Pneus e pressão interna

- Quantidade: 3 pneus
- Modelo: Bridgestone Ecopia EP500 84Q
- Dimensão: 155/70R19
- Massa: 7,08 kg cada
- Pressão interna: 46 psi
- Preço: 1.289,00 reais cada

4) Freios

- Quantidade: 3 discos
- Modelo: Disco de Freio Dianteiro Ventilado GM Tracker
- Dimensão: 300MM de Diâmetro
- Massa: 2 kg cada
- Preço: R\$ 239,90 cada

5) Suspensão

Amortecedor:

- Quantidade: 3 unidades
- Modelo: Bomber CR
- Dimensão: 210x55mm
- Preço: 1.646,00 reais cada

Molas:

- Quantidade: 3 unidades
- Modelo: Hyperco Standard Coilover Spring - ID: 1.875" (300, 175, 150 lbs/in)
- Dimensão: 6" a 8"
- Preço: 460,00 reais cada

Rod End:

- Quantidade: 6 unidades
- Modelo: SKF SA 8 C
- Preço: 250,00 reais cada
- Quantidade: 6 unidades
- Modelo: SKF SALA 8 C
- Preço: 250,00 reais cada

Fabricação:

- Braço da Suspensão:
- Quantidade: 5 unidades
- Material: Aço Liga AISI/SAE 4130

- Mangas de Eixo:
- Quantidade: 2 unidades dianteiras e 2 unidades traseiras
- Material: Alumínio 7075-T6

- Eixos de Roda:
- Quantidade: 2 unidades
- Material: Titânio Ti-6Al-4V

6) Motor, eficiência e potência máxima

- Comprimento: 265 mm
- Quantidade: 1 unidade
- Marca/modelo: Motor PMDC sem escova TF110AH1
- Peso: 8 kg
- Eficiência: 78%
- Potência Máxima: 900W

7) Transmissão

- Material: Aço 1045
- Quantidade: 1 unidade
- Marca/modelo: Transmissão Nakata Honda CB 300R
- Peso: 2.9 kg
- Relação de Transmissão: 2.8 : 1

8) Baterias

- Células: 168 células de bateria Samsung INR 21700-50E 3kWh
- Utilizando uma configuração 28S 6P: 100,8 V 30Ah

9) Fiação elétrica

- **Alimentação principal** (Bateria - Motor) : cabos HV preto e vermelho de cobre, cada um com 5m;
 - área de seção transversal 25mm²
 - tensão nominal de 300V
 - temperatura de 105 °C
- **Alimentação secundária** (Placa - Bateria): cabos HV preto e vermelho de cobre, cada um com 5m;
 - área de seção transversal 16mm²
 - tensão nominal de 700V
 - temperatura de 90 °C
- Demais componentes como conectores, fusíveis e fios LV não foram considerados no projeto devido à baixa interferência no custo e peso final.

10) Painel fotoelétrico, área e eficiência

- Célula fotoelétrica: 217 células de silicone monocristalino 6.8w MAXEON GEN 6 SUNPOWER 166x166mm
- Área total de células: 5,98 m²
- Eficiência: 24,8%
- Peso total das células: 3,255 kg

11) Controladoras, eficiência e controles

- BMS (Battery Management System): Orion BMS 2
- Controladora do motor: KLS14401-8080N/NPS/NA – High Power Opto-Isolated Sinusoidal Motor Controllers - 24-144V

11.2) Assento e cinto de segurança

- Concha do Assento: Fibra de Vidro (GFRP) ou Carbono (CFRP), tipo concha ergonômica com suporte lateral e de ombros, molde customizado para o piloto, fixação rígida ao chassi (sem ajuste), 1 un., R\$ 1.500,00, 3,5 kg
- Estofamento e Revestimento: Espuma de alta densidade (célula fechada) para conforto e absorção de vibração, revestida com tecido retardante de chamas (Nomex ou equivalente), espessura máx. 25 mm, 1 un., R\$ 400,00, 0,8 kg
- Ancoragem do Cinto: Suportes estruturais em Aço 4130 (tubo 19,05 mm × 1,24 mm), soldados diretamente ao chassi para montagem do cinto de 5 pontos, 1 conjunto, R\$ 150,00, 0,7 kg
- Cinto de Segurança: Arnês OMP First, 4–5 pontos, homologado FIA 8854/98, fecho cam-lock e ajustadores rápidos, 1 un., R\$ 1.477,75 (~US\$ 279)

12) Direção

O sistema de direção foi orçado com barras de alumínio 25 × 1,5 mm, totalizando entre R\$150 e R\$240. Os terminais rotulares M8 representam de R\$360 a R\$640 do custo,

enquanto os elementos de fixação adicionais variam entre R\$80 e R\$150. O balancim usinado em alumínio apresenta custo estimado de R\$300 a R\$500, e seu suporte estrutural entre R\$150 e R\$250.

A caixa de direção, compatível com modelos de kart ou mini buggy, varia de R\$250 a R\$400. Ferragens complementares representam entre R\$50 e R\$100. Assim, o custo total estimado do conjunto situa-se na faixa de R\$1.300 a R\$1.900.

13) Chassi e Santo Antônio

- Tubo Principal: Aço 4130 Normalizado, 25.4 mm (1.0") OD x 1.65 mm (0.065") parede, 12 m, R\$ 250,00/m, 12,10 kg
- Tubo de Suporte: Aço 4130 Normalizado, 19.05 mm (0.75") OD x 1.24 mm (0.049") parede, 6 m, R\$ 200,00/m, 2,80 kg
- Chapa de Montagem: Chapa de Aço 4130, 1.6 mm de espessura, 0,5 m², R\$ 300,00/m², 1,00 kg

A gaiola do piloto foi feita utilizando tubos de Aço 4130 Normalizado 25,4mm ele é utilizado para os arcos principais(frente e costas) e o de 19,05mm para triangulação entre os arcos, por fim, as chapas de aço servem de conexão entre a estrutura metálica e a fibra de carbono.

14) Carenagem, cor e transparência

- Tecido Estrutural: Tecido Unidirecional (UD) Pre-Preg, Epóxi, T700, 150-200 g/m², 45 m², R\$ 1200,00/m²
- Tecido de Acabamento: Tecido Sarja (Twill) 2x2 Pre-Preg, Epóxi, T300/T700, 200 g/m², 20 m², R\$ 1100,00/m²
- Tecido de Segurança: Tecido Híbrido Carbono/Aramida Pre-Preg, 7 m², R\$ 1300,00/m²
- Fibra de carbono: 60 m² laminados, 15,00 kg
- Núcleo: Colmeia de Aramida (Nomex®), Densidade: 32 kg/m³, Espessura: 6 mm e 10 mm, 18 m², R\$ 800,00/m², 3,84 kg
- Adesivo do Núcleo: Adesivo em Filme Epóxi , 100-150 g/m², 36 m², R\$ 200,00/m², 3,00 kg
- Cor: Vinil Automotivo Série 2080 3M, 12 m², R\$ 89,00/m, 1,2 kg
Cockpit: Placa de Policarbonato Cristal 3 mm Vick, 2 m², R\$ 351,89/m², 2,5kg
- Película Cockpit: Película Automotiva 3M - Linha Crystalline 90 (Parabrisas), 2 m, R\$ 899,00, 0,1 kg

15) Portas e aberturas

- Cúpula (Canopy): Policarbonato/Acrílico 3 mm, perfil aerodinâmico, visão lateral ampliada, 1 un., R\$ 900,00, 2,50 kg
- Estrutura de Articulação: Alumínio 6061, dobradiças reforçadas e pontos de fixação internos/externos, 1 un., incluso, 1,00 kg

- Travas Two-Stage: Fechos automotivos de dois estágios (encaixe rápido + retenção de segurança), acionamento interno e externo, 2 un., R\$ 400,00, 0,50 kg
- Sistema de Abertura: Abertura basculante lateral, operação manual, resistente a ventos laterais (crosswinds), incluso
- Sinalização Externa de Emergência: Adesivo vinílico "PULL/PRESS", setas e instrução em inglês, 1 un., R\$ 50,00, 0,05 kg

Observação: Abertura deve permitir egresso do motorista sem assistência em até 15 s, conforme regulamento.

16) Resfriamento de componentes

O resfriamento da bateria e da controladora eletrônica será feita através da captação de ar através de um NACA Duct que seguindo por dutos flexíveis levará ar até as controladoras com o ventiladores Noctua descritos abaixo, um na entrada e outro na saída, depois passando na bateria com os packs espaçados por suportes de plástico ABS para que o ar entre nos meios entre as células com a ajuda dos Dc Fans descritos abaixo, de novo, um na entrada e outro na saída para manutenção do fluxo de ar constante, a espuma filtral ficará no bocal antes da bateria para evitar poeira/sujeiras no pack.

- DC Fans Fan: 80x38mm, 12VDC, 91.87CFM, Ball, 4 Leads, Tach/PWM, IP56/GR-487 Salt Fog, 0,200 kg, R\$ 211,06/un, 2 unidades
- Ventilador Noctua: Nf-a4x20 Pwm 40mm, 0,10 kg, R\$ 181,14/un, 2 unidades
- Espuma filtral: 60 PPI 400 mm x 400 mm x 30 mm, R\$ 250,00/un, 1 unidade, 0,10 kg

17) Ventilação Interna

- Sunon KDE1212PMV1: DC12V 8.4w 12cm 120*120*38MM maglev 4 fios PWM ventilador de chassi de alto vento, 0,25 kg, R\$ 91,79/un, 1 unidade
- Duto Flexível Corrugado: 3" Preto 50 Metros Com Guia Kanaflex, 3 m, 1,50 kg, R\$ 54,17/m(referente aos itens 16 e 17)

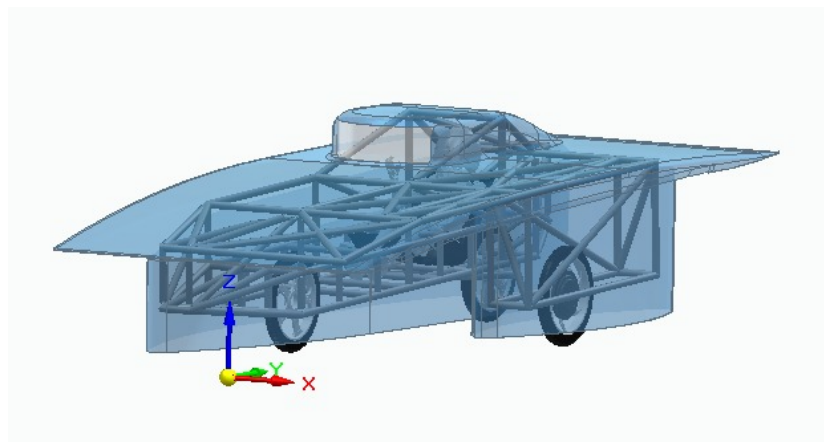
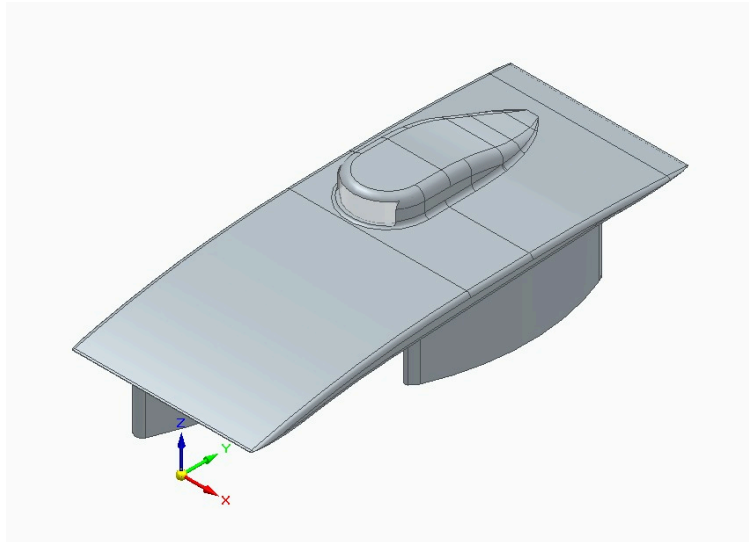
CÁLCULO DE PARÂMETROS

18) Massa Total (kg)

- 242.79

19) Coef. de Arrasto (Cd)

- Cd = 0.27



20) Crr base:

- Crr = entre 0,0078 e 0,009 (Dinâmico)

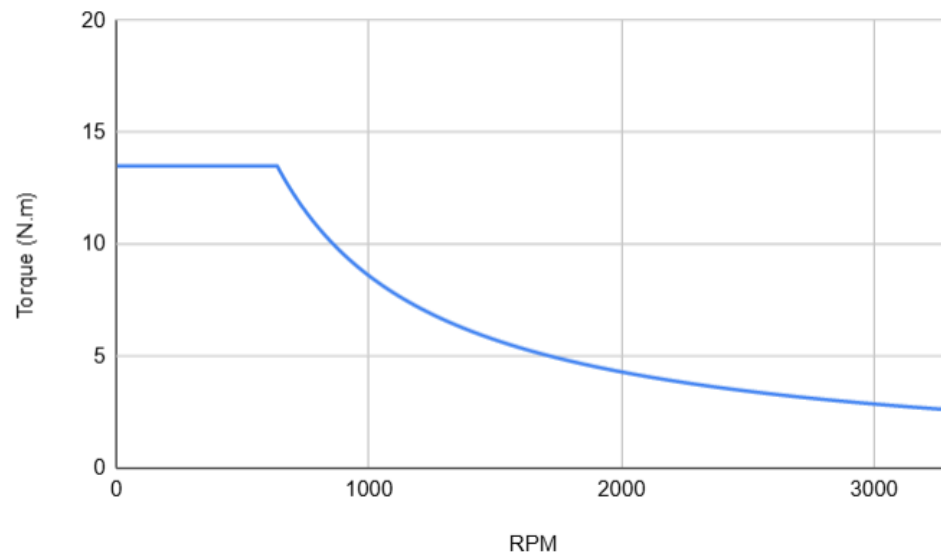
21) Área Frontal: 2,2m²

22) Capacidade da Bateria:

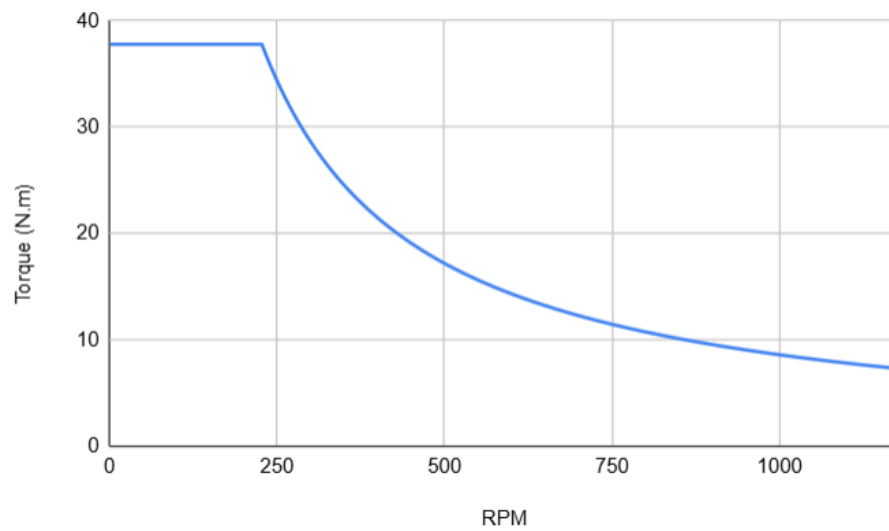
- 3.05 kWh (limite: 3.056 kWh)

23) Curva de potência do motor elétrico

Torque x RPM - Sem redução

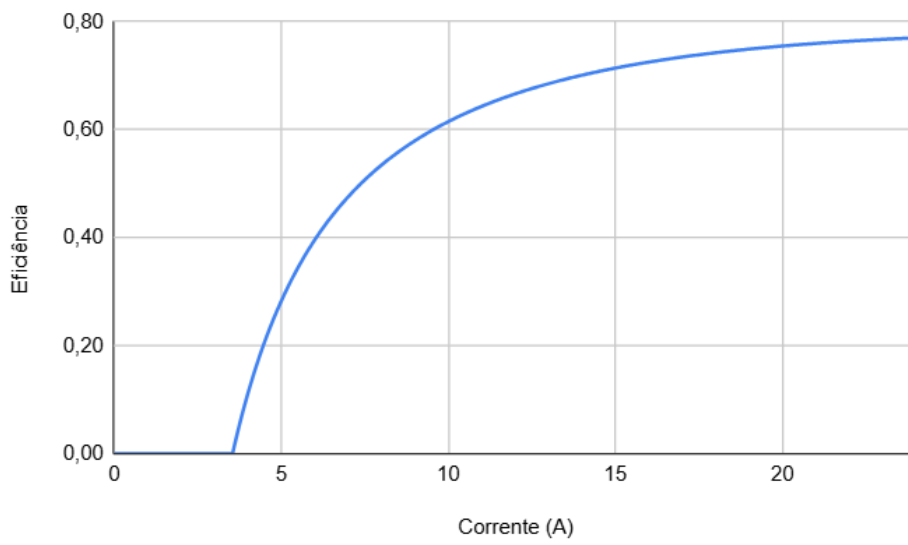


Torque x RPM - Após redução

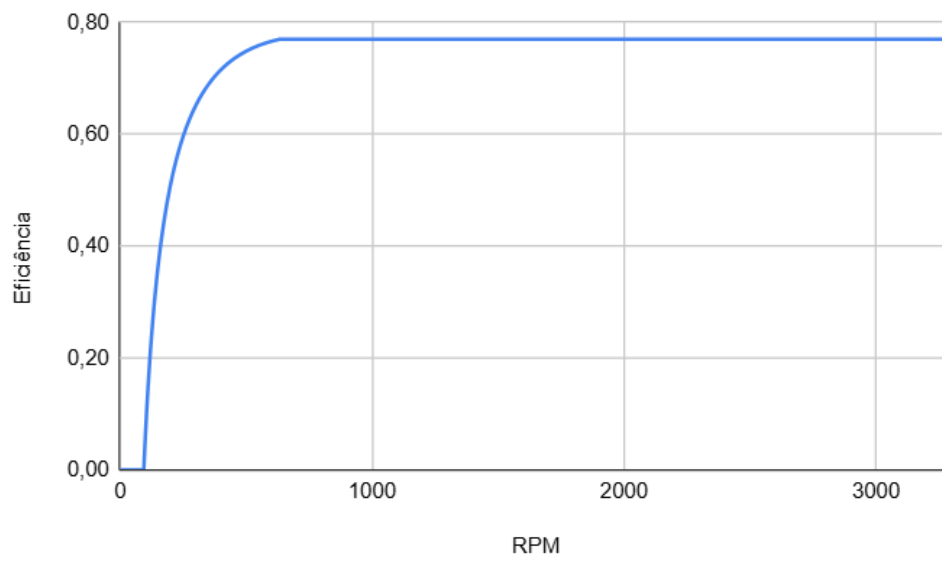


24) Curva de eficiência do motor

Eficiência x Corrente



Eficiência x RPM



Potência x RPM



25) Custo total de material em reais

- R\$ 169.519,38

SIMULAÇÃO E ANÁLISE

26) Simulação temperatura freio

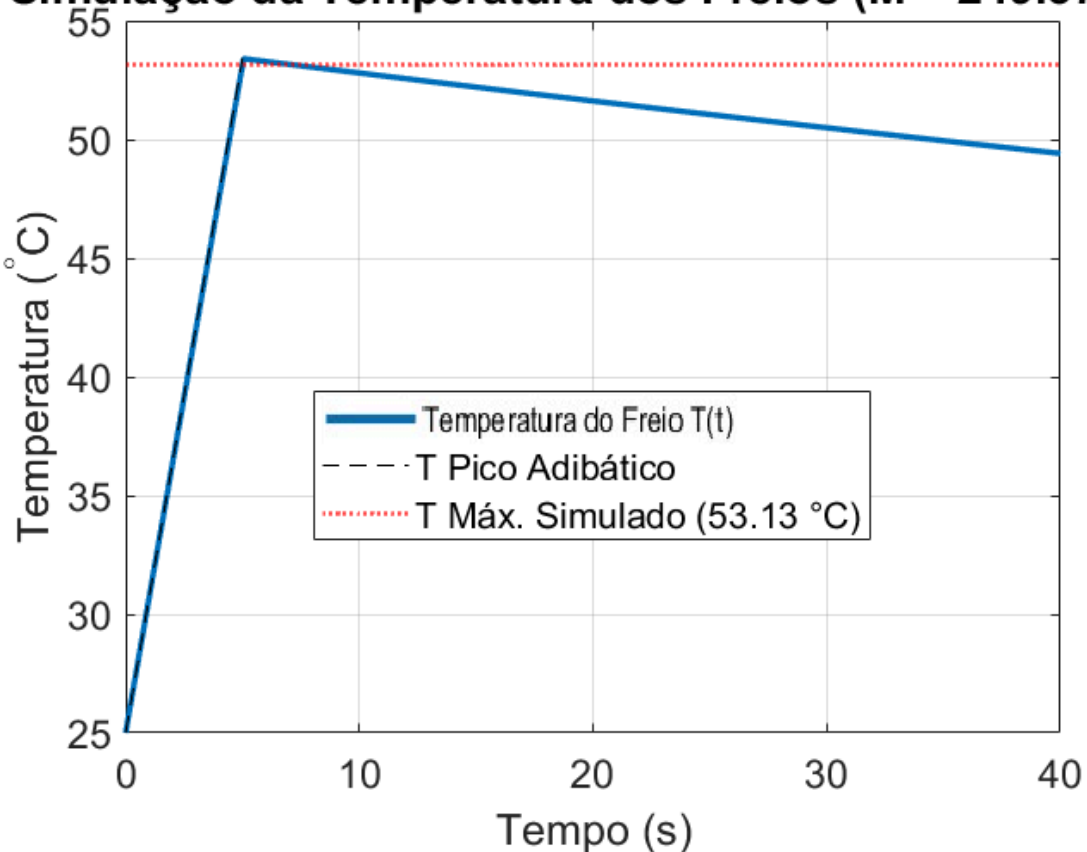
Simulação da temperatura dos freios numa frenagem onde a velocidade varia de 30 m/s para 10 m/s em 5 segundos. Assumir temperatura inicial igual a 25 °C.

A simulação demonstra que, com o sistema de freios de Ferro Fundido parametrizado (6,0 kg de massa e 0,13 m² de área de dissipação), a temperatura máxima alcançada é de aproximadamente 53,13°C.

Segurança Térmica: O resultado atesta uma segurança térmica muito alta, operando muito abaixo do ponto de falha do Ferro Fundido (> 400°C).

Otimização de Peso: O sistema é superdimensionado em termos de massa. A próxima fase do projeto deve focar na redução de massa dos freios, explorando o Carbono-Cerâmica (CFC) para maximizar a competitividade.

Simulação da Temperatura dos Freios (M = 249.37 kg)



27) Simular a temperatura nos fios de alimentação do motor na potência máxima do motor.

Considerando uma eficiência de 78% do motor conseguimos a potência de entrada:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \Rightarrow P_{in} = 1153,85 \text{ W}$$

Dessa forma, a corrente elétrica circulando no fio com o motor trabalhando em potência máxima é de:

$$I = 24 \text{ A}$$

Para o fio de cobre estanhado escolhido, a resistência térmica é de $0,78 \text{ m}\Omega/\text{m}$, portanto a perda de calor no fio é de:

$$Q_{perda} = I^2 R_{fio} \Rightarrow Q_{perda} \approx 0,449 \text{ W/m}$$

Então, considerando a dissipação por convecção sendo a mais significativa temos:

$$Q_{perda} = h \cdot A_s (T_{fio} - T_{amb})$$

$$T_{fio} = T_{amb} + \frac{Q_{perda}}{h \cdot A_s}$$

$$T_{fio} \approx 26,35^\circ\text{C}$$

28) Alcance Máximo Diário (c/ 30% bat.):

- 604.51 km (Bateria final: 31.2%)

29) Autonomia a 60 km/h (sem sol):

- 333.0 km (5.55 horas)

Calculada para essa velocidade pois ela oferece um patamar de confiabilidade em relação ao equilíbrio ou próximo dele das forças de rolamento e aerodinâmica.

30) Velocidade Máxima (Plano):

- 95 km/h (26,38 m/s)

31) Tempo p/ 3000km:

- 5 dias e 6.0 horas

32) Perfil de Velocidade Otimizado (km/h):

08-09 h: 69.1 km/h
 09-10 h: 65.7 km/h
 10-11 h: 66.6 km/h
 11-12 h: 68.0 km/h
 12-13 h: 66.2 km/h
 13-14 h: 67.4 km/h
 14-15 h: 69.2 km/h
 15-16 h: 65.0 km/h
 16-17 h: 67.2 km/h

33) Simulação temperatura da bateria ao longo do dia

Para simular a temperatura na bateria assumimos uma variação de temperatura máxima de 5°C o seguinte modelo:

$$T(t) = T_{amb} + \Delta T_{max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Sendo a constante de tempo:

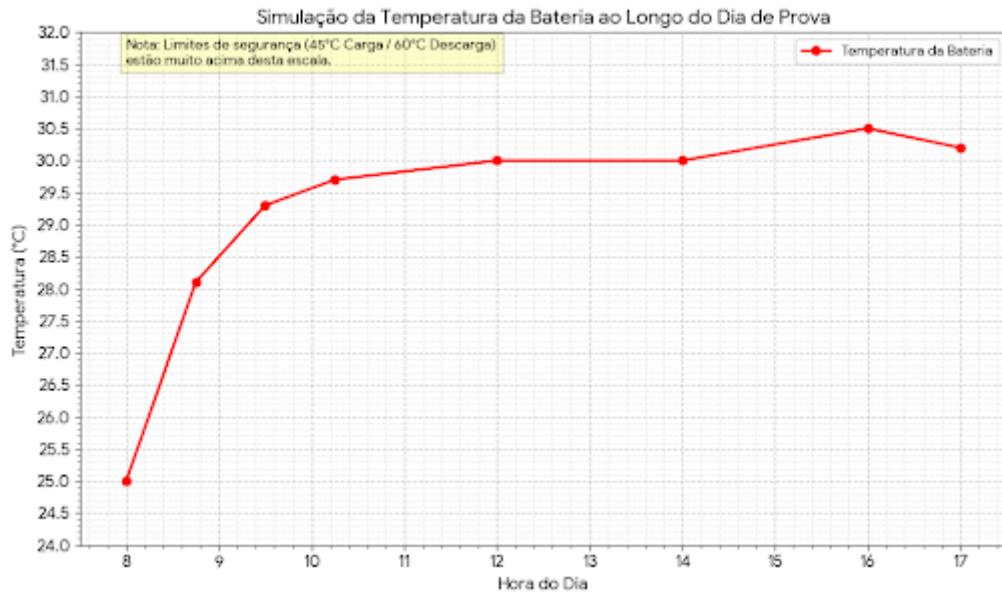
$$\tau = \frac{C_{th}}{UA}$$

Com:

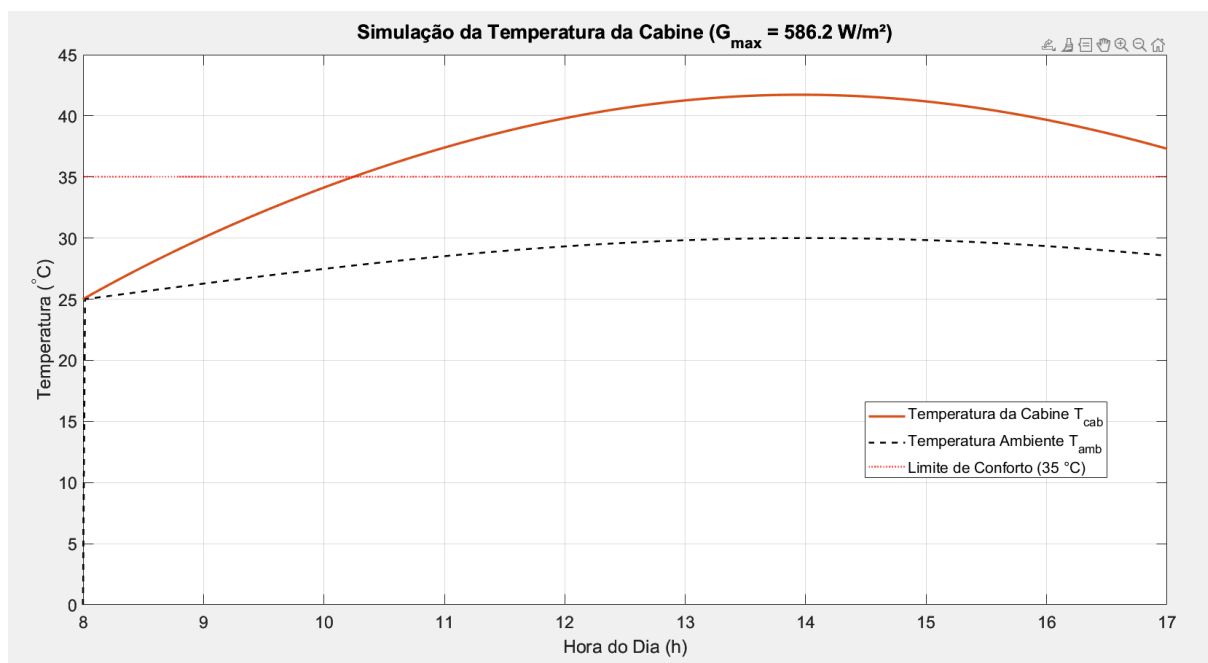
$$C_{th} = m \cdot C_p = 14 \cdot 1044 \Rightarrow C_{th} = 14,6 \text{ kJ/K}$$

$$UA = h \cdot A = 15 \cdot 038 \Rightarrow 5,7 \text{ W/K}$$

Portanto, ao longo do dia de prova, a temperatura da bateria apresenta o seguinte comportamento:



34) Simulação temperatura do ar da cabine ao longo do dia



35) Consumo energético do motor instantâneo(W):

08-09 h: 766.5 W

09-10 h: 683.3 W

10-11 h: 704.5 W
11-12 h: 741.0 W
12-13 h: 696.9 W
13-14 h: 725.5 W
14-15 h: 773.0 W
15-16 h: 667.3 W
16-17 h: 716.7 W

Referências de Componentes e Fontes Web

- **3M BRASIL.** *Película de Vinil para Envelopamento 3M™ Série 2080-GP240 – Ouro Branco Brilhante, 22,86 m x 1,52 m, 1 Rolo/Caixa.* Disponível em: https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/p/dc/v101544383/. Acesso em: 19 nov. 2025.
- **ALIEXPRESS.** *Para Sunon KDE1212PMV1 DC12V 8.4w 12cm 120*120*38MM maglev 4 fios PWM ventilador de chassi de alto vento.* Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005008863797020.html?src=bing&aff_short_key=UneMJZVf&aff_platform=true&isdl=y&albch=shopping&acnt=135095331&isdl=y&albc=555299859&albag=1302922464747639&slnk=&trgt=pla-4585032216086001&plac=&crea=81432712558136&netw=o&device=c&mtctp=e&utm_source=Bing&utm_medium=shopping&utm_campaign=PA_Bing_BR_PLA_PC%2FM_3C_MaxValue_20250212&utm_content=3C&utm_term=sunon%20maglev%2012v%20pwm&msclkid=9369b5403773187c0a73dc6f365d07b4&gatewayAdapt=glo2bra. Acesso em: 13 nov. 2025.
- **EKIPAR.** *PELICULA AUTOMOTIVA 3M - LINHA CRYSTALLINE 90 (PARABRISAS) - Ekipar - Sua maior loja de acessórios automotivos em Belo Horizonte.* Disponível em: <https://e-ekipar.lojaintegrada.com.br/pelicula-crystalline-90-3m>. Acesso em: 19 nov. 2025.
- **E-COMPOSITES.** *Compósitos e Resinas.* Disponível em: <https://www.e-composites.com.br>. Acesso em: 04 nov. 2025.
- **FIBRAER.** *Tubo 4130 Aço Red 1" x 1".* Disponível em: <https://www.fibraer.com.br/tubo-4130-aco-red-1-x-1>. Acesso em: 04 nov. 2025.
- **INPE - LABREN.** *Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2017 - Estado de São Paulo.* Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_SP.html. Acesso em: 13 nov. 2025.
- **LOJA AGROMETAL.** *Placa De Policarbonato Cristal 3mm Vick.* Disponível em: <https://www.lojaagrometal.com.br/produto/placa-de-policarbonato-cristal-3mm-vick-91423>. Acesso em: 19 nov. 2025.
- **LOJA ELÉTRICA.** *Duto Flexível Corrugado 3" Preto 50 Metros Com Guia Kanaflex.* Disponível em: <https://www.lojaeletrica.com.br/duto-flexivel-corrugado-3-preto-50-metros-com-guia-kanaflex.html>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- **MAGAZINE LUIZA.** *Kit Relação Transmissão Nakata Honda CB 300R 2009-2015.* Disponível em: https://www.magazineluiza.com.br/kit-relacao-transmissao-nakata-honda-cb-300r-2009-2015/p/fc0ga1aj8h/au/kire/?&seller_id=autorama2&utm_source=google&utm_medium=cpc..... Acesso em: 13 nov. 2025.

- **MERCADO LIVRE.** Ventilador Noctua Nf-a4x20 Pwm 40mm. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/ventilador-noctua-nf-a4x20-pwm-40mm/p/MLB2002438621>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- **MOTORS MANUFACTURER.** 2-18 900W 3700 RPM Drive Motor PMDC Brushless Motor TF110AH1. Disponível em: <http://motors-manufacturer.com.br/2-18-900w-3700-rpm-drive-motor-pmdc-brushless-motor-tf110ah1.html>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- **MOUSER ELECTRONICS.** Delta Electronics PFB0812UHE-EP. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Delta-Electronics/PFB0812UHE-EP?qs=%2FW4LtXOBxKvyeFvihDTi%252BQ%3D%3D>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- **SOFTSPUMA.** Espuma Filtral. Disponível em: <https://www.softspuma.com.br/espuma-filtral>. Acesso em: 13 nov. 2025.

Referências Bibliográficas

I. Transferência de Calor, Massa e Termodinâmica

1. ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. *Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática*. 5. ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill Brasil, 2012.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 4: Análise de Sistemas com Capacitância Global (para a EDO de Freios e Cabine).
 - Capítulos 6 e 7: Convecção Externa e Interna (para o cálculo do coeficiente “h” e resfriamento).
2. INCROPERA, Frank P. et al. *Fundamentos da Transmissão de Calor e Massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 5: Análise de Sistemas de Capacitância Global.
 - Capítulo 8: Convecção Externa (Arrasto Térmico).
3. ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinâmica*. 7. ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill Brasil, 2013.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 2: Energia, Transferência de Energia e Análise Geral de Energia (base para Delta E_c e Calor Sensível Q=mC\Delta T).

II. Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica

4. ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill Brasil, 2017.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 11: Escoamento Externo: Arrasto e Sustentação (para a Força de Arrasto F_{ad}).

- Seção de Escoamento sobre Placas Planas: Fórmulas de Atrito por Camada Limite (para C_f e Re).
- 5. FOX, Robert W. et al. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 7: Análise Dimensional e Semelhança (para o Número de Reynolds Re).
 - Capítulo 9: Escoamento sobre Corpos Imersos (para o Coeficiente de Arrasto C_d).

III. Resistência dos Materiais e Dinâmica Veicular

- 6. HIBBELER, Russell C. *Resistência dos Materiais*. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 13: Colunas e Flambagem (para a Carga Crítica de Euler P_{cr}).
 - Apêndice/Seção Introdutória: Propriedades de Seções (para o Momento de Inércia I).
- 7. GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers (SAE), 1992.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 2: Resistência ao Movimento (para a Força de Rolamento F_{rr}).
 - Capítulos 6 e 7: Suspensão e Sistemas de Direção (para as fórmulas de rigidez, K_{roda} e f_n).

IV. Eletricidade, Eletrônica e Modelos Específicos

- 8. DORF, Richard C.; TALLARIDA, Ronald J. *Circuitos Elétricos: Teoria e Aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
 - Tópicos Relevantes:
 - Capítulo 2: Leis Básicas (para a Lei de Ohm e Potência Elétrica, $Q_{perda} = I^2 R_{fio}$).
- 9. DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
 - Tópicos Relevantes:
 - Seções de Modelagem de Painéis PV: (Para o modelo NOCT e cálculo da $T_{célula}$ e n_{painel}).

V. Pneus e Rodas

- 10. GENT, Alan N.; WALTER, J. D. *The Pneumatic Tire*. Washington, D.C.: NHTSA/U.S. Department of Transportation, 2006.
 - Tópicos Relevantes:
 - Detalhamento sobre a Física do Pneu e a interação com o solo, fundamentando a escolha do pneu e o modelo de Resistência ao Rolamento (C_{rr}).

