

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**JOÃO ANTÔNIO CARDOSO**

**MODELAGEM E PARAMETRIZAÇÃO DE UMA  
EMBARCAÇÃO MOVIDA A ENERGIA SOLAR**

**Florianópolis, 2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**JOÃO ANTÔNIO CARDOSO**

**MODELAGEM E PARAMETRIZAÇÃO DE UMA  
EMBARCAÇÃO MOVIDA A ENERGIA SOLAR**

Trabalho de conclusão de curso submetido  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
engenheiro eletrônico

Orientador:  
Prof. Dr. Flávio Alberto Bardemaker Batista

**Florianópolis, 2026**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Cardoso, João Antônio

**Modelagem e parametrização de uma embarcação movida a energia solar / João Antônio Cardoso; orientação de Flávio Alberto Bardemaker Batista.** - Florianópolis, SC, 2026.  
330 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica.**  
Inclui Referências.

1. **Embarcações movidas a energia solar.** 2. Modelagem matemática. 3. Sistemas de propulsão marítima. 4. Eficiência energética. 5. Identificação de sistemas. I. Batista, Flávio Alberto Bardemaker. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Modelagem e parametrização de uma embarcação movida a energia solar.

# MODELAGEM E PARAMETRIZAÇÃO DE UMA EMBARCAÇÃO MOVIDA A ENERGIA SOLAR

**JOÃO ANTÔNIO CARDOSO**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletrônico em fevereiro de 2026 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência, e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de fevereiro, 2026.

Banca Examinadora:

---

Flávio Alberto Bardemaker Batista, Dr.

---

Mauro Tavares Peraça, Dr.

---

Pedro Giassi Junior, Dr.

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que carregam em seu coração  
o desejo sincero de um mundo leve, justo e sustentável.*

## **AGRADECIMENTOS**

Sem uma ordem específica, registro aqui meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para a formação da pessoa que sou e, em particular, àqueles que auxiliaram diretamente na realização deste trabalho.

À minha família e às pessoas do coração, pelo apoio, carinho, e atenção constantes, pelo incentivo, e por todo o auxílio nos momentos mais necessários.

Aos professores, que levam o conhecimento para além das salas de aula, cobram posturas, questionam, instigam, e investem seu tempo para permitir que projetos como este existam e naveguem, mesmo em tempos difíceis.

Aos técnicos de laboratório, que há anos dedicam parte de seu tempo ao apoio à equipe nas mais diversas situações.

Aos membros da equipe Zênite Solar, que trabalharam arduamente nos sistemas em 2019, contribuindo diretamente para este trabalho: Alejo Perdomo Milar, Aquilles Pedro Grisa Santana, Gabriel Günther Centeno, Gabriel Vieira, Guilherme Camargo Valese, Gustavo Strelow, João Pedro Tonelo, Lukas Ristow, Marcos José Moraes, Patrícia Mônica Campos Mayer Vicente, Paulo de Souza, e Vinicius Cardoso.

A todos os professores que contribuíram diretamente para o projeto, em especial: Flávio Alberto Bardemaker Batista, Humberto Reder Cazangi, André Fuerback e Mauro Tavares Peraça.

A todos os membros anteriores da equipe, com menção especial a: André Dzis Giacomini, Arturo Manzoli, Bruno Tomasi, Cesar Dias Parente, Flavio de Faveri, Gleidson Santos, Guilherme Goulart da Silva, Marcio Antônio Augusto, Rafael Levien, Rodolfo Levien, Roger Schemes, e Thiago Schmitz.

A todos os desenvolvedores e mantenedores das bibliotecas Pymoo, Vaex, Python Control, SALib, MeshMagick, e PVLlib, em especial a Pamphile T. Roy, um dos desenvolvedores, e mantenedores da biblioteca Python SALib, pelos esclarecimentos, e discussões sobre análise de sensibilidade, e a Richard Murray, um dos desenvolvedores e mantenedores da biblioteca Python Control, por esclarecer dúvidas, corrigir problemas, e viabilizar contribuições de forma ágil.

A Tim Gorter, pelo trabalho desenvolvido, que indiretamente contribuiu para que este trabalho fosse concebido como possível.

Aos organizadores do Desafio Solar Brasil.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência, e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), pelo apoio institucional, fornecendo espaço físico, e outros recursos que possibilitam à equipe realizar pesquisa, desenvolvimento e participação em competições.

## RESUMO

A busca pela descarbonização no setor de transportes tem acelerado o desenvolvimento de alternativas marítimas de baixo carbono, com destaque para as embarcações movidas a energia solar. Nesse contexto, o projeto eficaz e a tomada de decisão estratégica exigem a quantificação precisa das interações entre geração, armazenamento e propulsão sob condições ambientais variáveis e restrições de potência. Este estudo apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático simulável e atualizável, construído a partir de logs de telemetria de diversos sistemas, e passível de reparametrização e de alterações nos modelos com novos dados ao longo dos anos, utilizando a irradiância incidente e o ciclo-tarefa do controlador eletrônico de velocidade (ESC) para subsidiar decisões estratégicas tanto na fase de projeto quanto em competições. A metodologia abrange um fluxo de dados completo — desde a decodificação de protocolos de camada de aplicação, organização de sinais e reamostragem em séries temporais sincronizadas — para viabilizar a construção de modelos de subsistemas de baixa fidelidade e sua integração em um modelo unificado. Os parâmetros do modelo foram estabelecidos por meio de testes experimentais, especificações de fabricantes e dados de terceiros, sendo posteriormente refinados via otimização em múltiplas etapas. Análises de sensibilidade quantificaram o impacto das incertezas e orientaram a seleção de parâmetros. A validação em relação a medições experimentais e verificações de consistência física, como o fechamento do balanço de potência, atingiu coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de até 0,95 para a tensão da bateria e até 0,96 para a velocidade angular do motor. Além de prever indicadores-chave de desempenho, como o consumo energético específico (Wh/km) e a velocidade máxima, o modelo estima sinais internos não medidos para identificar regimes de operação dos subsistemas. A utilidade prática do modelo foi demonstrada em um estudo de caso que otimizou a configuração hélice-transmissão, aumentando o desempenho tanto em provas de longa duração (priorizando eficiência) quanto em provas de curta duração (priorizando velocidade). Em comparação à configuração de referência, o consumo energético específico foi reduzido de 65,05 para 62,85 Wh/km, e a velocidade máxima aumentou de 18,00 para 21,07 km/h. As limitações atuais incluem desafios de identificabilidade de parâmetros devido à instrumentação limitada e a exclusão de fatores ambientais como vento, ondas e correntes, o que restringe a aplicabilidade do modelo a cenários controlados.

**Palavras-chave:** Embarcações movidas a energia solar, Modelagem matemática, Sistemas de propulsão marítima, Eficiência energética, Identificação de sistemas.

## ABSTRACT

The pursuit of decarbonization in the transport sector has accelerated the development of low-carbon maritime alternatives, particularly solar-powered vessels. In this context, effective design and strategic decision-making require precise quantification of the interactions among energy generation, storage, and propulsion under varying environmental conditions and power constraints. This study introduces a simulation-based, updatable mathematical model developed from multi-system telemetry logs, designed to support both parameter re-estimation and model updates as new data become available over the years, employing incident irradiance and electronic speed controller (ESC) duty cycles to inform strategic decisions during both the design phase and competitive racing. The methodology incorporates a comprehensive data pipeline—from decoding application-layer protocols, organizing signals, and resampling data into synchronized time series—to enable the construction of low-fidelity subsystem models and their integration into a unified model, whose parameters were established through experimental testing, manufacturer specifications, and third-party data, and subsequently refined through multi-stage optimization. Sensitivity analyses quantified the impact of uncertainties and informed parameter selection. Validation against experimental measurements and physical consistency checks, such as power-balance closure, achieved coefficients of determination ( $R^2$ ) of up to 0.95 for battery voltage and up to 0.96 for motor angular speed. Beyond predicting key performance indicators such as specific energy consumption (Wh/km) and maximum speed, the model estimates unmeasured internal signals to identify subsystem operating regimes. The model's practical utility was demonstrated in a case study that optimized the propeller-gearbox configuration, enhancing performance for both long-endurance events (prioritizing efficiency) and sprint events (prioritizing speed). Compared to the reference configuration, specific energy consumption decreased from 65.05 to 62.85 Wh/km, and top speed increased from 18.00 to 21.07 km/h. Current limitations include parameter identifiability challenges due to limited instrumentation and the exclusion of environmental factors such as wind, waves, and currents, which limit the model's applicability to controlled scenarios.

**Keywords:** Solar-powered vessels, Mathematical modeling, Marine propulsion systems, Energy efficiency, System identification.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de visao geral do funcionamento de uma embarcacao solar	34
Figura 2 – Embarcacao solar ancorada em aguas calmas durante condicao de operacao estatica e recarga . . . . .	45
Figura 3 – Embarcação em diferentes regimes de operação . . . . .	46
Figura 4 – Desenho técnico do casco . . . . .	47
Figura 5 – Compartimento das baterias . . . . .	48
Figura 6 – Compartimento do motor de propulsao . . . . .	49
Figura 7 – Conjunto de transmissão mecânica e hélice . . . . .	50
Figura 8 – Compartimento do sistema elétrico . . . . .	51
Figura 9 – Rede CAN distribuída na embarcação . . . . .	52
Figura 10 – Módulos CAN em Teste . . . . .	52
Figura 11 – Módulos CAN Desmontados . . . . .	53
Figura 12 – Módulos CAN Montados . . . . .	54
Figura 13 – MSWI19 . . . . .	60
Figura 14 – Fluxograma da metodologia adotada no trabalho . . . . .	66
Figura 15 – Diagrama do Protocolo de Aplicação . . . . .	74
Figura 16 – Quadro CAN e dados na camada de aplicação . . . . .	74
Figura 17 – Diagrama do gerador dos <i>parsers</i> . . . . .	76
Figura 18 – Diagrama da <i>pipeline</i> de transformação dos dados . . . . .	77
Figura 19 – Diagrama do <i>Parser</i> . . . . .	78
Figura 20 – Diagrama do <i>Resampler</i> . . . . .	80
Figura 21 – Taxas de envio e de mudança dos sinais principais . . . . .	82
Figura 22 – Comparação entre diferentes frequências de corte para o filtro do sinal de RPM do motor . . . . .	82
Figura 23 – Comparação entre diferentes períodos de reamostragem . . . . .	83
Figura 24 – Comparação entre diferentes períodos de reamostragem . . . . .	84
Figura 25 – Comparação entre diferentes períodos de reamostragem . . . . .	85
Figura 26 – Verificação de alinhamento após união com dados climáticos . . . . .	86
Figura 27 – Presença dos módulos no tempo . . . . .	87
Figura 28 – My Ocean Pro — densidade . . . . .	90
Figura 29 – My Ocean Pro — salinidade . . . . .	90
Figura 30 – Water Properties Calculator . . . . .	91
Figura 31 – Localização dos sinais medidos . . . . .	93
Figura 32 – Dinâmica das correntes com a embarcação em operação . . . . .	94
Figura 33 – Reconstrução do sinal de ciclo de trabalho ( <i>duty-cycle</i> ) do MAM . . . . .	95
Figura 34 – Reconstrução do sinal de ciclo de trabalho ( <i>duty-cycle</i> ) do MAM . . . . .	96

Figura 35 – Reconstrução do sinal corrompido de ciclo de trabalho ( <i>duty-cycle</i> ) do MAM . . . . .	96
Figura 36 – Medições da tensão do banco de baterias de diferentes fontes . . . . .	98
Figura 37 – Sinais da geração . . . . .	100
Figura 38 – Sinais da bateria . . . . .	101
Figura 39 – Sinais da propulsão . . . . .	101
Figura 40 – Esquemático do modelo de circuito equivalente de segunda ordem para uma bateria . . . . .	112
Figura 41 – Diagrama de blocos do modelo completo da embarcação solar . . . . .	120
Figura 42 – Curva de eficiência do MPPT . . . . .	133
Figura 43 – Índices de Sobol para a saída mppt_i_out em regime permanente . . . . .	136
Figura 44 – Índices de Sobol para a saída mppt_i_in em regime permanente . . . . .	137
Figura 45 – Índices de Sobol para a saída mppt_v_in em regime permanente . . . . .	138
Figura 46 – Evolução dos parâmetros ótimos do modelo PVs+MPPTs a cada geração . . . . .	139
Figura 47 – Evolução do erro de otimização do modelo da Geração . . . . .	140
Figura 48 – Comparação do sinal mppt_i_in do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	141
Figura 49 – Comparação do sinal mppt_v_in do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	142
Figura 50 – Regressão polinomial . . . . .	143
Figura 51 – Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção D23 . . . . .	146
Figura 52 – Evolução dos parâmetros ótimos do modelo do ESC a cada geração . . . . .	149
Figura 53 – Evolução do erro de otimização do modelo do ESC . . . . .	150
Figura 54 – Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	151
Figura 55 – Comparação do sinal esc_v_out do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	152
Figura 56 – Comparação do sinal esc_eta do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	153
Figura 57 – Mapa de eficiência do ESC . . . . .	154
Figura 58 – Evolução dos parâmetros ótimos do motor a cada geração . . . . .	157
Figura 59 – Evolução do erro de otimização do motor . . . . .	158
Figura 60 – Comparação do sinal motor_i do modelo otimizado com o dado . . . . .	159
Figura 61 – Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com o dado . . . . .	160
Figura 62 – Teste de degrau de tensão no motor . . . . .	161
Figura 63 – Evolução dos parâmetros ótimos do motor a cada geração . . . . .	162
Figura 64 – Evolução do erro de otimização do motor . . . . .	163

Figura 65 – Comparação do sinal motor_i do modelo otimizado com o dado . . .	164
Figura 66 – Mapa de eficiência do Motor . . . . .	165
Figura 67 – Contagem de dentes das engrenagens da transmissão . . . . .	166
Figura 68 – Renderização do casco em formato STL . . . . .	167
Figura 69 – Casco em equilíbrio para 293.7 [kg] em 1.99 [m] . . . . .	169
Figura 70 – Comparação do sinal esc_i_in do modelo estimado inicialmente com os dados de treino . . . . .	173
Figura 71 – Comparação do sinal hull_u do modelo estimado inicialmente com os dados de treino . . . . .	174
Figura 72 – Comparação do sinal motor_w do modelo estimado inicialmente com os dados de treino . . . . .	175
Figura 73 – Desempenho da hélice para estimativa inicial . . . . .	176
Figura 74 – Evolução do erro de otimização do modelo da Propulsão . . . . .	177
Figura 75 – Evolução dos parâmetros ótimos do modelo da Propulsão a cada geração . . . . .	178
Figura 76 – Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	179
Figura 77 – Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	180
Figura 78 – Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados de treino . . . . .	181
Figura 79 – Eficiência do sistema propulsivo decomposta . . . . .	182
Figura 80 – Curva clássica de desempenho da hélice em água livre ( <i>open-water</i> )	188
Figura 81 – Empuxo e resistência em função da velocidade . . . . .	189
Figura 82 – Variáveis do ponto de operação do motor em função da potência . .	190
Figura 83 – Mapa de eficiência do motor . . . . .	191
Figura 84 – Mapa de eficiência da hélice em água livre ( <i>open-water</i> ) . . . . .	191
Figura 85 – Pontos de operação em função do RPM da hélice . . . . .	192
Figura 86 – Eficiência do sistema em função da velocidade . . . . .	193
Figura 87 – Erro de fechamento do balanço de potência em função do comando de aceleração ( <i>throttle</i> ) . . . . .	193
Figura 88 – Potência elétrica em função da velocidade da embarcação . . . . .	194
Figura 89 – Consumo (Wh/km) em função da velocidade da embarcação . . . .	194
Figura 90 – Eficiência do sistema da embarcação solar em função do RPM da hélice . . . . .	195
Figura 91 – Eficiência do sistema da embarcação solar em função do comando de aceleração ( <i>throttle</i> ) . . . . .	196
Figura 92 – Comparação das soluções: velocidade máxima versus consumo (Wh/km) . . . . .	198

Figura 93 – Consumo (Wh/km) em função da velocidade (mediana por faixas) .	199
Figura 94 – Consumo (Wh/km) em função do comando de aceleração ( <i>throttle</i> ), mediana por faixas . . . . .	199
Figura 95 – Curva clássica de desempenho da hélice em água livre ( <i>open-water</i> )	200
Figura 96 – Comparação do sinal <i>mppt_i_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção A . . . . .	215
Figura 97 – Comparação do sinal <i>mppt_v_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção A . . . . .	216
Figura 98 – Comparação do sinal <i>mppt_i_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção B . . . . .	217
Figura 99 – Comparação do sinal <i>mppt_v_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção B . . . . .	218
Figura 100–Comparação do sinal <i>mppt_i_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção D . . . . .	219
Figura 101–Comparação do sinal <i>mppt_v_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção D . . . . .	220
Figura 102–Comparação do sinal <i>mppt_i_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção E . . . . .	221
Figura 103–Comparação do sinal <i>mppt_v_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção E . . . . .	222
Figura 104–Comparação do sinal <i>mppt_i_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção F . . . . .	223
Figura 105–Comparação do sinal <i>mppt_v_in</i> do modelo otimizado com os dados da seção F . . . . .	224
Figura 106–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D . . . . .	226
Figura 107–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D12 . . . . .	227
Figura 108–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D24 . . . . .	228
Figura 109–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D34 . . . . .	229
Figura 110–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D46 . . . . .	230
Figura 111–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D45 . . . . .	231
Figura 112–Comparação do sinal <i>batt_v</i> do modelo otimizado com os dados da seção D56 . . . . .	232

Figura 113–Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção E . . . . .	233
Figura 114–Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção E12 . . . . .	234
Figura 115–Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção E23 . . . . .	235
Figura 116–Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção F1 . . . . .	236
Figura 117–Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção F2 . . . . .	237
Figura 118–Comparação do sinal batt_v do modelo otimizado com os dados da seção F3 . . . . .	238
Figura 119–Distribuição dos valores para cada fator . . . . .	239
Figura 120–Índices de Sobol para a saída batt_v em regime permanente, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	242
Figura 121–Índices de Sobol para a saída batt_v em regime permanente, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	243
Figura 122–Esquema do modelo de bateria 1RC utilizado nos notebooks exploratórios. . . . .	244
Figura 123–Índices de Sobol para a saída batt_ocv durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	245
Figura 124–Índices de Sobol para a saída batt_v durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	246
Figura 125–Índices de Sobol para a saída batt_z durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	247
Figura 126–Índices de Sobol para a saída batt_ocv durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	248
Figura 127–Índices de Sobol para a saída batt_v durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	249
Figura 128–Índices de Sobol para a saída batt_z durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	250
Figura 129–Índices de Sobol para a saída batt_ocv em regime permanente, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	251
Figura 130–Índices de Sobol para a saída batt_z em regime permanente, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	252
Figura 131–Índices de Sobol para a saída batt_ocv em regime permanente, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	253
Figura 132–Índices de Sobol para a saída batt_z em regime permanente, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	254

Figura 133—Índices de Sobol para a saída batt_ocv durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	254
Figura 134—Índices de Sobol para a saída batt_v durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	255
Figura 135—Índices de Sobol para a saída batt_z durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras . . . . .	255
Figura 136—Índices de Sobol para a saída batt_ocv durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	256
Figura 137—Índices de Sobol para a saída batt_v durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	256
Figura 138—Índices de Sobol para a saída batt_z durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras . . . . .	257
Figura 139—Índices de Sobol para a saída motor_i em regime permanente . . .	260
Figura 140—Índices de Sobol para a saída motor_w em regime permanente . .	261
Figura 141—Índices de Sobol para a saída motor_i em regime permanente . . .	262
Figura 142—Índices de Sobol para a saída motor_w em regime permanente . .	263
Figura 143—Distribuição dos valores para cada fator . . . . .	266
Figura 144—Índices de Sobol para a saída motor_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	267
Figura 145—Índices de Sobol para a saída motor_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	268
Figura 146—Índices de Sobol para a saída motor_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	268
Figura 147—Índices de Sobol para a saída motor_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	269
Figura 148—Índices de Sobol para a saída motor_i em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	269
Figura 149—Índices de Sobol para a saída motor_w em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	270
Figura 150—Índices de Sobol para a saída motor_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	271
Figura 151—Índices de Sobol para a saída motor_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	272
Figura 152—Índices de Sobol para a saída motor_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	272
Figura 153—Índices de Sobol para a saída motor_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	273
Figura 154—Índices de Sobol para a saída motor_i em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	273

Figura 155–Índices de Sobol para a saída motor_w em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras . . . . .	274
Figura 156–Dados do fabricante - Eficiência para diferentes tensões . . . . .	275
Figura 157–Comparação do sinal motor_eta do modelo otimizado com o dado .	276
Figura 158–Comparação do sinal motor_p_in do modelo otimizado com o dado	277
Figura 159–Comparação do sinal motor_p_out do modelo otimizado com o dado	278
Figura 160–Modelo - Eficiência para diferentes tensões . . . . .	278
Figura 161–Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 1 [m] . . . . .	279
Figura 162–Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 2 [m] . . . . .	279
Figura 163–Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 3 [m] . . . . .	280
Figura 164–Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 4 [m] . . . . .	280
Figura 165–Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 1 [m] . . . . .	280
Figura 166–Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 2 [m] . . . . .	281
Figura 167–Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 3 [m] . . . . .	281
Figura 168–Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 4 [m] . . . . .	281
Figura 169–Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 1 [m] . . . . .	282
Figura 170–Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 2 [m] . . . . .	282
Figura 171–Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 3 [m] . . . . .	282
Figura 172–Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 4 [m] . . . . .	283
Figura 173–Captura de tela 1 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma . . . . .	285
Figura 174–Captura de tela 2 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma . . . . .	286
Figura 175–Captura de tela 3 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma . . . . .	287
Figura 176–Captura de tela 4 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma . . . . .	288
Figura 177–Captura de tela 5 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma . . . . .	289
Figura 178–Índices de Sobol para a saída esc_i_in em regime permanente . . .	293
Figura 179–Índices de Sobol para a saída hull_u em regime permanente . . . .	294
Figura 180–Índices de Sobol para a saída motor_w em regime permanente . . .	295
Figura 181–Conjunto de dados da embarcação durante o DSB de 2019 . . . . .	297
Figura 182–Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados da seção D . . . . .	298
Figura 183–Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados da seção E . . . . .	299
Figura 184–Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados da seção F1 . . . . .	300

Figura 185–Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados da seção F2 . . . . .	301
Figura 186–Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados da seção F3 . . . . .	302
Figura 187–Comparação do sinal esc_i_in do modelo otimizado com os dados da seção F4 . . . . .	303
Figura 188–Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados da seção D . . . . .	304
Figura 189–Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados da seção E . . . . .	305
Figura 190–Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados da seção F1 . . . . .	306
Figura 191–Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados da seção F2 . . . . .	307
Figura 192–Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados da seção F3 . . . . .	308
Figura 193–Comparação do sinal hull_u do modelo otimizado com os dados da seção F4 . . . . .	309
Figura 194–Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados da seção D . . . . .	310
Figura 195–Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados da seção E . . . . .	311
Figura 196–Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados da seção F1 . . . . .	312
Figura 197–Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados da seção F2 . . . . .	313
Figura 198–Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados da seção F3 . . . . .	314
Figura 199–Comparação do sinal motor_w do modelo otimizado com os dados da seção F4 . . . . .	315
Figura 200–Desempenho da hélice . . . . .	316
Figura 201–Índices de Sobol para a saída hull_r_t em regime permanente . . .	317
Figura 202–Índices de Sobol para a saída motor_i em regime permanente . . .	318
Figura 203–Índices de Sobol para a saída motor_q_load em regime permanente	319
Figura 204–Índices de Sobol para a saída prop_j em regime permanente . . . .	320
Figura 205–Índices de Sobol para a saída prop_k_q em regime permanente . .	321
Figura 206–Índices de Sobol para a saída prop_k_t em regime permanente . .	322
Figura 207–Índices de Sobol para a saída prop_q em regime permanente . . .	323
Figura 208–Índices de Sobol para a saída prop_t em regime permanente . . . .	324

Figura 209—Índices de Sobol para a saída prop_t_e em regime permanente . . .	325
Figura 210—Índices de Sobol para a saída prop_w em regime permanente . . .	326

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	135
Tabela 2 – Métricas de avaliação do modelo da Geração . . . . .	140
Tabela 3 – Parâmetros PV e MPPT . . . . .	140
Tabela 4 – Métricas de avaliação do modelo da Bateria PNGV2 . . . . .	146
Tabela 5 – Parâmetros da bateria . . . . .	147
Tabela 6 – Parâmetros do ESC . . . . .	149
Tabela 7 – Parâmetros do motor . . . . .	160
Tabela 8 – Distribuição de massas na embarcação . . . . .	168
Tabela 9 – Parâmetros da hélice e do casco utilizados no modelo de propulsão	171
Tabela 10 – Métricas de avaliação do modelo da Propulsão . . . . .	177
Tabela 11 – Parâmetros da hélice e do casco utilizados no modelo de propulsão	179
Tabela 12 – Resumo de todos os parâmetros . . . . .	183
Tabela 12 – Resumo de todos os parâmetros . . . . .	184
Tabela 12 – Resumo de todos os parâmetros . . . . .	185
Tabela 13 – Resumo da aderência dos submodelos em dados de teste . . . . .	187
Tabela 14 – Indicadores de desempenho do modelo da embarcação solar . . . . .	194
Tabela 15 – Resumo comparativo das opções de hélice/transmissão . . . . .	198
Tabela 16 – SoC inicial otimizado por seção . . . . .	225
Tabela 17 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	240
Tabela 18 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	241
Tabela 19 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	258
Tabela 20 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	259
Tabela 21 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	264
Tabela 22 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	265
Tabela 23 – Índices de Sobol em regime permanente . . . . .	290
Tabela 24 – Seções utilizadas na parametrização da geração energética . . . . .	327
Tabela 25 – Seções utilizadas na parametrização da bateria . . . . .	328
Tabela 26 – Seções utilizadas na parametrização da propulsão . . . . .	329

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações da bateria . . . . .	49
Quadro 2 – Característica do MCB19 . . . . .	54
Quadro 3 – Mensagens CAN do MCB19 (MCB19_1 e MCB19_2) . . . . .	55
Quadro 4 – Mensagens CAN do MT19 . . . . .	56
Quadro 5 – Mensagens CAN do MAB19 . . . . .	56
Quadro 6 – Mensagens CAN do MCS19 . . . . .	57
Quadro 7 – Mensagens CAN do MIC19 . . . . .	58
Quadro 8 – Mensagens CAN do MSC19_1 a MSC19_3 . . . . .	59
Quadro 9 – Mensagens CAN do MSC19_4 e MSC19_5 . . . . .	59
Quadro 10 – Mensagens CAN do MVC19 (MVC19_1 e MVC19_2) . . . . .	59
Quadro 11 – Mensagens CAN do MSWI19 . . . . .	61
Quadro 12 – MCC19_1 a MCC19_4 . . . . .	62
Quadro 13 – Mensagens CAN do MAM19 (hardware MAM17) . . . . .	63
Quadro 14 – Descrição dos sinais . . . . .	99
Quadro 15 – Símbolos do modelo da hélice em água livre ( <i>open water</i> ) . . . . .	102
Quadro 16 – Símbolos do modelo longitudinal do casco . . . . .	104
Quadro 17 – Símbolos do acoplamento casco–hélice (esteira e dedução de empuxo)	105
Quadro 18 – Símbolos do modelo de transmissão (razão, eficiência, e reflexão de inércia) . . . . .	106
Quadro 19 – Símbolos do acoplamento entre transmissão e hélice . . . . .	107
Quadro 20 – Símbolos do modelo eletromecânico do motor . . . . .	108
Quadro 21 – Símbolos do acoplamento entre o motor e a transmissão . . . . .	109
Quadro 22 – Símbolos do modelo médio do ESC e de suas perdas . . . . .	110
Quadro 23 – Símbolos do acoplamento entre ESC e motor (modelo médio) . . .	111
Quadro 24 – Símbolos do modelo de bateria (circuito equivalente com dois ramos RC) . . . . .	112
Quadro 25 – Símbolos do acoplamento elétrico entre bateria e ESC . . . . .	113
Quadro 26 – Símbolos do modelo simplificado do MPPT (balanço de potência) .	114
Quadro 27 – Símbolos do acoplamento entre a saída do MPPT e o barramento da bateria . . . . .	115
Quadro 28 – Símbolos do modelo simplificado dos painéis fotovoltaicos . . . . .	115
Quadro 29 – Símbolos do acoplamento entre painel fotovoltaico e entrada do MPPT	116
Quadro 30 – Símbolos do modelo de cargas auxiliares (potência constante) . .	117
Quadro 31 – Balanço de correntes no barramento CC (bateria, MPPT, e cargas auxiliares) . . . . .	117
Quadro 32 – Símbolos utilizados na resolução explícita de correntes no barra- mento CC . . . . .	118

Quadro 33 – Símbolos da solução explícita para a tensão da bateria no barramento CC . . . . .	119
Quadro 34 – Parâmetros do modelo simples . . . . .	122
Quadro 35 – Entradas do modelo simples . . . . .	122
Quadro 36 – Estados do modelo simples . . . . .	122
Quadro 37 – Saídas do modelo simples . . . . .	123
Quadro 38 – Entradas do modelo completo . . . . .	125
Quadro 39 – Estados do modelo completo . . . . .	125
Quadro 40 – Agrupamento das saídas do modelo completo . . . . .	126
Quadro 41 – Entradas do modelo interno . . . . .	128
Quadro 42 – Estados do modelo interno . . . . .	128
Quadro 43 – Parâmetros estimados pré-otimização . . . . .	147

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> – Conversor analógico-digital
AE	Erro absoluto
AGM	<i>Absorbent Glass Mat</i> – Manta de fibra de vidro absorvente
API	<i>Application Programming Interface</i> – Interface de programação de aplicações
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> – Código padrão americano para intercâmbio de informação
CAN	Controller Area Network
CC	Corrente Contínua
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional
COG	<i>Center of Gravity</i> – Centro de gravidade
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> – Valores separados por vírgula
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i> – Irradiância difusa horizontal
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i> – Irradiância direta normal
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i> – Controle eletrônico de velocidade
ETL	<i>Extract, Transform, Load</i> – Extrair, transformar e carregar
FEM	Força eletromotriz
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i> – Irradiância global horizontal
GPS	<i>Global Positioning System</i> – Sistema de Posicionamento Global
GPX	<i>GPS Exchange Format</i> – Formato de intercâmbio GPS
HDF5	<i>Hierarchical Data Format 5</i> – Formato de dados hierárquico 5
IFSC	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i> – Notação de objetos JavaScript
LUT	<i>Look-up Table</i> – Tabela de consulta
MAB19	Módulo de Acionamento das Bombas de Porão (versão 2019)

MAM17	Módulo de Acionamento do Motor (versão 2017)
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i> – Erro percentual médio absoluto
MCB19	Módulo de Carregamento de Bateria (versão 2019)
MCC18	Módulo Controlador de Carga (versão 2018)
MCS19	Módulo Carregamento do Sistema (versão 2019)
MDE18	Módulo de Direção Elétrica (versão 2018)
MFP19	Módulo Fonte Principal (versão 2019)
MIC19	Módulo de Interface de Controle (versão 2019)
MOSFET	<i>metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i> – Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor
MRPC19	Módulo CAN para Raspberry Pi Zero (versão 2019)
MSC19	Módulo de Sensores CAN (versão 2019)
MSE	Erro quadrático médio
MSWI19	Módulo da Interface no Volante (versão 2019)
MT19	Módulo Tacômetro (versão 2019)
MVC19	Módulo de Voltímetro (Display) CAN (versão 2019)
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i> – Temperatura nominal de operação das células
NTP	<i>Network Time Protocol</i> – Protocolo de tempo em rede
OCV	<i>Open-Circuit Voltage</i> – Tensão de circuito aberto
ONU	Organização das Nações Unidas
PMDC	<i>Permanent Magnet Direct Current</i> – Motor de corrente contínua de ímã permanente
POA	<i>Plane-of-Array Irradiance</i> – Irradiância no plano do arranjo
PV	Fotovoltaico
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> – Modulação por largura de pulso
RAM	<i>Random Access Memory</i> – Memória de acesso aleatório

RMS	<i>Root Mean Square</i> – Valor quadrático médio
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> – Raiz do erro quadrático médio
RPM	Rotações por minuto
RTC	<i>Real-Time Clock</i> – Relógio de tempo real
SOC	<i>State of Charge</i> – Estado de carga
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> – Interface serial de periféricos
SSH	<i>Secure Shell</i> – Shell seguro
STC	<i>Standard Test Conditions</i> – Condições padrão de teste

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>28</b>
1.1	Justificativa	30
1.2	Definição do problema	31
1.3	Objetivo geral	31
1.4	Objetivos específicos	31
1.5	Estrutura do trabalho	32
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>33</b>
2.1	Embarcações solares	33
2.1.1	Competição de embarcações solares	34
2.2	Base mínima para interpretar o modelo	36
2.2.1	Casco: resistência ao avanço e potência efetiva	36
2.2.2	Hélice: coeficientes adimensionais e desempenho em água livre	36
2.3	Modelagem e simulação de embarcações solares: convergências e divergências na literatura	38
2.4	Identificação de parâmetros e calibração do sistema propulsivo	40
2.5	Otimização e análise de sensibilidade	40
2.5.1	Problemas de otimização e ajuste de parâmetros	40
2.5.2	Análise de sensibilidade global	41
2.5.3	Integração entre sensibilidade e calibração no fluxo metodológico	43
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DA EMBARCAÇÃO</b>	<b>44</b>
3.0.1	Casco	47
3.0.2	Painéis fotovoltaicos	47
3.0.3	Baterias	48
3.0.4	Motor	49
3.0.5	Transmissão e hélice	50
3.0.6	Sistema eletrônico	51
3.0.6.1	Rede de comunicação CAN	51
3.0.6.2	Módulos CAN	53
3.0.6.2.1	MCB19 - Módulo de Carregamento de Bateria (versão 2019)	54
3.0.6.2.2	MT19 - Módulo Tacômetro (versão 2019)	55
3.0.6.2.3	MRPC19 - Módulo CAN para Raspberry Pi Zero (versão 2019)	56
3.0.6.2.4	MAB19 (2x) - Módulo de Acionamento das Bombas de Porão (versão 2019)	56
3.0.6.2.5	MCS19 - Módulo Carregamento do Sistema (versão 2019)	56
3.0.6.2.6	MFP19 (2x) - Módulo Fonte Principal (versão 2019)	57
3.0.6.2.7	MIC19 - Módulo de Interface de Controle (versão 2019)	57

3.0.6.2.8	MSC19 (5x) - Módulo de Sensores CAN (versão 2019)	58
3.0.6.2.9	MVC19 (2x) - Módulo de Voltímetro (Display) CAN (versão 2019)	59
3.0.6.2.10	MSWI19 - Módulo da Interface no Volante (versão 2019)	60
3.0.6.2.11	MCC18 (4x) - Módulo Controlador de Carga (versão 2018)	61
3.0.6.2.12	MDE18 - Módulo de Direção Elétrica (versão 2018)	62
3.0.6.2.13	MAM17 - Módulo de Acionamento do Motor (versão 2017)	62
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>DADOS</b>	<b>68</b>
<b>5.1</b>	<b>Logs da embarcação</b>	<b>68</b>
5.1.1	Jornada de exploração	70
5.1.2	Interpretação dos <i>logs</i>	72
5.1.3	Interpretação do <i>payload</i> : camada de aplicação	73
5.1.4	Gerador dos parsers	75
5.1.5	Transformação dos dados	77
<b>5.2</b>	<b>Dados climáticos</b>	<b>88</b>
<b>5.3</b>	<b>Dados de geolocalização</b>	<b>89</b>
<b>5.4</b>	<b>Dados oceanográficos</b>	<b>89</b>
<b>5.5</b>	<b>Pós-processamento</b>	<b>91</b>
5.5.1	Reconstrução do <i>duty-cycle</i> do ESC	95
5.5.2	Reconstrução da tensão do banco de Baterias	97
5.5.3	Outros ajustes	98
5.5.4	Dados exportados	98
<b>5.6</b>	<b>Resumo dos dados pós-processados</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b>	<b>102</b>
<b>6.1</b>	<b>Hélice</b>	<b>102</b>
<b>6.2</b>	<b>Casco</b>	<b>103</b>
<b>6.3</b>	<b>Acoplamento entre casco e hélice</b>	<b>104</b>
<b>6.4</b>	<b>Transmissão</b>	<b>106</b>
<b>6.5</b>	<b>Acoplamento entre transmissão e hélice</b>	<b>106</b>
<b>6.6</b>	<b>Motor</b>	<b>107</b>
<b>6.7</b>	<b>Acoplamento entre motor e transmissão</b>	<b>108</b>
<b>6.8</b>	<b>ESC</b>	<b>109</b>
<b>6.9</b>	<b>Acoplamento entre ESC e motor</b>	<b>111</b>
<b>6.10</b>	<b>Bateria</b>	<b>111</b>
<b>6.11</b>	<b>Acoplamento entre bateria e ESC</b>	<b>113</b>
<b>6.12</b>	<b>MPPT</b>	<b>114</b>
<b>6.13</b>	<b>Acoplamento entre MPPT e bateria</b>	<b>114</b>

6.14	<b>Painéis fotovoltaicos</b>	115
6.15	<b>Acoplamento entre painel fotovoltaico e MPPT</b>	116
6.16	<b>Outras cargas</b>	116
6.17	<b>Acoplamento entre outras cargas e bateria</b>	117
6.18	<b>Resolvendo correntes</b>	117
6.19	<b>Resolvendo a tensão da bateria</b>	118
6.20	<b>Modelo da embarcação solar</b>	119
6.20.1	Descrição do fluxo de sinais	120
6.20.2	Variantes de modelo	120
6.21	<b>Modelo simples</b>	121
6.22	<b>Modelo completo</b>	125
6.23	<b>Modelo interno</b>	128
<b>7</b>	<b>PARAMETRIZAÇÃO</b>	<b>130</b>
7.1	<b>Implementação da otimização</b>	<b>131</b>
7.2	<b>Parâmetros da geração energética</b>	<b>133</b>
7.3	<b>Parâmetros da bateria</b>	<b>143</b>
7.4	<b>Parâmetros do ESC</b>	<b>147</b>
7.5	<b>Parâmetros do motor</b>	<b>155</b>
7.6	<b>Parâmetros da transmissão</b>	<b>166</b>
7.7	<b>Parâmetros da hélice e casco</b>	<b>166</b>
7.7.1	Geometria do Casco	167
7.7.2	Geometria da hélice	169
7.7.3	Fração de esteira e dedução de empuxo	169
7.7.4	Coeficientes em água livre (série-B de Wageningen)	170
7.7.5	Análise de sensibilidade para priorização da otimização	171
7.7.6	Otimização dos parâmetros da hélice e casco	172
7.8	<b>Demais parâmetros</b>	<b>183</b>
7.8.1	Outras cargas	183
7.8.2	Densidade da água	183
7.9	<b>Todos os parâmetros</b>	<b>183</b>
<b>8</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>186</b>
8.1	<b>Avaliação dos modelos</b>	<b>186</b>
8.1.1	Avaliação dos submodelos parametrizados	187
8.1.2	Consistência física e energética do modelo integrado	187
8.2	<b>Estudo de caso</b>	<b>197</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>201</b>
9.1	<b>Síntese dos resultados</b>	<b>201</b>

9.2	Verificação dos objetivos . . . . .	201
9.3	Limitações . . . . .	202
9.4	Trabalhos futuros . . . . .	203
9.5	Conclusão . . . . .	204
	 <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	 <b>205</b>
	 <b>APÊNDICES . . . . .</b>	 <b>214</b>
	 <b>APÊNDICE A – FIGURAS DA AVALIAÇÃO DO MODELO DA GE- RAÇÃO . . . . .</b>	 <b>215</b>
A.1	Avaliação para a Seção A . . . . .	215
A.2	Avaliação para a Seção B . . . . .	216
A.3	Avaliação para a Seção D . . . . .	219
A.4	Avaliação para a Seção E . . . . .	220
A.5	Avaliação para a Seção F . . . . .	223
	 <b>APÊNDICE B – FIGURAS DA AVALIAÇÃO DO MODELO DA BA- TERIA . . . . .</b>	 <b>225</b>
B.1	Estado de carga inicial por seção . . . . .	225
B.2	Avaliação para a Seção D . . . . .	225
B.3	Avaliação para a Seção D12 . . . . .	226
B.4	Avaliação para a Seção D24 . . . . .	227
B.5	Avaliação para a Seção D34 . . . . .	228
B.6	Avaliação para a Seção D46 . . . . .	229
B.7	Avaliação para a Seção D45 . . . . .	230
B.8	Avaliação para a Seção D56 . . . . .	231
B.9	Avaliação para a Seção E . . . . .	232
B.10	Avaliação para a Seção E12 . . . . .	233
B.11	Avaliação para a Seção E23 . . . . .	234
B.12	Avaliação para a Seção F1 . . . . .	235
B.13	Avaliação para a Seção F2 . . . . .	236
B.14	Avaliação para a Seção F3 . . . . .	237
	 <b>APÊNDICE C – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DA BATERIA . . . . .</b>	 <b>239</b>
	 <b>APÊNDICE D – RESULTADOS COMPLEMENTARES DA BATERIA</b>	 <b>244</b>
D.1	Modelo PNGV 1RC . . . . .	244
D.2	Modelo PNGV 2RC . . . . .	244

	<b>APÊNDICE E – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DO MOTOR . . . . .</b>	<b>258</b>
<b>E.1</b>	<b>Ensaio em regime permanente (fabricante) . . . . .</b>	<b>258</b>
<b>E.2</b>	<b>Ensaio de degrau com eixo livre . . . . .</b>	<b>264</b>
	<b>APÊNDICE F – RESULTADOS COMPLEMENTARES DO MOTOR</b>	<b>275</b>
<b>F.1</b>	<b>Ensaio em regime permanente (fabricante) . . . . .</b>	<b>275</b>
	<b>APÊNDICE G – SIMULAÇÕES HIDROSTÁTICAS COM A GEOMETRIA DO CASCO . . . . .</b>	<b>279</b>
	<b>APÊNDICE H – PRELIMINA . . . . .</b>	<b>284</b>
	<b>APÊNDICE I – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE PROPULSÃO . . . . .</b>	<b>290</b>
	<b>APÊNDICE J – OTIMIZAÇÃO DA PROPULSÃO . . . . .</b>	<b>296</b>
	<b>APÊNDICE K – RESULTADOS COMPLEMENTARES DA PROPULSÃO . . . . .</b>	<b>316</b>
<b>K.1</b>	<b>Otimização da propulsão . . . . .</b>	<b>316</b>
<b>K.2</b>	<b>Análise de sensibilidade da propulsão . . . . .</b>	<b>316</b>
	<b>APÊNDICE L – SEÇÕES SEMÂNTICAS DE TREINO E TESTE . .</b>	<b>327</b>
<b>L.1</b>	<b>Geração . . . . .</b>	<b>327</b>
<b>L.2</b>	<b>Bateria . . . . .</b>	<b>327</b>
<b>L.3</b>	<b>Propulsão . . . . .</b>	<b>328</b>
	<b>APÊNDICE M – DECLARAÇÃO DE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) . . . . .</b>	<b>330</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de uma redução no impacto ambiental de todos os setores clama pela substituição dos combustíveis fósseis por energias limpas e renováveis como forma de controlar as mudanças climáticas (IEA, 2021). De acordo com o relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) (United Nations, 2021), o setor de transporte é responsável por uma parcela expressiva das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Em busca de alternativas viáveis para a redução dos impactos no setor de transportes — especificamente para veículos marítimos — as embarcações movidas a energia solar vêm sendo desenvolvidas por algumas iniciativas ao redor do mundo (GORTER *et al.*, 2011) há mais de 35 anos (SCHAFFRIN; BENNDORF; SCHNEIDER, 1990), e mais recentemente, com o avanço das tecnologias de baterias, assim como de painéis fotovoltaicos, estudos com análise técnico-econômica e otimização de dimensionamento desses sistemas vêm sendo publicados, como em Salem e Seddiek (2016) e Nasirudin *et al.* (2020).

Para fomentar o desenvolvimento de embarcações solares, ao redor do mundo existem algumas competições universitárias de embarcações solares (REID; HOEPPNER, 1997; ATEN; SCHADE; COLELLA, 1997), nas quais, a partir de um regulamento, estudantes trabalham em equipe para desenvolver e integrar todas as tecnologias envolvidas no sistema — casco, hélice, baterias, painéis fotovoltaicos, conversores eletrônicos de energia, motores, dentre diversos outros sistemas (LEUNG; CHENG, 2017; SCHAFFRIN; BENNDORF; SCHNEIDER, 1990), que formam um sistema dinâmico e complexo, no qual decisões tomadas sobre cada componente podem ter impacto na operação de todos os outros (GORTER, 2014).

Tratando-se de um veículo com energia limitada, a eficiência energética global do sistema tem grande impacto na autonomia do veículo (GORTER, 2015), ou seja, não só a seleção dos componentes durante a fase de projeto é importante, como também o *modo* com que essa energia é utilizada, o que significa que a estratégia de navegação perante as restrições de distância e duração de uma viagem demanda também um entendimento sobre a relação energética entre os componentes, conforme discutido por Kroon (2017).

No Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSC), no segundo ano de desenvolvimento da embarcação da equipe Zênite Solar (2014), foram levantadas algumas perguntas relacionadas à energia e ao desempenho dentro da equipe — por exemplo: como contabilizar a energia da embarcação? Como o piloto pode saber quanta potência pode usar para finalizar um determinado trajeto num determinado tempo? — Mais recentemente, estas perguntas agregaram-se a outras mais complexas: a partir de uma previsão climática, poderíamos estimar a energia disponível durante a competição

e criar uma estratégia otimizada de uso dessa energia? Ou ainda: como melhorar o desempenho da embarcação?

Tais questões, inicialmente, podem parecer triviais, talvez por estarmos acostumados com o computador de bordo dos carros, que estima, a partir do monitoramento do consumo de combustível, a distância alcançável naquelas condições, feito em poucos instantes após o pressionar de um botão. Porém, quando se parte de um sistema com uma topologia diferente, no qual se têm a geração e o consumo de energia interligados, e ambos dependentes do clima, começamos a nos perguntar se isso é mesmo possível, e então parece começar a fazer sentido uma jornada em busca das respostas para as perguntas listadas acima.

Desde 2015, a evolução da embarcação solar do IFSC tem sido reconhecida por sua inovação na competição nacional (DESAFIO... , 2023a), trazendo, ano após ano, de maneira aberta, o desenvolvimento de novos sistemas e de tecnologias aplicadas para lidar com os desafios inerentes à navegação de embarcações solares.

Em 2020, sétimo ano de projeto, pela primeira vez, um computador de bordo coletou dados durante toda a competição. São aproximadamente 4,3 GB de mensagens dos diversos módulos, captadas a partir de uma rede de comunicação que interconecta todo o sistema eletrônico da embarcação, desenvolvida anteriormente, e premiada por sua inovação em 2017 (DESAFIO... , 2017).

Embora coletadas, as mensagens estão armazenadas em uma codificação compacta, impossíveis de serem utilizadas nesse estado, necessitando, obrigatoriamente, de um pré-processamento para então serem consumidas em qualquer aplicação.

É importante ressaltar que existem protocolos de aplicação padronizados para a rede Controller Area Network (CAN), como o CANopen (Embedded Office GmbH & Co. KG, 2024), com um ecossistema ferramental amplo, cobrindo implementação, monitoramento, e diagnóstico de redes e dispositivos (CANopenNode Contributors, 2026; CANopen Monitor Contributors, 2024; CANopenTerm Project, 2025).

No entanto, em 2017, a rede CAN foi implementada com um protocolo de aplicação próprio (Zenite Solar Team, 2019a), com a finalidade de ser o mais simples possível, mas com a desvantagem de exigir o desenvolvimento interno de ferramentas de suporte (por exemplo, monitoramento, decodificação, e análise).

Para auxiliar o desenvolvimento de sistemas de tal complexidade, uma das ferramentas empregadas são conhecidas como *simuladores*, capazes de testar **modelos** em condições arbitrárias. Um exemplo é o *software* SUAVE (BOTERO *et al.*, 2016; MACDONALD *et al.*, 2017), desenvolvido no Stanford University Aerospace Design Lab para simular aeronaves, com participação da Embraer e da NASA (WENDORFF *et al.*, 2020).

De maneira similar, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo

simulável e atualizável (passível de reparametrização e de alterações nos modelos com novos dados ao longo dos anos) da embarcação solar da equipe Zênite Solar, a partir de dados coletados a bordo, para apoiar a análise de desempenho e a comparação de estratégias de navegação sob restrições de energia, tanto na fase de projeto quanto durante competições. Para isso, as mensagens registradas pelos módulos eletrônicos são pré-processadas e organizadas em um conjunto de sinais que representam grandezas físicas que, juntamente com outras fontes de dados, embasam a formulação e a calibração de modelos de baixa fidelidade<sup>1</sup> dos principais subsistemas e sua integração em um modelo unificado.

Ao final, pretende-se disponibilizar uma base reproduzível — dados brutos, código, e documentação — que permita executar simulações e subsidiar decisões durante competições, além de servir como ponto de partida para evoluções futuras. O escopo deste trabalho prioriza simplicidade e interpretabilidade, restringindo-se a regimes de operação seguros e deixando extensões de maior fidelidade para trabalhos futuros.

## 1.1 Justificativa

O desenvolvimento de embarcações movidas a energia solar envolve um sistema interdependente, no qual geração, armazenamento, e propulsão competem por uma energia limitada, e variam com o ambiente e o modo de operação, caracterizando um sistema dinâmico e um produto complexo (GORTER, 2014). Apesar de existirem iniciativas relevantes na literatura, como estudos de projeto e avaliação de embarcações fotovoltaicas (GORTER *et al.*, 2011), análises de subsistemas em embarcações solares (Sunaryo; NURACHMAN, 2018), e abordagens baseadas em Modelica (SUTHERLAND *et al.*, 2018; TRENTELMAN *et al.*, 2017), até onde foi possível identificar, são raros os trabalhos que disponibilizam, de forma aberta e diretamente reutilizável, em repositório público, sob licença permissiva, e com documentação de execução, tanto os artefatos necessários à execução (modelos, código, e documentação) quanto dados de telemetria em formato que permita parametrização e validação.

Nesse contexto, este trabalho se justifica por contribuir para reduzir essa lacuna ao apresentar um modelo matemático simulável, passível de melhoria, atualização, e reparametrização, com equações e implementação disponibilizadas de modo a facilitar sua reimplementação e integração em diferentes linguagens e ambientes de simulação. Além disso, o trabalho propõe disponibilizar, em formato aberto, um *pipeline* reproduzível para a telemetria da embarcação da equipe Zênite Solar, que pode servir

<sup>1</sup> Em multifidelidade, um modelo de baixa fidelidade estima a mesma saída que um modelo de alta fidelidade, porém com menor acurácia e, em geral, menor custo computacional (PEHERSTORFER; WILLCOX; GUNZBURGER, 2018).

de referência para outras equipes e iniciativas similares.

## 1.2 Definição do problema

Do ponto de vista dos objetivos das competições, expostos em seus conjuntos de regras, projetados para recompensar a busca pelo melhor desempenho — geralmente utilizando como métrica o menor tempo acumulado ao executar todas as provas —, busca-se não só uma boa execução, mas também se beneficia a embarcação que possui melhor eficiência energética global. Como a eficiência global depende da eficiência de cada componente e se relaciona à estratégia de operação, para que se alcance uma melhoria de maneira planejada, é necessário o conhecimento do funcionamento da embarcação como um todo e também de cada um de seus componentes.

Nesse sentido, este trabalho questiona: é possível, a partir dos dados disponíveis dos diversos sistemas, extrair as informações necessárias para a criação de um modelo simulável e atualizável — isto é, passível de reparametrização e de alterações nos modelos com novos dados ao longo dos anos — que descreva o comportamento da embarcação conforme observado nesses dados?

## 1.3 Objetivo geral

Desenvolver um modelo simulável e atualizável, baseado nos dados da embarcação solar da equipe Zênite Solar, passível de reparametrização e de alterações nos modelos com novos dados ao longo dos anos, visando subsidiar estudo, pesquisa, e desenvolvimento, bem como decisões estratégicas durante competições.

## 1.4 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, para melhor delimitar o trabalho, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) descrever a embarcação solar e identificar seus componentes;
- b) criar modelos simuláveis de baixa fidelidade para cada componente da embarcação;
- c) avaliar o funcionamento do modelo desenvolvido por comparação com os dados;
- d) estruturar, documentar, e disponibilizar um *pipeline* de processamento de dados aberto e reprodutível para a telemetria da embarcação;
- e) publicar dados brutos, códigos, e documentação de forma organizada e em código aberto (*open-source*).

## 1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho inicia-se com a descrição da embarcação solar, seguida de uma breve descrição da competição. Na sequência, realiza-se um levantamento dos requisitos de um simulador para embarcações solares, com foco em atender às demandas específicas da equipe Zênite Solar. Tais demandas, em geral, condizem com as necessidades da comunidade nacional e internacional de competições de embarcações solares, visto que não há uma variedade de opções de *softwares open-source* capazes de realizar tais simulações.

A partir dos requisitos, realiza-se uma modelagem matemática para cada um dos subsistemas, capaz de representar seu comportamento em baixa fidelidade (apenas parte dos sinais, sempre em regime de operação seguro). Os modelos são parametrizados e validados utilizando técnicas de otimização baseadas nos dados da embarcação coletados durante a competição em 2020. Para cada modelo, diferentes táticas são utilizadas para sua parametrização. Com os modelos parcialmente validados, constrói-se um modelo geral, unindo a modelagem e os parâmetros de todos os modelos, para simular a embarcação como um todo a partir de poucas entradas.

Por fim, a partir deste modelo unificado que representa a embarcação solar, exploram-se alguns exemplos de uso prático da ferramenta, permitindo analisar o funcionamento e o desempenho do produto em seu estado no momento da finalização deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos trabalhos e estudos relacionados à modelagem e à simulação de embarcações solares, assim como a sua relevância para o mundo além das competições. Além disso, algumas referências são expostas para que o leitor tenha uma mínima base de conhecimentos necessários para o entendimento do trabalho desenvolvido.

### 2.1 Embarcações solares

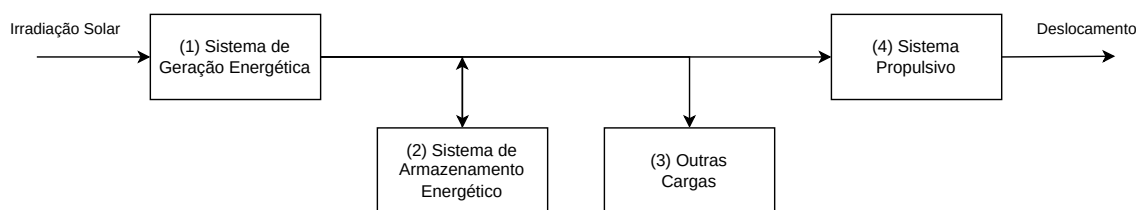
Embarcações solares são aquelas nas quais a energia do deslocamento é predominantemente proveniente da conversão da radiação solar, podendo ocorrer via propulsão elétrica alimentada por painéis fotovoltaicos (PV) e/ou por bancos de baterias carregados por painéis PV (MINAK, 2023; GORTER *et al.*, 2010).

Apesar de competições serem uma vitrine comum para esse tipo de tecnologia, existem também aplicações em cenários reais, nos quais durabilidade, manutibilidade e adequação ao contexto local são requisitos de projeto relevantes, como discutido no projeto *Kara Solar* (Vila-Viñas; CRESPO; MARTENS, 2020).

No contexto do Desafio Solar Brasil, a Figura 1 resume uma decomposição conceitual do sistema<sup>1</sup>. Seguindo o diagrama, o sistema empregado é conceitualmente composto por (1) sistema de geração energética, composto por (a) um conjunto de placas fotovoltaicas, responsáveis pela conversão de radiação solar em energia elétrica; e (b) um conjunto de rastreadores de máxima potência, responsáveis por otimizar o ponto de operação dos painéis fotovoltaicos. Tal energia pode ser tanto armazenada em um sistema de armazenamento de energia (2), quanto entregue às outras cargas (3), e ao sistema propulsivo (4). O sistema de armazenamento é geralmente composto por um conjunto de baterias conectadas em série e/ou paralelo, enquanto as outras cargas abrangem o custo energético de todos os equipamentos auxiliares, tanto os de segurança (bombas de porão, por exemplo) quanto a telemetria e interface de controle dos equipamentos da embarcação. Por fim, a maior parcela do consumo energético é realizada pelo sistema propulsivo (4), responsável por converter a energia elétrica proveniente do sistema de armazenamento (2) e/ou do sistema de geração energética (1) em trabalho mecânico a fim de deslocar a embarcação no fluido por meio de um propulsor rotacionado por um motor elétrico, que por sua vez é controlado por um controlador de motor.

---

<sup>1</sup> Síntese do autor baseada na experiência de 10 anos participando no Desafio Solar Brasil.

**Figura 1 – Diagrama de visão geral do funcionamento de uma embarcação solar**

Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Diagrama de visão geral do funcionamento da embarcação solar: a irradiação alimenta o sistema de geração, energia é armazenada no banco de baterias, distribuída para cargas auxiliares e para o sistema propulsivo, resultando no deslocamento. O esquema explicita os subsistemas e o fluxo energético principal.

### 2.1.1 Competição de embarcações solares

Com a finalidade de estimular o desenvolvimento e a popularização das tecnologias envolvidas no conceito de embarcações solares, competições foram criadas ao redor do mundo (REID; HOEPPNER, 1997; ATEN; SCHADE; COLELLA, 1997; GORTER *et al.*, 2011).

Aqui no Brasil, ocorre o Desafio Solar Brasil, competição que reúne equipes vinculadas a instituições de ensino de diferentes estados brasileiros (DESAFIO..., 2023b). A participação e avaliação são definidas em um regulamento técnico. O *design* do sistema é limitado e guiado por regras, incluindo dimensões e critérios de estabilidade da embarcação, além de limites de potência fotovoltaica instalada (1040 Wp) e de capacidade nominal do banco de baterias (1,5 kWh) (MACHADO, 2018).

Durante a semana de competição, diferentes tipos de provas desafiam diferentes aspectos dos sistemas. Há provas longas, nas quais as embarcações dão a largada todas juntas e navegam, por exemplo, por uma tarde inteira por um percurso pré-determinado. Nesse tipo de prova, por conta da quantidade limitada (pelas regras) sobre a quantidade máxima de energia armazenada, a energia gerada durante a prova acaba dominando a energia total, valorizando a eficiência perante a velocidade final ou manobrabilidade das embarcações, apesar de, ainda assim, serem fatores importantes. Existem também provas mais curtas, nas quais a energia armazenada nas baterias teria importância similar a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. Além destas, existe uma prova de arrancada, que testa a velocidade das embarcações, e também uma prova de zigue-zague, que testa a manobrabilidade delas, ambas durando menos de dez minutos.

Um aspecto de grande importância quando se fala de competições é a compreensão das regras. No período em que o autor acompanhou a competição, houve alterações de regras em 2013, 2015, 2016, 2018 e 2021 (MACHADO, 2013; MACHADO, 2015; MACHADO, 2016; MACHADO, 2018; MACHADO, 2021). Um fator que mudou

muito a competição foi a mudança do sistema de pontuações. Até 2020, a pontuação era diretamente proporcional ao tempo de cada embarcação, sendo as provas com distância (voltas num percurso) limitada. Na revisão de 2021, a pontuação passa a ser definida por ordem de chegada e as provas passam a ser limitadas em tempo (MACHADO, 2018; MACHADO, 2021).

Essas alterações na regra têm grande impacto nas estratégias que as equipes tomam para melhorar seu desempenho na competição. No âmbito de projeto, que é avaliado e validado por uma comissão técnica da competição, mudanças no regulamento podem levar a revisões de projeto e de sistema elétrico (MACHADO, 2018; MACHADO, 2021).

Além disso, no regulamento de 2021, o limite de painéis solares deixa de ser definido em potência de pico (1040 Wp) e passa a ser definido por área de captação (8 m<sup>2</sup>), enquanto o limite de capacidade nominal do banco de baterias passa de 1,5 kWh para 2075 Wh (MACHADO, 2018; MACHADO, 2021).

Outro ponto de impacto que as regras têm é na própria maneira como as equipes se comportam e interagem durante a competição, se tornando mais ou menos competitivas entre si, buscando o uso de nuances das regras para criar estratégias, como, por exemplo, o fato de em alguns casos específicos no placar geral de pontuação, as equipes preferirem não completar mais voltas no percurso da prova se elas podem ficar paradas próximas à linha de chegada, somente aguardando o tempo mínimo da prova chegar, reduzindo assim, os riscos, e garantindo mais energia para uma próxima prova.

O regulamento também define procedimentos de competição, incluindo procedimentos de largada, penalidades e inspeções (MACHADO, 2018; MACHADO, 2021).

Além de tudo isso, como a competição é realizada a céu aberto (no mar, por exemplo), as embarcações estão sujeitas às variações do clima, tanto importantes na navegação tradicional, como vento, e maré, quanto, por se tratar de embarcações solares, nuvens, e radiação solar. Embora todas as embarcações naveguem sob as mesmas condições, a maneira como cada equipe escolhe lidar com cada um desses componentes climáticos é um fator importante no desempenho geral, como, por exemplo: se uma equipe prevê que a radiação solar vai cair no meio de uma prova, poderia ser mais vantajoso navegar mais lentamente no início dela, possivelmente descarregando menos a bateria que os adversários, resguardando, assim, uma porção da energia das baterias para manter uma velocidade média mais alta durante o restante da prova, no caso de um sistema específico no qual o sistema trabalha com maior eficiência em velocidades mais baixas (KROON, 2017; SUTHERLAND *et al.*, 2018).

## 2.2 Base mínima para interpretar o modelo

No que se diz respeito aos modelos, a maioria dos conceitos utilizados ao longo deste trabalho já é familiar ao leitor com formação em Engenharia Eletrônica. Ainda assim, por envolver um sistema com acoplamentos hidrodinâmicos, esta seção reúne apenas as relações mínimas utilizadas mais adiante, apontando as referências base para consulta.

### 2.2.1 Casco: resistência ao avanço e potência efetiva

Ao longo deste trabalho, a dinâmica longitudinal da embarcação é descrita a partir do balanço de forças. Do ponto de vista energético, a quantidade que aparece com mais frequência é a potência efetiva no casco, dada por

$$P_E = R_T(U) \cdot U, \quad (2.1)$$

em que  $R_T$  é a resistência total ao avanço e  $U$  é a velocidade da embarcação. A implementação de  $R_T(U)$  depende do regime modelado (estático vs dinâmico) e do método de modelagem proposto (equação física, equação empírica, modelo caixa-preta, etc.). Este trabalho trata esse termo como um componente do modelo a ser definido e parametrizado, seguindo referências clássicas de resistência e propulsão (MOLLAND; TURNOK; HUDSON, 2017; BIRK, 2019).

### 2.2.2 Hélice: coeficientes adimensionais e desempenho em água livre

Para relacionar o sistema mecânico (motor/transmissão) ao casco, é necessário um modelo de hélice. Uma formulação comum na literatura é expressar empuxo e torque em função de coeficientes adimensionais. Definindo a razão de avanço

$$J = \frac{V_A}{nD}, \quad (2.2)$$

com  $V_A$  sendo a velocidade de avanço no plano da hélice,  $n$  a rotação (em revoluções por segundo) e  $D$  o diâmetro. Os coeficientes de empuxo, e torque em água livre são definidos por (CARLTON, 2007):

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad (2.3)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad (2.4)$$

em que  $T$  é o empuxo,  $Q$  é o torque no eixo, e  $\rho$  é a densidade do fluido. A eficiência em água livre pode ser expressa por (CARLTON, 2007):

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}. \quad (2.5)$$

Neste trabalho, as curvas  $K_T(J)$ , e  $K_Q(J)$  são tratadas como parte da parametrização da hélice, e as referências principais para esse tema são a Série B de Wageningen e suas regressões, além de textos clássicos de hélices (OOSTERVELD; OOSSANEN, 1975; BARNITSAS; RAY; KINLEY, 1981; CARLTON, 2007).

Ao conectar casco e hélice, aparecem termos de interação como fração de esteira ( $w$ ) e a dedução de empuxo ( $t$ ). Uma forma usual de representar esses efeitos é modelar  $V_A$  como uma fração da velocidade do casco, por exemplo,  $V_A = (1 - w)U$ , e relacionar a força no casco ao empuxo na hélice, por exemplo,  $T = R_T/(1 - t)$ , em que  $w$ , e  $t$  dependem da geometria, e do regime de operação (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

A fração de esteira  $w$  e a dedução de empuxo  $t$  delimitam o que se entende por eficiência do casco (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017), como:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} \quad (2.6)$$

Entretanto, como o casco não constitui um elemento de conversão ou processamento de energia no sistema, a interpretação de “eficiência” aqui precisa de um esclarecimento: diferentemente dos componentes elétricos e mecânicos do sistema (motor, transmissão, hélice, etc.), o casco não processa potência; ele representa uma massa (parcialmente) submersa sujeita às forças hidrodinâmicas geradas pelo escoamento e pelo empuxo da hélice. A presença do casco faz com que a hélice opere em um escoamento efetivamente mais lento (efeito de esteira) e, simultaneamente, a ação da hélice aumenta a resistência efetiva do próprio casco (dedução de empuxo). A eficiência do casco  $\eta_H$  deve ser interpretada apenas como um coeficiente de interação entre esses dois efeitos, funcionando como um fator de correção na relação entre empuxo gerado e propulsão efetiva da embarcação, e não como uma eficiência energética no sentido termodinâmico. Assim, seu valor pode exceder a unidade quando  $w > t$  e, para embarcações mono-hélice, tende a assumir valores típicos entre 1,05 e 1,1 (BIRK, 2019).

### 2.3 Modelagem e simulação de embarcações solares: convergências e divergências na literatura

A produção científica sobre modelagem e simulação de embarcações solares inclui propostas metodológicas para a etapa de projeto, modelos de estimativa de desempenho e estudos baseados em dados experimentais monitorados. Revisões recentes discutem aplicações e tendências de pesquisa no tema (MINAK, 2023; SHARMA; SYAL, 2021; KURNIAWAN, 2016).

Com o foco na fase de projeto, de Castro Nóbrega e Rossling (2012) propõe roteiros guiados por requisitos de eficiência, enquanto Choi *et al.* (2007) detalha um fluxo que envolve o desenho do casco, o uso de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para estimar o arrasto e a elaboração de tabelas de pesos para a escolha de motores e painéis. De forma mais analítica, Nasirudin, Chao e Utama (2017) formula o dimensionamento como um problema de otimização em duas etapas, visando minimizar a potência propulsiva e o custo do sistema fotovoltaico sob restrições navais, como critérios de estabilidade e limites de área disponível. Complementarmente, abordagens correlatas utilizam *software* de arquitetura naval, como o MaxSurf, para estimar a resistência ao avanço e selecionar a potência nominal da motorização, em geral apoiando-se em hipóteses de ponto de operação e em eficiências nominais compatíveis com a finalidade de pré-dimensionamento (Sunaryo; NURACHMAN, 2018; Sunaryo; NURACHMAN; IMFIANTO, 2018; MAHMUD; MORSALIN; KHAN, 2014).

Seja com foco em transporte de passageiros ou competições, a transição para a análise do desempenho operacional em missões específicas introduz a necessidade de modelar variáveis ambientais e perfis de uso. Oliveira (2013) investiga a viabilidade sob diferentes cenários de vento e correnteza, enquanto o trabalho de Berjoza, Jurgena e Osadcuks (2021) reporta experimentos em que a embarcação é avaliada em diferentes configurações de velocidade e trajetória (por exemplo, águas calmas e trajetórias circulares), incluindo condições em que a operação pode ser sustentada inteiramente pela irradiância incidente. Para simular esses fluxos energéticos, em Göksu e Yüksel (2023) os autores aplicam a dinâmica de sistemas no *Vensim* para estudar o impacto da inclinação longitudinal (*trim*) na eficiência de cascos em planeio, tratando o fluxo entre os blocos (PV–MPPT–bateria–motor) com rendimentos constantes. De maneira análoga, Kapuścik *et al.* (2019) utiliza o *TRNSYS* para simular dinamicamente o subsistema fotovoltaico (baseado modelo de diodo), visando estimar indicadores energéticos e ambientais associados a provas de competição.

Um aprofundamento significativo na modelagem da parte de geração fotovoltaica é encontrado na série de trabalhos de Gorter *et al.*, que integra modelos de irradiância e trajetória solar como ferramentas de auxílio ao projeto (GORTER; REINDERS; HOUTEN, 2012; GORTER, 2014). Em Gorter *et al.* (2013), ao comparar

simulações com dados monitorados, reporta-se que hipóteses idealizadas podem levar a superestimações relevantes do desempenho absoluto, chegando a 76% no caso analisado. Apesar do maior detalhamento na parte solar, o restante do sistema nessas obras permanece em um nível de modelagem energético, baseado em curvas de resistência em função da velocidade e em modelos estáticos para o motor (GORTER *et al.*, 2012; GORTER, 2015). A necessidade de aproximar esses modelos da realidade operacional destaca limites práticos de validação; na análise de telemetria apresentada por esse mesmo grupo de autores, argumenta-se que a aquisição de dados exige frequências na ordem de segundos para caracterizar adequadamente a dinâmica do sistema, sob o risco de métricas imprecisas quando se usam referências de baixa frequência, como médias horárias de irradiância (GORTER *et al.*, 2012; HOUTEN *et al.*, 2012).

Na eletrônica de potência, a simulação dinâmica de sinais e o controle dos acionamentos aparecem como parte central quando o objetivo é analisar restrições instantâneas de tensão e corrente, como em Sousa, Simonetti e Norena (2000), Sousa *et al.* (2003), que apresenta uma simulação dinâmica voltada à otimização da eficiência de motores de indução por meio de lógica *fuzzy* e variação da tensão do barramento CC, tratando a carga mecânica de forma agregada (por exemplo, como curva de potência).

Mais recentemente, exemplos de simulação dinâmica integrada surgem no âmbito de um mesmo grupo de autores, com o uso da linguagem *Modelica* (TRENTELMAN *et al.*, 2017; SUTHERLAND *et al.*, 2018). Nesses trabalhos, modelam-se o motor e a hélice (por exemplo, via polinômios em função da razão de avanço  $J$ ) de forma acoplada, atribuindo massa a cada componente e utilizando a massa total resultante para estimativas hidrostáticas (por exemplo, flutuação) e de resistência ao avanço. Contudo, tais modelos recorrem a simplificações geométricas, como a aproximação do casco por um elipsóide semissubmerso, e não apresentam procedimentos detalhados de parametrização experimental e validação com dados reais.

Em síntese, a literatura aqui revisada demonstra amadurecimento em métodos de projeto e balanços energéticos, mas revela espaço para integrar a simulação dinâmica de subsistemas e a calibração baseada em telemetria de alta frequência. No recorte analisado neste trabalho, não é recorrente a disponibilização de implementações em código aberto (*open-source*) e de dados em formato reprodutível, o que dificulta a verificação independente e a comparação direta entre ferramentas. Também não é recorrente a disponibilização detalhada do equacionamento dos modelos utilizados, o que limita a reimplementação e a avaliação crítica das hipóteses adotadas. Esses pontos motivam a ênfase deste trabalho na calibração e avaliação de modelos em condições reais de competição.

## 2.4 Identificação de parâmetros e calibração do sistema propulsivo

A calibração de modelos físico-matemáticos passa, quase sempre, pela identificação de parâmetros que não estão disponíveis em *datasheets* ou que variam com o regime de operação. Em sistemas de propulsão naval eletrificados, isso é particularmente relevante por envolver acoplamentos entre componentes eletromecânicos e hidrodinâmicos, além de limitações de instrumentação.

Vrijdag e Martelli (2021) investigam técnicas determinísticas de identificação de parâmetros em um sistema propulsivo com motor de Corrente Contínua (CC), transmissão, e hélice, com experimentos em condição de *bollard pull*. O estudo é relevante para este trabalho por adotar uma decomposição de subsistemas compatível e por evidenciar a necessidade de combinar ensaios, modelos e técnicas de identificação para obter parâmetros úteis em simulação. Um ponto recorrente em problemas de ajuste é que, mesmo quando um algoritmo de otimização encontra um conjunto de parâmetros com ótimo desempenho, podem existir outros conjuntos que produzem resultados praticamente iguais nos sinais medidos, o que reforça a importância de validação em condições diferentes das usadas no ajuste (Ljung, 1998). Em geral, a identificação exige planejar os ensaios (excitação), definir quais parâmetros serão estimados e validar o modelo em condições diferentes das usadas no ajuste.

Como complemento, conceitos de otimização, bem como o uso de análise de sensibilidade global para priorização de parâmetros, são discutidos de forma breve e objetiva na seção 2.5, com as referências-base.

## 2.5 Otimização e análise de sensibilidade

Esta seção apresenta a base teórica de otimização e análise de sensibilidade adotada na parametrização e na avaliação dos modelos desenvolvidos neste trabalho. O foco está em explicitar a formulação dos problemas de calibração, os limites práticos de identificação de parâmetros e a utilidade da sensibilidade global como etapa de priorização antes do ajuste fino.

### 2.5.1 Problemas de otimização e ajuste de parâmetros

De forma geral, um problema de otimização pode ser descrito como a escolha de um vetor de decisão  $x$  que minimiza uma função-objetivo  $f(x)$ , respeitando restrições físicas, geométricas ou operacionais. Uma forma típica de escrita é

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{minimize}} && f(x) \\ & \text{subject to} && g(x) \leq 0, \end{aligned}$$

$$h(x) = 0, , \\ x \in \mathcal{X}.$$

Neste trabalho, essa formulação aparece, principalmente, como ajuste de parâmetros de modelo: escolhe-se  $x$  para minimizar a diferença entre sinais simulados e medidos. Uma forma comum para problemas dinâmicos é

$$J(x) = \sum_{k=1}^{n_y} w_k \frac{1}{N_k} \sum_{t=1}^{N_k} \left( \frac{y_k^{\text{sim}}(t, x) - y_k^{\text{med}}(t)}{s_k} \right)^2 + \lambda \|x - x_{\text{ref}}\|_2^2, \quad (2.7)$$

em que  $y_k^{\text{sim}}$  e  $y_k^{\text{med}}$  são os sinais simulado e medido da variável  $k$ ,  $w_k$  pondera a importância relativa de cada sinal,  $s_k$  normaliza escalas distintas e o termo com  $\lambda$  atua como regularização para reduzir soluções não físicas ou ajustadas demais aos dados de treino (calibração).

Além do critério de erro, o problema é restringido por limites fisicamente plausíveis,

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \quad c(x) \leq 0, \quad (2.8)$$

incluindo, por exemplo, limites de eficiência, inércia, resistência equivalente ou coeficientes hidrodinâmicos. Esses limites evitam que o otimizador compense inadequações estruturais do modelo com parâmetros sem interpretação física.

Em termos de método numérico, há dois cenários recorrentes: problemas suaves e bem condicionados, em que métodos locais são eficientes, e problemas com vários mínimos locais ou regiões pouco informativas, em que estratégias globais, *multi-start* ou híbridas tendem a ser mais robustas. Exemplos de otimização nesse domínio podem ser encontrados na literatura de estratégias de prova e projeto em embarcações solares, incluindo formulações restritas por balanço energético e tempo total de prova (KROON, 2017; SUTHERLAND *et al.*, 2018).

Um ponto central em identificação é que baixo erro de ajuste não implica, necessariamente, parâmetros bem identificados: diferentes combinações de parâmetros podem reproduzir os mesmos sinais com erro semelhante (*não-identificabilidade prática*). Por isso, a literatura de identificação recomenda separar dados de treino (calibração) e dados de teste (validação), e analisar a coerência física dos parâmetros estimados (Ljung, 1998; VRIJDAG; MARTELLI, 2021).

### 2.5.2 Análise de sensibilidade global

Quando o modelo possui muitos parâmetros, é comum que apenas uma parcela deles domine a variação das saídas. A análise de sensibilidade global busca

quantificar essa influência considerando variação simultânea dos parâmetros em todo o espaço de interesse, diferentemente da sensibilidade local, que avalia perturbações em torno de um único ponto de operação.

Na decomposição por variância, para uma saída escalar  $Y$ , tem-se

$$\text{Var}(Y) = \sum_{i=1}^p V_i + \sum_{i<j} V_{ij} + \cdots + V_{1\dots p}, \quad (2.9)$$

em que  $V_i$  representa contribuição isolada do parâmetro  $X_i$ , e os termos de ordem superior representam interações entre parâmetros.

Entre os métodos mais usados, os índices de Sobol quantificam a fração da variância total da saída  $Y$  associada a um parâmetro  $X_i$ . Para uma saída escalar  $Y$ , o índice de primeira ordem pode ser escrito como

$$S_i = \frac{\text{Var}_{X_i}(\text{E}[Y | X_i])}{\text{Var}(Y)}, \quad (2.10)$$

enquanto o índice total pode ser expresso como

$$S_{T_i} = 1 - \frac{\text{Var}_{X_{\sim i}}(\text{E}[Y | X_{\sim i}])}{\text{Var}(Y)}. \quad (2.11)$$

A interpretação conjunta é direta:  $S_i$  mede efeito direto de  $X_i$  e  $S_{T_i}$  mede efeito total (direto + interações). Assim, a diferença  $S_{T_i} - S_i$  indica o grau de interação do parâmetro com os demais. Em problemas práticos, parâmetros com  $S_i$  e  $S_{T_i}$  próximos de zero tendem a ser candidatos naturais para fixação em etapas iniciais de calibração.

Operacionalmente, a análise envolve: (i) definir faixas plausíveis para cada parâmetro; (ii) gerar amostras no hipercubo de entrada; (iii) executar o modelo para todas as amostras; e (iv) estimar os índices e seus intervalos de confiança. O custo computacional cresce linearmente com o número de parâmetros  $p$  e com o tamanho amostral  $N$  (tipicamente da ordem de  $N(p+2)$  para índices de primeira ordem e total). Ferramentas como a *SALib* viabilizam essa rotina de forma reprodutível (HERMAN; USHER, 2017).

Em modelos dinâmicos, em que a saída é um sinal no tempo, a sensibilidade pode ser calculada para métricas derivadas (por exemplo, erro quadrático médio, potência média, pico de corrente, energia consumida) e também em instantes específicos de interesse. Isso evita interpretar um único índice como representativo de todo o regime dinâmico. Aplicações desse raciocínio em modelos eletroenergéticos também são reportadas na literatura (LAI *et al.*, 2021; SALTELLI *et al.*, 2007).

### 2.5.3 Integração entre sensibilidade e calibração no fluxo metodológico

No fluxo adotado neste trabalho, otimização e sensibilidade são etapas complementares. Em termos práticos, a sequência é:

1. definição do conjunto inicial de parâmetros e de suas faixas com base em física, *datasheets* e dados experimentais;
2. análise de sensibilidade global para priorizar os parâmetros que realmente afetam as saídas-alvo;
3. calibração dos parâmetros mais influentes por otimização sob restrições físicas;
4. validação em condições distintas das usadas no ajuste, verificando capacidade preditiva e consistência física dos parâmetros.

Esse encadeamento reduz dimensionalidade efetiva do problema de otimização, diminui risco de sobreajuste e melhora a interpretabilidade dos resultados. Assim, a análise de sensibilidade não é tratada como etapa acessória, mas como elemento estruturante da estratégia de identificação e avaliação dos modelos (SALTELLI *et al.*, 2007; Ljung, 1998; VRIJDAG; MARTELLI, 2021).

### 3 DESCRIÇÃO DA EMBARCAÇÃO

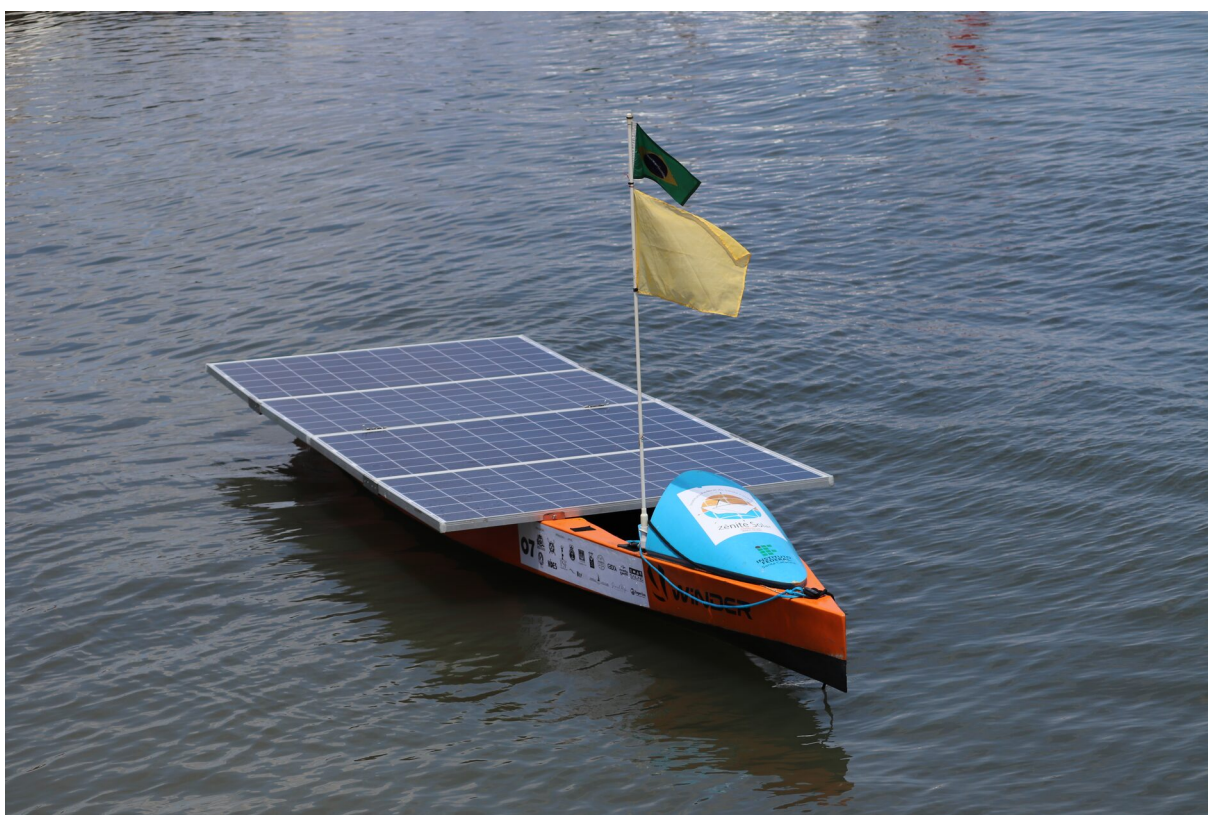
A embarcação solar Guarapuvu II, desenvolvida e mantida pela equipe Zênite Solar, do IFSC Campus Florianópolis, em 2019, contava com quatro painéis fotovoltaicos de 260 W montados em sua superfície superior, conectados individualmente a quatro conversores MPPTs, que, por sua vez, estão conectados a um banco de baterias que, juntos, fornecem energia para o restante do sistema.

Conectado ao banco de baterias está o sistema propulsivo, composto por um ESC, que controla a rotação do eixo do motor por meio do controle da tensão fornecida ao motor. O motor é, neste caso, um motor elétrico de corrente contínua do tipo Motor de corrente contínua de ímã permanente (*Permanent Magnet Direct Current – PMDC*) de 4,8 kW, que por sua vez tem seu eixo mecanicamente acoplado ao eixo de um sistema de transmissão azimutal, que é, por fim, acoplado à hélice.

Também conectados ao banco de baterias estão diversos outros sistemas (descritos nas próximas subseções), alguns visando prover funcionalidades de segurança, como a placa que controla uma bomba de porão (nomeada MAB19), e outros responsáveis apenas por coletar e armazenar dados, como sensores de corrente, tensão, rotação, dentre outros, que, em conjunto, permitiram que este trabalho pudesse ser realizado.

Nas Figuras 2 e 3 podemos visualizar a embarcação em águas calmas, estática e ancorada enquanto carrega suas baterias com a irradiância solar, e a embarcação durante provas, em diversos regimes de velocidade.

**Figura 2 – Embarcação solar ancorada em águas calmas durante condição de operação estática e recarga**



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto da embarcação solar Guarapuvu II ancorada em águas calmas durante condição de operação estática e recarga.

Figura 3 – Embarcação em diferentes regimes de operação



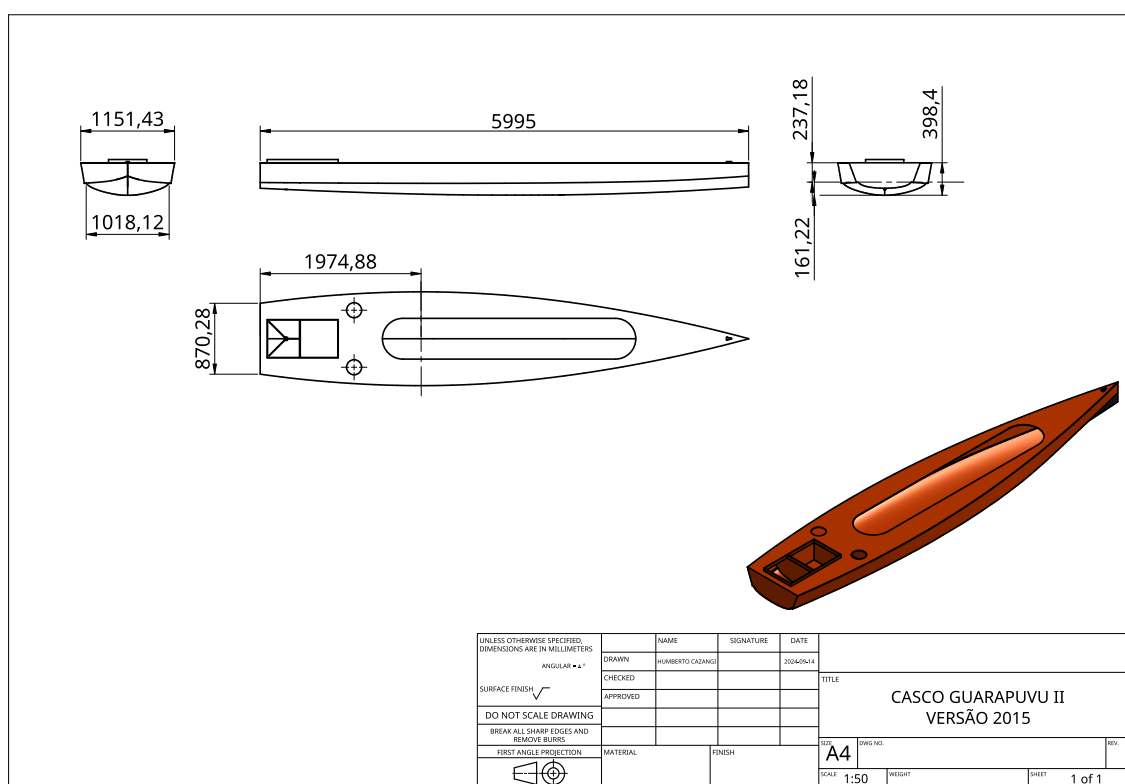
Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Sequência de quatro fotos da embarcação em diferentes regimes de operação, incluindo aceleração em curva e trecho em regime.

### 3.0.1 Casco

O casco da embarcação é construído em material compósito, com laminação predominantemente em fibra de carbono, com uso localizado de fibra de vidro e espumas estruturais de preenchimento. Possui comprimento total (*Length Overall – LOA*) de 6 m e boca máxima (*Beam Maximum – B<sub>max</sub>*) de aproximadamente 1,151 m, apresentando massa estrutural em torno de 30 kg em condição leve (casco vazio). Outras dimensões geométricas e detalhes construtivos do casco podem ser consultados no desenho técnico apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Desenho técnico do casco



Fonte: Acervo da equipe (2015).

Legenda: Desenho técnico do casco Guarapuvu com vistas e cotas principais (comprimento, boca e perfil). As dimensões e referências geométricas servem de base para o cálculo hidrodinâmico e para a modelagem do casco no simulador.

### 3.0.2 Painéis fotovoltaicos

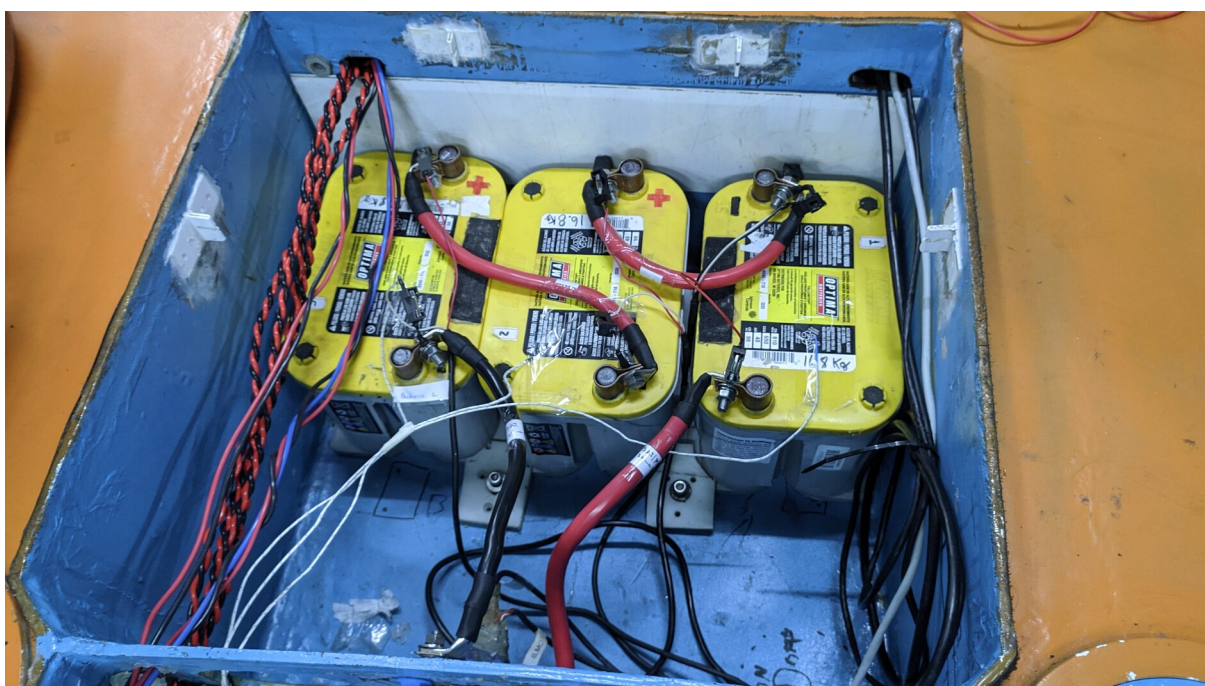
Em 2019, a embarcação utilizava um conjunto de quatro painéis fotovoltaicos do modelo *JKM260P-60B*, cada um com potência nominal de 260 W em condições padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC*). Nessas condições, cada módulo apresenta tensão no ponto de máxima potência de aproximadamente 31,1 V e corrente de 8,37 A, resultando em uma potência total instalada de 1,04 kW<sub>p</sub>.

As principais grandezas elétricas dos módulos incluem tensão de circuito aberto de 38,1 V e corrente de curto-circuito de 8,98 A, com eficiência de conversão declarada de aproximadamente 15,9 %. Informações adicionais sobre o comportamento térmico, coeficientes de temperatura e condições de temperatura nominal de operação das células (*Nominal Operating Cell Temperature – NOCT*) podem ser consultadas diretamente no *datasheet* do fabricante (Jinko Solar, 2019).

### 3.0.3 Baterias

O sistema de armazenamento de energia da embarcação é composto por três baterias de chumbo-ácido seladas conectadas em série, do tipo Manta de fibra de vidro absorvente (*Absorbent Glass Mat – AGM*), modelo *YELLOWTOP®D35*, fabricadas pela Optima Batteries (Optima, 2020). Cada unidade possui capacidade nominal de 48 Ah e massa aproximada de 16,5 kg. A Figura 5 apresenta o compartimento das baterias, evidenciando sua disposição e fixação na embarcação.

**Figura 5 – Compartimento das baterias**



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto do compartimento das baterias AGM com três unidades conectadas em série.

As principais características físicas e elétricas das baterias utilizadas estão sumarizadas na Quadro 1.

Outras informações técnicas, limites operacionais, curvas de descarga e recomendações de uso podem ser consultadas diretamente na página do produto do fabricante (Optima, 2020).

Quadro 1 – Especificações da bateria

Parâmetro	Valor
Capacidade nominal (C20)	48 A h
Resistência interna (DC)	3 mΩ
Massa	16,5 kg
Comprimento	238 mm
Largura	171 mm
Altura	195 mm
Composição	Chumbo-ácido selada (AGM)

Fonte: Adaptado de Optima (2020).

### 3.0.4 Motor

O sistema propulsivo da embarcação utiliza um motor elétrico de corrente contínua com escovas do tipo PMDC, modelo *ME0909*, projetado para aplicações alimentadas por baterias (Motenergy, 2011). A Figura 6 apresenta o compartimento do motor, evidenciando sua instalação na embarcação.

**Figura 6 – Compartimento do motor de propulsão**



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto do compartimento do motor de propulsão (PMDC) com o conjunto motriz instalado.

O motor é capaz de fornecer potência contínua de até 4,8 kW, com capacidade de sobrecarga de 12 kW por períodos curtos de até 30 s. Opera em uma faixa de tensão de alimentação entre 12 V e 48 V, suportando correntes contínuas de até 100 A, com picos de até 300 A por 30 s. Essas características tornam o motor adequado para regimes transitórios de alta demanda típicos de manobras e acelerações da embarcação.

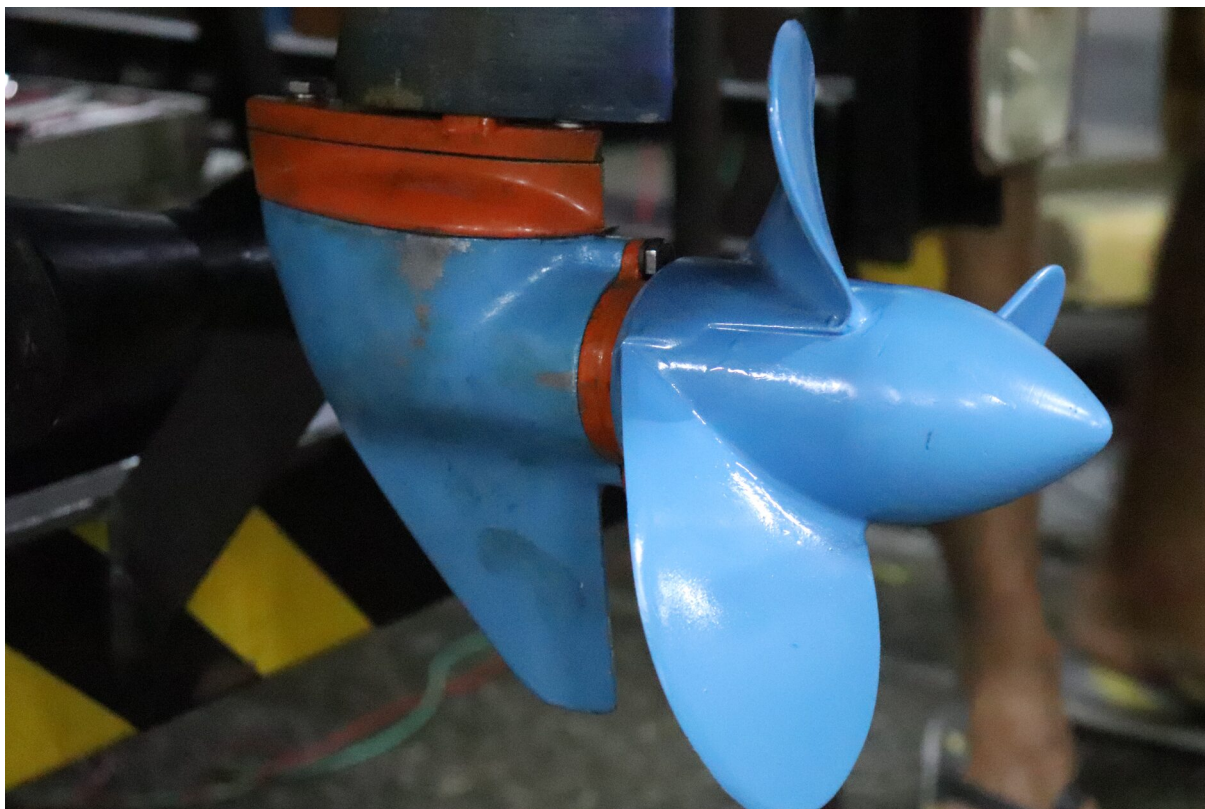
A massa do conjunto é de aproximadamente 11,8 kg, valor que influencia diretamente o balanço de massas e o posicionamento do centro de gravidade longitudinal do sistema propulsivo. Informações geométricas detalhadas, curvas características e limites operacionais podem ser consultados no desenho técnico e na ficha técnica do fabricante (Motenergy, 2011).

### 3.0.5 Transmissão e hélice

A transmissão da embarcação é uma modificação de uma rabeta comercial 2000 Evinrude E8WRLSSC de 8 hp, na qual a caixa de engrenagens original foi acoplada a um eixo vertical. Nesse eixo é montado um leme projetado pela equipe.

A hélice utilizada é um modelo comercial para motor de popa *Johnson* de 15 hp, com diâmetro nominal de 9" e passo de 10 1/2". A Figura 6 apresenta o conjunto de transmissão e hélice instalado na embarcação durante a competição. Pode-se observar uma modificação experimental realizada pela equipe: um adaptador de cubo (*hub cap*) foi manufaturado com a finalidade de melhorar o desempenho do conjunto.

**Figura 7 – Conjunto de transmissão mecânica e hélice**



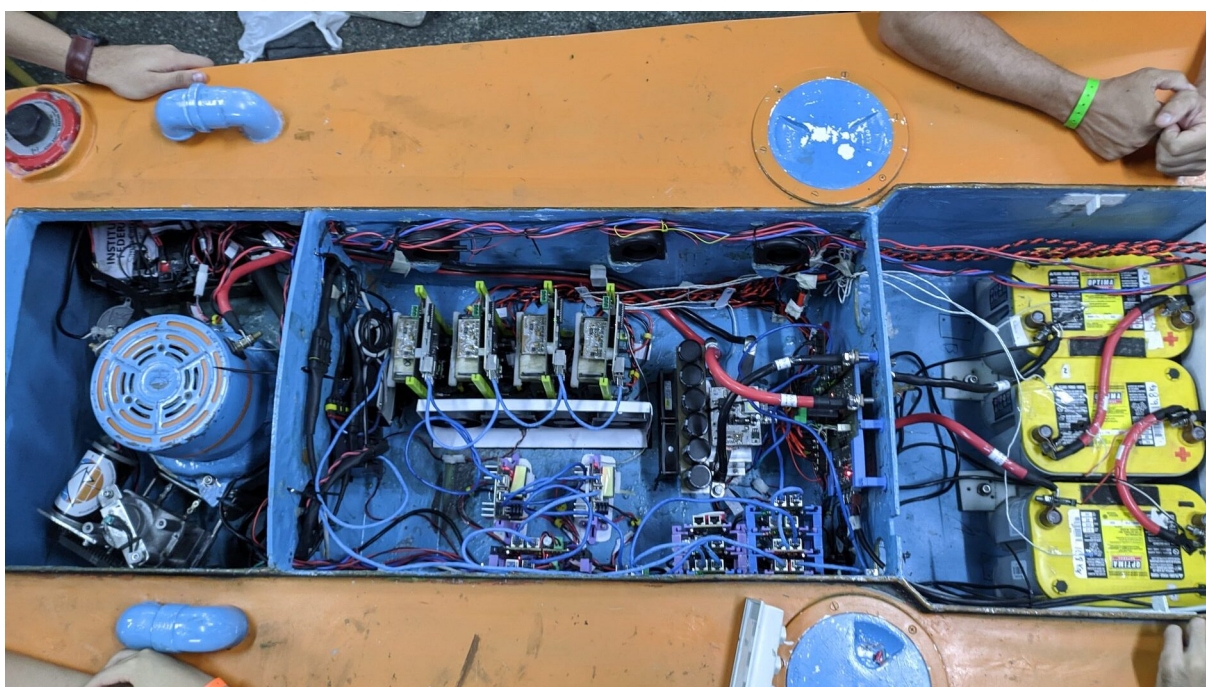
Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto do conjunto de transmissão mecânica e hélice instalado na embarcação.

### 3.0.6 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico da embarcação é constituído por diversos módulos conectados à mesma rede de comunicação CAN, com exceção da eletrônica da direção, que em 2019 ainda não havia sido integrada, e utilizava uma rede própria. A Figura 8 apresenta o compartimento da eletrônica, com o motor instalado no compartimento à esquerda, os módulos e o cabeamento do sistema distribuído no compartimento central e o banco de baterias no compartimento à direita. Esses módulos são responsáveis por sensoriar e controlar diversos aspectos da embarcação, incluindo o acionamento do motor a partir da energia proveniente do banco de baterias e dos painéis fotovoltaicos.

**Figura 8 – Compartimento do sistema elétrico**



Fonte: Acervo da equipe (2020).

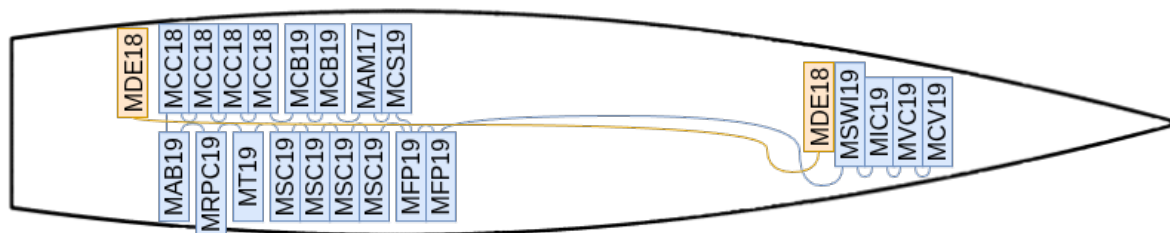
Legenda: Foto do compartimento elétrico com motor, módulos eletrônicos e banco de baterias.

Para viabilizar essa arquitetura, a embarcação implementa um sistema eletrônico distribuído, conectado por meio de uma rede de comunicação CAN.

#### 3.0.6.1 Rede de comunicação CAN

A Figura 9 mostra os módulos eletrônicos distribuídos na embarcação: a maioria se agrupa na região da popa, no compartimento da eletrônica, enquanto alguns são mantidos na proa para servir de interface de controle para o piloto. Para conectar os módulos da proa com os da popa, utiliza-se um cabo blindado, juntamente com outros cabos para redundância. Cada um dos blocos conectados na rede refere-se à um dos blocos descritos na subseção 3.0.6.2.

Figura 9 – Rede CAN distribuída na embarcação



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Diagrama da topologia da rede CAN distribuída na embarcação para comunicação entre os módulos eletrônicos.

Aqui, a infraestrutura da rede utiliza cabos e conectores do tipo *ethernet* de categoria *CAT5*, conectando os módulos em cascata (*daisy-chain*). Nesse cabeamento são conduzidas as linhas CAN-H e CAN-L, a referência do CAN (CAN-GND), a alimentação de 18 V e sua referência, que alimentam os diversos módulos microcontrolados da embarcação. A Figura 10 apresenta os cabos do tipo *ethernet* conectando os módulos em um teste de bancada realizado dias antes do time viajar para a competição de 2019/2020.

Figura 10 – Módulos CAN em Teste



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto dos módulos CAN em teste de bancada antes da instalação no sistema embarcado.

### 3.0.6.2 Módulos CAN

A Figura 11 e a Figura 12 apresentam os módulos utilizados na rede CAN em diferentes estágios. Na primeira, observa-se um conjunto de placas e subconjuntos eletrônicos organizados para inspeção, evidenciando conectores e interfaces de conexão. Na segunda, os módulos são mostrados montados e instalados no compartimento da embarcação, já integrando a rede de comunicação.

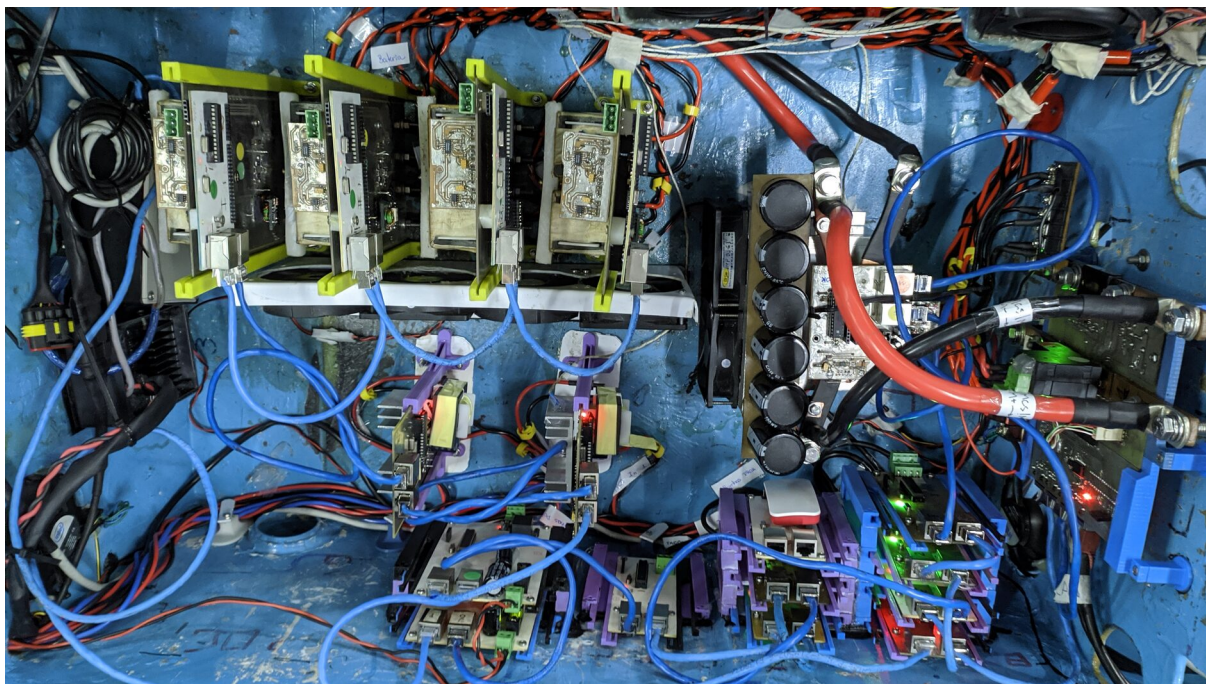
**Figura 11 – Módulos CAN Desmontados**



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto dos módulos CAN desmontados, com placas e conectores visíveis.

Figura 12 – Módulos CAN Montados



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto dos módulos CAN montados na configuração final para operação embarcada.

### 3.0.6.2.1 MCB19 - Módulo de Carregamento de Bateria (versão 2019)

Os MCB19 - Módulos de Carregamento de Bateria (versão 2019) são conversores eletrônicos de potência, de corrente contínua, abaixadores de tensão, utilizando a topologia *Buck* síncrono. Foram desenvolvidos para carregar baterias auxiliares a partir da bateria principal, não permitindo o fluxo inverso (carregar o banco de baterias principais a partir da auxiliar), em cumprimento com as regras da competição de 2019/2020 (MACHADO, 2018). Duas unidades eram instaladas na embarcação: uma para carregar a bateria auxiliar que fornece energia aos componentes de segurança da embarcação, como rádio e bombas de porão; e a segunda unidade, para carregar a bateria utilizada para a direção elétrica. Ambas as baterias eram do tipo chumbo-ácido AGM de 12 V, com capacidade de 7 A h. As características do conversor podem ser vistas no Quadro 2. Mais detalhes sobre seu *design* podem ser acessados em seu repositório (Zenite Solar Team, 2019c).

Quadro 2 – Característica do MCB19

Item	Valor
Tensão de entrada	20 a 50 V
Tensão de saída	10 a 15 V
Potência nominal	150 W
Eficiência	90 %

Fonte: Elaboração própria (2026).

As mensagens CAN transmitidas pelo MCB19 estão sumarizadas na Quadro 3.

Quadro 3 – Mensagens CAN do MCB19 (MCB19\_1 e MCB19\_2)

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (16)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (16)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (16)	"CONTROL"	bitfield		Sinais de controle do ponto de operação. bits: "ENABLE", "VI_SAFE_RANGE", "VO_SAFE_RANGE", "VI_STABLE", "DT_SAFE_RANGE"
"MEASUREMENTS" (17)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MEASUREMENTS" (17)	"OUTPUT_VOLTAGE_L"	u16	V/100	Tensão média de saída, byte baixo
"MEASUREMENTS" (17)	"OUTPUT_VOLTAGE_H"	u16	V/100	Tensão média de saída, byte alto
"MEASUREMENTS" (17)	"OUTPUT_CURRENT_L"	u16	A/100	Corrente média de saída, byte baixo
"MEASUREMENTS" (17)	"OUTPUT_CURRENT_H"	u16	A/100	Corrente média de saída, byte alto
"MEASUREMENTS" (17)	"INPUT_VOLTAGE_L"	u16	V/100	Tensão média de entrada, byte baixo
"MEASUREMENTS" (17)	"INPUT_VOLTAGE_H"	u16	V/100	Tensão média de entrada, byte alto
"MEASUREMENTS" (17)	"DT"	u8	%/255	Ciclo de trabalho do conversor

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.2 MT19 - Módulo Tacômetro (versão 2019)

O módulo tacômetro foi desenvolvido pela equipe para que a velocidade angular no eixo do motor pudesse ser mensurada. O método utilizado foi a contagem de pulsos por segundo, sendo cada pulso detectado por um sensor de efeito hall que tem seu estado alterado por um ímã encaixado em um acoplamento mecânico conectado no eixo do motor. A precisão obtida é de 1 evento por segundo, ou, 60 RPM. Todo o *firmware* e esquemáticos podem ser consultados em seu repositório (Zenite Solar Team, 2019j).

As mensagens CAN transmitidas pelo MT19 estão sumarizadas na Quadro 4.

Quadro 4 – Mensagens CAN do MT19

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (32)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (32)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (32)	"ERROR"	u8		Código de erro
"RPM" (33)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"RPM" (33)	"AVG_L"	u16		RPM médio, byte baixo
"RPM" (33)	"AVG_H"	u16		RPM médio, byte alto

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.3 MRPC19 - Módulo CAN para Raspberry Pi Zero (versão 2019)

Responsável por apenas coletar todas as mensagens sendo enviadas ao barramento CAN, este módulo conecta um Raspberry Pi Zero W à rede CAN por meio de um controlador CAN com interface *Serial Peripheral Interface* (SPI) — interface serial de periféricos chamado MCP2515. Detalhes podem ser vistos no repositório do projeto (Zenite Solar Team, 2019g).

### 3.0.6.2.4 MAB19 (2x) - Módulo de Acionamento das Bombas de Porão (versão 2019)

Os módulos MAB19 controlam, com isolamento elétrico, relés que acionam as bombas de porão da embarcação utilizando a energia da bateria auxiliar. Podem tanto funcionar recebendo mensagens da rede CAN enviadas pelo MIC19 (ver subseção 3.0.6.2.7), ou via chaves de acionamento manual conectadas a ele. As mensagens CAN transmitidas pelo MAB19 estão sumarizadas na Quadro 5, enquanto mais detalhes podem ser acessados em seu repositório (Zenite Solar Team, 2019b).

Quadro 5 – Mensagens CAN do MAB19

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (64)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (64)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (64)	"ERROR"	u8		Código de erro
"PUMPS" (65)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"PUMPS" (65)	"PUMPS"	bitfield		Estado das bombas. bits: "PUMP1", "PUMP2", "PUMP3"

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.5 MCS19 - Módulo Carregamento do Sistema (versão 2019)

Este módulo é responsável por carregar, de maneira controlada, o banco de capacitores que constitui o barramento CC conectado ao ESC do sistema. A partir de mensagens recebidas do MIC19, ele liga/desliga a embarcação, conectando/desconectando a bateria ao barramento CC por meio de um relé de alta potência e um

fusível. Para controlar o carregamento, este módulo possui um circuito de medição do sinal de tensão tanto do lado da bateria quanto do lado do barramento CC. Estes sinais são também enviados regularmente para a rede, assim como outros, mostrados na Quadro 6. Mais detalhes podem ser acessados por meio de seu repositório (Zenite Solar Team, 2019d).

Quadro 6 – Mensagens CAN do MCS19

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (256)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (256)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (256)	"ERROR"	u8		Código de erro
"BAT" (258)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"BAT" (258)	"AVG_L"	u16		Média, byte baixo
"BAT" (258)	"AVG_H"	u16		Média, byte alto
"BAT" (258)	"MIN_L"	u16		Mínimo, byte baixo
"BAT" (258)	"MIN_H"	u16		Mínimo, byte alto
"BAT" (258)	"MAX_L"	u16		Máximo, byte baixo
"BAT" (258)	"MAX_H"	u16		Máximo, byte alto
"CAP" (259)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"CAP" (259)	"AVG_L"	u16		Média, byte baixo
"CAP" (259)	"AVG_H"	u16		Média, byte alto
"CAP" (259)	"MIN_L"	u16		Mínimo, byte baixo
"CAP" (259)	"MIN_H"	u16		Mínimo, byte alto
"CAP" (259)	"MAX_L"	u16		Máximo, byte baixo
"CAP" (259)	"MAX_H"	u16		Máximo, byte alto
"START_STAGES" (516)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"START_STAGES" (516)	"MAIN_RELAY"	bitfield		Liga/desliga da embarcação. bits: "MAIN_RELAY"
"START_STAGES" (516)	"CHARGE_RELAY"	bitfield		Carregamento da embarcação. bits: "CHARGE_RELAY"

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.6 MFP19 (2x) - Módulo Fonte Principal (versão 2019)

Este módulo abaixa a tensão das baterias para 18V utilizando um conversor *buck*, operando com cerca de 96% de eficiência, fornecendo até 3A contínuos. Esta tensão de 18V é injetada no cabeamento da rede CAN, fornecendo uma energia estável e livre de ruído para todos os módulos da rede, simplificando e reduzindo o custo da implementação do sistema modular. Mais detalhes podem ser acessados em seu repositório (Zenite Solar Team, 2019e).

### 3.0.6.2.7 MIC19 - Módulo de Interface de Controle (versão 2019)

Este módulo reúne diversos controles que o piloto tem sobre a embarcação — ligar/desligar a embarcação, acionamento de bombas de porão, rotação do motor,

dentre outros. As mensagens CAN transmitidas pelo MIC19 estão sumarizadas na Quadro 7. Mais detalhes podem ser acessados por meio de seu repositório (Zenite Solar Team, 2019f).

Quadro 7 – Mensagens CAN do MIC19

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (8)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (8)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (8)	"ERROR"	u8		Código de erro
"MOTOR" (9)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MOTOR" (9)	"MOTOR"	bitfield		Estado do motor. bits: "MOTOR_ON", "DMS_ON"
"MOTOR" (9)	"D"	u8	%	Ciclo de trabalho do motor
"MOTOR" (9)	"I"	u8	%	Partida suave do motor
"PUMPS" (10)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"PUMPS" (10)	"PUMPS"	bitfield		Estado das bombas. bits: "PUMP1", "PUMP2", "PUMP3"
"MPPTS" (11)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MPPTS" (11)	"MPPTS_ON"	bitfield		Estado dos MPPTs. bits: "MPPTS_ON"
"MPPTS" (11)	"POT"	u8	%	Limitação máxima de potência dos MPPTs
"MCS" (12)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MCS" (12)	"BOAT_ON"	bitfield		Estado da embarcação. bits: "BOAT_ON"

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.8 MSC19 (5x) - Módulo de Sensores CAN (versão 2019)

O sensoramento da tensão de cada módulo de bateria 12V que compõe o banco de baterias principais, assim como a corrente de entrada e de saída desse banco é realizado por cinco sensores, calibrados individualmente em bancada. As cinco instâncias do MSC19 são identificadas como "MSC19\_1" a "MSC19\_5". As instâncias "MSC19\_1", "MSC19\_2" e "MSC19\_3" compartilham a mesma estrutura de mensagens (Quadro 8), enquanto "MSC19\_4" e "MSC19\_5" possuem estrutura equivalente entre si, mas com unidades associadas a corrente (Quadro 9). Tais módulos podem operar tanto como amperímetro quanto como voltímetro, sendo diferenciados pela seleção dos componentes soldados, assim como pelo *firmware*. Mais detalhes podem ser vistos em seu repositório (Zenite Solar Team, 2019h).

Quadro 8 – Mensagens CAN do MSC19\_1 a MSC19\_3

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (32)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (32)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (32)	"ERROR"	u8		Código de erro
"ADC" (33)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"ADC" (33)	"AVG_L"	u16	V/100	Média, byte baixo
"ADC" (33)	"AVG_H"	u16	V/100	Média, byte alto
"ADC" (33)	"MIN_L"	u16	V/100	Mínimo, byte baixo
"ADC" (33)	"MIN_H"	u16	V/100	Mínimo, byte alto
"ADC" (33)	"MAX_L"	u16	V/100	Máximo, byte baixo
"ADC" (33)	"MAX_H"	u16	V/100	Máximo, byte alto

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 9 – Mensagens CAN do MSC19\_4 e MSC19\_5

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (32)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (32)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (32)	"ERROR"	u8		Código de erro
"ADC" (33)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"ADC" (33)	"AVG_L"	u16	A/100	Média, byte baixo
"ADC" (33)	"AVG_H"	u16	A/100	Média, byte alto
"ADC" (33)	"MIN_L"	u16	A/100	Mínimo, byte baixo
"ADC" (33)	"MIN_H"	u16	A/100	Mínimo, byte alto
"ADC" (33)	"MAX_L"	u16	A/100	Máximo, byte baixo
"ADC" (33)	"MAX_H"	u16	A/100	Máximo, byte alto

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.9 MVC19 (2x) - Módulo de Voltímetro (Display) CAN (versão 2019)

Os módulos "voltímetro", na realidade, são módulos que leem informações de sensores enviadas à rede CAN, os filtram e os apresentam em displays OLED posicionados no painel de controle do piloto. As mensagens dos módulos identificados como "MVC19\_1" e "MVC19\_2", com a mesma estrutura de mensagens, são sumarizadas na Quadro 10. Mais informações podem ser acessadas em seu repositório (Zenite Solar Team, 2019k).

Quadro 10 – Mensagens CAN do MVC19 (MVC19\_1 e MVC19\_2)

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (32)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (32)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (32)	"ERROR"	u8		Código de erro

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.10 MSWI19 - Módulo da Interface no Volante (versão 2019)

Com o objetivo de facilitar o controle de velocidade da embarcação, este módulo posiciona botões em uma direção, permitindo que o piloto altere a velocidade da embarcação sem tirar as mãos do volante. Além disso, o módulo possui um cronômetro que pode ser iniciado, parado e reiniciado por meio de seus botões, útil em diversas ocasiões, mas principalmente em largadas. A implementação pode ser vista na imagem Figura 13. Mais informações sobre o projeto podem ser acessadas por meio de seu repositório (Zenite Solar Team, 2019).

**Figura 13 – MSWI19**



Fonte: Acervo da equipe (2020).

Legenda: Foto do módulo MSWI19 utilizado como interface no volante.

Suas mensagens, listadas na Quadro 11, contemplam parte das mensagens enviadas pelo MIC19, e são interpretadas com prioridade mais alta, significando que este módulo adiciona uma redundância no principal controle do piloto sobre a embarcação. Em caso de falha, o piloto pode desconectar o módulo e passar a controlar utilizando o potenciômetro localizado no painel de controle.

Quadro 11 – Mensagens CAN do MSWI19

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (8)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (8)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (8)	"ERROR"	u8		Código de erro
"MOTOR" (9)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MOTOR" (9)	"MOTOR"	bitfield		Estado do motor. bits: "MOTOR_ON", "DMS_ON"
"MOTOR" (9)	"D"	u8	%	Ciclo de trabalho do motor
"MOTOR" (9)	"I"	u8	%	Partida suave do motor
"PUMPS" (10)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"PUMPS" (10)	"PUMPS"	bitfield		Estado das bombas. bits: "PUMP1", "PUMP2", "PUMP3"
"MPPTS" (11)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MPPTS" (11)	"MPPTS_ON"	bitfield		Estado dos MPPTs. bits: "MPPTS_ON"
"MPPTS" (11)	"POT"	u8	%	Limitação máxima de potência dos MPPTs
"MCS" (12)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MCS" (12)	"BOAT_ON"	bitfield		Estado da embarcação. bits: "BOAT_ON"

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.11 MCC18 (4x) - Módulo Controlador de Carga (versão 2018)

A rede CAN utilizada na embarcação inclui quatro controladores de carga. Apesar do hardware ser MCC18, o *firmware* se identifica na rede CAN como MCC19, de modo que estes módulos aparecem nos logs como "MCC19\_1" a "MCC19\_4". Tais módulos implementam um conjunto de algoritmos para controlar o ponto de operação do painel fotovoltaico conectado nele para que a máxima potência elétrica seja gerada para uma dada condição de irradiância, temperatura e ângulo de incidência. Para tal, estes módulos medem a tensão de entrada e de saída e a corrente de entrada. Estes, dentre outros sinais, são enviados para a rede CAN conforme mostrados na Quadro 12. Mais informações podem ser acessadas por meio de seu repositório (Zenite Solar Team, 2018a).

Quadro 12 – MCC19\_1 a MCC19\_4

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (16)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (16)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (16)	"CONTROL"	bitfield		Sinais de controle do ponto de operação. bits: "ENABLE", "VI_SAFE_RANGE", "VO_SAFE_RANGE", "VI_STABLE", "DT_SAFE_RANGE"
"MEASUREMENTS" (17)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MEASUREMENTS" (17)	"OUTPUT_VOLTAGE_L"	u16	V/100	Tensão média de saída, byte baixo
"MEASUREMENTS" (17)	"OUTPUT_VOLTAGE_H"	u16	V/100	Tensão média de saída, byte alto
"MEASUREMENTS" (17)	"INPUT_CURRENT_L"	u16	A/100	Corrente média de entrada, byte baixo
"MEASUREMENTS" (17)	"INPUT_CURRENT_H"	u16	A/100	Corrente média de entrada, byte alto
"MEASUREMENTS" (17)	"INPUT_VOLTAGE_L"	u16	V/100	Tensão média de entrada, byte baixo
"MEASUREMENTS" (17)	"INPUT_VOLTAGE_H"	u16	V/100	Tensão média de entrada, byte alto
"MEASUREMENTS" (17)	"DT"	u8	%/255	Ciclo de trabalho do conversor

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 3.0.6.2.12 MDE18 - Módulo de Direção Elétrica (versão 2018)

O módulo da direção elétrica foi desenvolvido por (PARENTE, 2019), e adaptado pela equipe. Seu funcionamento se baseia em um controlador digital que alinha a posição angular da rabeta conforme a posição angular do volante por meio de sensores e um motor CC com uma redução. Mais detalhes podem ser acessados em seu repositório (Zenite Solar Team, 2018b).

Em 2019, o sistema de direção ainda não estava integrado à rede CAN principal (ver subseção 3.0.6), de modo que não há uma lista de mensagens CAN associadas neste documento.

### 3.0.6.2.13 MAM17 - Módulo de Acionamento do Motor (versão 2017)

O ESC que controla o motor CC da embarcação é implementado por este módulo, que utiliza um conversor do tipo *chopper* que opera apenas no primeiro quadrante, aceitando apenas corrente e tensão positivas, não permitindo, portanto, freagem regenerativa ou inversão no sentido de rotação. Este módulo aplica um sinal de PWM baseado no controle enviado pelos módulos MSWI19 (maior prioridade) e MIC19, além de implementar medidas de segurança utilizando sinais da chave de homem-morto

(*deadman switch*) para desligar o motor, assim como apenas permitir a partida do motor quando a chave está presente e o controle de velocidade está zerado. Mais informações podem ser acessadas em seu repositório (Zenite Solar Team, 2017).

O hardware do módulo é MAM17; entretanto, o *firmware* utilizado na embarcação se identifica na rede CAN como MAM19. Assim, as mensagens CAN associadas ao acionamento do motor aparecem nos logs como MAM19 e estão sumarizadas na Quadro 13.

Quadro 13 – Mensagens CAN do MAM19 (hardware MAM17)

Mensagem	Sinal	Tipo	Unid.	Descrição
"STATE" (16)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"STATE" (16)	"STATE"	u8		Código de estado
"STATE" (16)	"ERROR"	u8		Código de erro
"MOTOR" (17)	"SIGNATURE"	u8		Assinatura do emissor
"MOTOR" (17)	"D"	u8	%	Ciclo de trabalho do motor
"MOTOR" (17)	"I"	u8	%	Partida suave do motor

Fonte: Elaboração própria (2026).

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para desenvolver o simulador de embarcações movidas a energia solar, bem como os métodos aplicados ao longo do processo de pesquisa. A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa de caráter exploratório para atingir seus objetivos, uma vez que não existe uma ampla literatura disponível sobre o assunto, e a investigação envolve a criação de novos conhecimentos.

Após a conclusão das etapas metodológicas e de pesquisa e a obtenção dos principais resultados deste trabalho (com exceção do caso de uso), modelos de linguagem foram utilizados como apoio à consolidação do trabalho em sua forma final. Mais detalhes são descritos na declaração de uso no Apêndice M.

### Coleta de dados

A coleta de dados envolveu a obtenção de informações a partir das principais fontes descritas nesta seção.

#### Telemetria da embarcação

Os dados de telemetria da embarcação foram coletados por meio de sensores previamente instalados na própria embarcação. Esses dados incluíram informações sobre as variáveis de natureza elétrica, como corrente e tensão elétricas em diversos pontos do sistema, que permitem calcular a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos, o consumo de energia pelos motores, entre outros. Esses dados foram registrados ao longo de provas de uma competição real de barcos solares e salvos em um cartão de memória, em uma *Raspberry Pi Zero* executando um sistema operacional *Linux* configurado pela equipe.

#### Dados de fabricantes

Folhas de dados foram usadas para o transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor* – MOSFET), para o diodo do controle eletrônico de velocidade (*Electronic Speed Controller* – ESC), para o motor e para os painéis fotovoltaicos. Quando necessário, a ferramenta *open-source* WebPlotDigitizer V4 (ROHATGI, 2019) foi utilizada para extrair dados de gráficos e transformá-los em dados utilizáveis nas rotinas de otimizações em Python.

## Dados climáticos e oceanográficos

Dados de irradiação foram coletados a partir da plataforma Solcast (SOLCAST, 2020), e dados que caracterizam a densidade do ar e da água, a partir da plataforma MyOcean Pro (European Union-Copernicus Marine Service, 2020), e a viscosidade dinâmica, via Water Properties Calculator (WATER... , 2025).

## Publicação de dados e código aberto

Todo o trabalho, incluindo dados, códigos e documentação, foi publicado de forma organizada e aberta (*open-source*) para que outros pesquisadores e equipes de competições de embarcações solares possam se beneficiar e contribuir para o desenvolvimento contínuo dessa ferramenta.

O código do simulador foi disponibilizado em <[https://github.com/joaoantonocardoso/solarboat\\_model](https://github.com/joaoantonocardoso/solarboat_model)> (CARDOSO, 2026b). A etapa de transformação e conformação dos dados (*pipeline*) foi disponibilizada em <[https://github.com/joaoantonocardoso/solarboat\\_data\\_pipeline](https://github.com/joaoantonocardoso/solarboat_data_pipeline)> (CARDOSO, 2026a).

Os dados brutos do barramento CAN (2019–2020), no formato original do "candump", foram disponibilizados pela plataforma Zenodo (CARDOSO; BATISTA; MILLAR, 2026).

## Fluxograma da metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é organizada de forma sequencial e iterativa, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 14, cobrindo o ciclo completo de desenvolvimento, validação e aplicação do modelo matemático da embarcação.

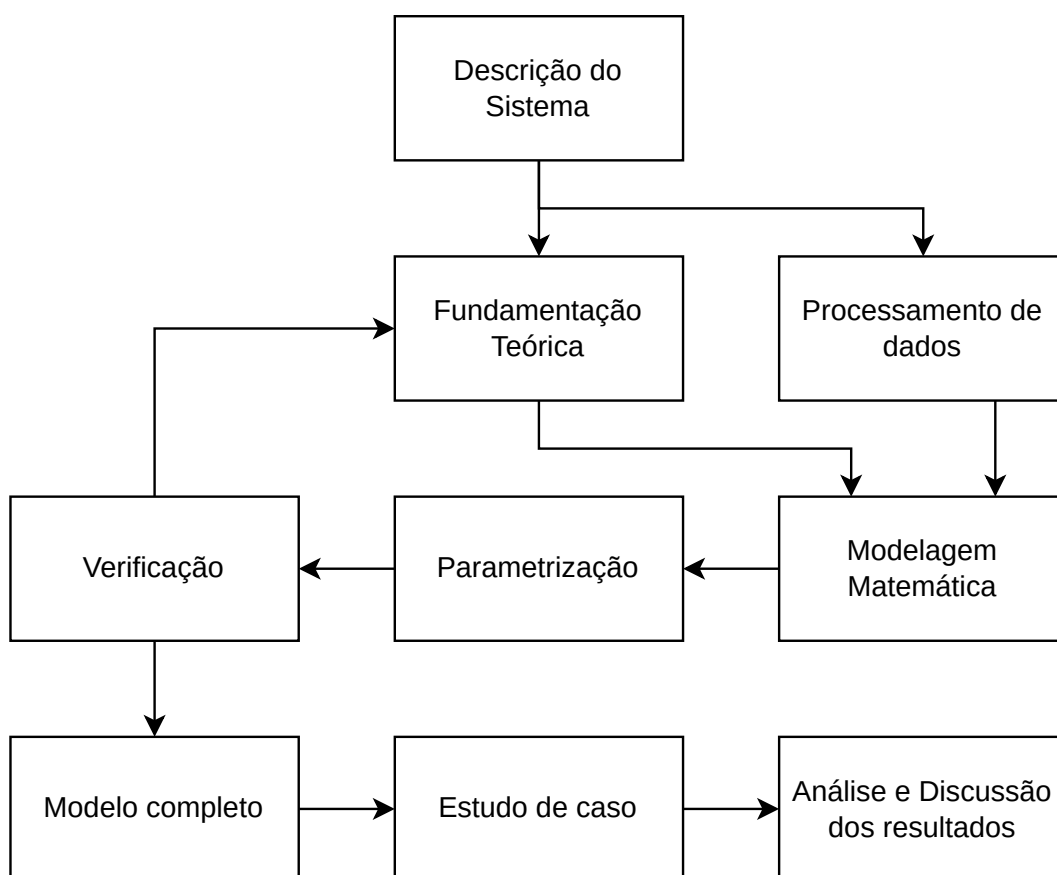
Inicialmente, são identificados os principais subsistemas da embarcação e suas características, incluindo a geração fotovoltaica, o armazenamento em baterias e o sistema propulsivo. É então realizada uma revisão bibliográfica para selecionar modelos matemáticos capazes de representar os fenômenos observados nos dados experimentais.

O equacionamento correspondente é então desenvolvido e documentado em ambiente de prototipagem, por meio de *notebooks*<sup>1</sup> de modelagem matemática, permitindo a inspeção direta das equações e a verificação de coerência, assim como geração de código, reduzindo erros humanos no processo de conversão entre a teoria e a implementação. Em seguida, os modelos são implementados de forma simulável em Python, utilizando a classe *NonlinearIOSystem* da biblioteca `python-control` (FULLER *et al.*, 2021).

---

<sup>1</sup> Documentos interativos no formato `.ipynb`, usados para combinar texto, código e resultados em um mesmo arquivo.

Figura 14 – Fluxograma da metodologia adotada no trabalho



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Fluxograma da metodologia com as etapas de coleta, processamento de dados, modelagem e avaliação de resultados.

A etapa de parametrização consiste no ajuste dos parâmetros dos modelos, ou de conjuntos de modelos, com base nos dados experimentais disponíveis, sendo a verificação conduzida de forma concomitante por meio da comparação entre as saídas do simulador e os dados de telemetria da embarcação, tanto segundo métricas quantitativas de erro — como o erro *Root Mean Square* (RMS) — valor quadrático médio — quanto por inspeção visual das séries temporais, avaliando-se se os níveis de erro obtidos são satisfatórios e se os fenômenos observados nos dados reais estão adequadamente representados.

Após a parametrização individual, os submodelos são integrados em um modelo completo da embarcação, avaliando-se se, em operação conjunta, o simulador mantém o desempenho consistente segundo os mesmos critérios quantitativos e qualitativos adotados anteriormente.

Por fim, é desenvolvido um caso de uso visando a exemplificar a aplicação

do modelo e analisar os resultados obtidos.

## 5 DADOS

A etapa de parametrização dos modelos requer dados que representem o comportamento real do sistema em condições relevantes de operação. Neste trabalho, os dados cumprem dois papéis centrais: (1) fornecer as séries temporais de entrada e saída necessárias para ajustar os parâmetros dos submodelos e (2) permitir a verificação do desempenho do simulador por meio de comparações quantitativas (métricas de erro) e qualitativas (inspeção visual das dinâmicas).

Como a embarcação é um sistema multidisciplinar, não existe uma única fonte de informação suficiente para sustentar toda a modelagem. Assim, utilizou-se um conjunto complementar de bases de dados, provenientes de múltiplas origens, que podem ser agrupadas em quatro categorias:

- **dados gerados pela própria embarcação**, registrados durante a competição por meio de telemetria na rede CAN, os quais constituem a principal referência experimental do comportamento em operação real;
- **dados obtidos em testes laboratoriais e de bancada**, realizados pela equipe, utilizados para caracterizar componentes específicos, e apoiar escolhas de parâmetros quando a telemetria é insuficiente ou apresenta limitações de instrumentação;
- **dados de bases externas**, incluindo fontes abertas (por exemplo, dados oceanográficos do Copernicus Marine Service) e fontes privadas (como as séries históricas de irradiância solar fornecidas pela Solcast), necessárias para reconstruir condições ambientais que influenciam diretamente os balanços energético e hidrodinâmico do sistema;
- **dados fornecidos por fabricantes**, empregados como referência inicial para propriedades nominais, limites operacionais, e parâmetros característicos de componentes comerciais.

As seções a seguir descrevem as principais fontes adotadas, bem como os procedimentos de ingestão, sincronização, filtragem, e transformação aplicados para tornar os dados consistentes e diretamente utilizáveis nos processos de parametrização e simulação.

### 5.1 Logs da embarcação

A embarcação objeto de estudo, da equipe Zênite Solar, utiliza um sistema eletrônico interconectado por meio de um barramento de rede CAN, no qual cada um

dos equipamentos da embarcação compartilha sinais internos, enviando-os de forma periódica.

Cada equipamento tem uma frequência programada, determinada pelas necessidades de integração de cada equipamento; por exemplo, os sinais de controle entre o piloto, enviados por um sistema na interface de controle do piloto, ocorrem em uma frequência suficientemente alta para que o piloto não perceba atraso excessivo entre seus comandos e a reação do controlador do motor, e tal frequência é diferente dos sinais enviados ao acionamento das bombas de porão.

Para viabilizar a coleta de dados, o módulo *MRPC19* foi desenvolvido pela equipe no ano que precedeu a competição, integrando um computador de placa única *Raspberry Pi Zero W* ao barramento. Este computador foi configurado para executar a distribuição "Arch Linux for Arm", com serviços configurados por meio do "systemd" como *Network Time Protocol* (NTP) — protocolo de tempo em rede, para atualização do relógio do sistema operacional, um serviço para a conexão automática à rede de um modem celular *WiFi*, também instalado na embarcação, e, não menos importante, um serviço que grava em seu cartão de memória todos os dados lidos no barramento CAN, chamado "candump", que faz parte do pacote "can-utils" (<https://github.com/linux-can/can-utils>).

Ao final de cada dia de competição, os dados eram acessados, e extraídos do cartão via *Secure Shell* (SSH) — Shell seguro, e enviados para uma pasta compartilhada no *Google Drive*.

Um sistema similar (TCC de Vinicius Cardoso), executando em outra *Raspberry Pi*, coletava os dados, e os enviava para um banco de dados em um servidor web, disponibilizando acesso por meio de uma aplicação web também desenvolvida no mesmo trabalho. O sistema está disponível em seus quatro repositórios (CARDOSO, 2020d; CARDOSO, 2020c; CARDOSO, 2020b; CARDOSO, 2020a).

Ao término da competição, o banco de dados do sistema web foi transferido e armazenado juntamente com os dados gravados pelo *MRPC19*.

Os logs brutos (arquivos *candump*) utilizados neste trabalho foram publicados em repositório aberto na plataforma Zenodo (CARDOSO; BATISTA; MILAR, 2026).

Os arquivos contendo os dados originais gerados pelo *software* "candump" são nomeados como "candump-2020-01-30\_171959.log". Neste trabalho, tais arquivos serão referenciados como *logs*, ou *arquivos candump*. O conteúdo representa diretamente os pacotes capturados pela interface de rede (CAN) do Linux, em que cada linha representa um pacote CAN, contendo o *timestamp* (registro do tempo), o nome da interface, o tópico CAN, e a *payload* (carga útil) da mensagem, como no trecho abaixo:

```
1 (1580415599.609366) can0 011#E4360F0000780216
2 (1580415599.609525) can0 011#E33C0F00002C0D4C
```



em cascata, nada simples de ser mantido, mas suficiente para uma implementação inicial.

Uma dificuldade imediata referiu-se ao volume de dados, pois, embora inicialmente todos os *logs* coubessem na memória *Random Access Memory* (RAM) — memória de acesso aleatório, com as operações para o processamento, este tamanho pode expandir-se gradualmente para mais de 64GB, exigindo a adoção de uma estratégia especial: os *logs* precisam ser processados por partes. Também relacionado ao tamanho, outra dificuldade é o tempo de processamento, que pode atrapalhar não só o uso final do programa, mas durante todo o seu desenvolvimento (pois é um processo iterativo), sendo preferível, quando possível, a utilização de paralelismo.

Devido à natureza do protocolo de aplicação definido pela equipe, no qual cada tipo de mensagem pode ter uma quantidade de informações distinta, implicando um tamanho distinto em bytes, podendo-se atribuir uma informação diferente a cada bit (são no máximo 64 bits por mensagem), cada linha do *log* (pacote interpretado) pode resultar em múltiplas variáveis para serem extraídas, que, por serem todas referentes à mesma mensagem, referem-se a um mesmo *timestamp*. Quando múltiplas mensagens são extraídas e concatenadas uma embaixo da outra, obtém-se uma estrutura de dados conhecida como *Long* (comprida) (KIMBALL; CASERTA, 2004).

Embora o formato *Long* permita diversas análises, para o tipo de trabalho que queremos fazer, que inclui muitas operações temporais entre as diversas variáveis, este formato praticamente impede o trabalho, pois implicaria um *overhead* de processamento para cada operação desejada. Uma abordagem superior consiste em adicionar uma etapa de transformação, executada uma única vez, para outro formato padrão, conhecido como *Wide* (largo), em que cada variável de interesse ganha sua própria coluna, sendo facilmente inter-relacionáveis e indexadas pelo *timestamp*.

Nessa transformação, conhecida como *Long-To-Wide*, quando o *Long* não tem um valor definido para todas as variáveis de interesse para cada *timestamp*, a transformação de *Long* para *Wide* resulta em um dado *Sparse* (escasso), caracterizado por ter a maioria de suas células vazias (KIMBALL; CASERTA, 2004).

Como queremos realizar operações entre diversas variáveis para cada *timestamp*, precisamos que todas as células tenham valores válidos, o que é chamado de *Dense* (denso). Para tornar o dado *Sparse* (escasso) em *Dense*, podemos utilizar alguma técnica para preencher as células vazias, permitindo que algum valor válido seja atribuído em todas as células.

Ao final de uma jornada exploratória que consumiu inúmeras iterações, testando diversas maneiras, e bibliotecas para manipular, e usar os dados, decidiu-se que a forma final desejável dos dados seria um banco de dados com:

- a) cada linha sendo uma observação no tempo;

- b) cada coluna sendo uma variável de interesse;
- c) cada observação no tempo segue um período monotônico e de período único<sup>1</sup>;
- d) idealmente livre de falhas ou dados inválidos;
- e) com a maior precisão disponível;
- f) com o menor tamanho (em disco) possível.

### 5.1.2 Interpretação dos *logs*

Uma maneira eficiente e robusta de interpretar os *logs* (textos com um formato fixo) foi utilizar expressões regulares (*RegEx*), comum a diversas linguagens de programação, inclusive no *Python*.

Para esse uso em particular, uma expressão regular permite especificar grupos de captura nomeados que vão extrair os trechos de interesse, permitindo ignorar trechos que não desejamos guardar, mas que fazem parte da forma fixa observada. Além disso, podemos especificar exatamente as características (tipo e quantidade de caracteres, por exemplo) de cada padrão de forma fixa descrito.

Desenvolveu-se uma expressão regular para extrair os campos de interesse (*timestamp*, *interface*, *topic*, e *payload*) das linhas dos arquivos *logs candump*, utilizando *flags* para ser indiferente quanto a maiúsculas-minúsculas, e aceitar apenas caracteres no *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) — código padrão americano para intercâmbio de informação.

```
11 regex_pattern = ''.join(  
12     r'\((?P<timestamp>\d{10}\.\d{6})\)\s',  
13     r'(?P<interface>\w+)\s',  
14     r'(?P<topic>[0-9a-f]{3})\#',  
15     r'(?P<payload>(?:[0-9a-f]{2}){2,8})',  
16     r'(?!\w) ',  
17 )  
18 regex_flags = re.IGNORECASE | re.ASCII
```

Para testar e desenvolver o padrão supracitado, a aplicação online gratuita e de código aberto *RegExr* (acessível em "[regexr.com](http://regexr.com)") foi utilizada, a qual automaticamente mostra uma descrição compreensível de cada parte da expressão regular, facilitando sua escrita e teste.

Em *Python*, uma forma conveniente de aplicar a expressão regular consiste em abrir os logs com o pacote *Pandas*, como se fossem arquivos *Comma-Separated*

<sup>1</sup> Aqui, monotônico significa que o tempo evolui em uma única direção, sem regressões ou reordenação (sempre não decrescente). Período único significa que o intervalo de amostragem é constante; ao derivar o vetor de *timestamp*, obtém-se um único valor.

*Values* (CSV) — valores separados por vírgula de uma única coluna, sendo possível aplicar a expressão regular, resultando em um objeto "pandas.DataFrame" com uma coluna para cada grupo de captura nomeado, possibilitando o acesso a cada coluna de forma indexada, e relacional.

### 5.1.3 Interpretação do *payload*: camada de aplicação

Para decidir como interpretar o *payload*, é importante conhecer como são definidas as mensagens da camada de aplicação.

Na versão de 2019 do protocolo, definiram-se 44 tópicos, distribuídos em 18 módulos, somando um total de 187 variáveis possíveis para serem transmitidas na rede. Programar uma função para cada mensagem torna-se inviável, lembrando também que qualquer modificação em alguma mensagem implicaria manutenção nessas funções, o que também seria desinteressante. Para lidar com isso, pode-se utilizar a geração de código.

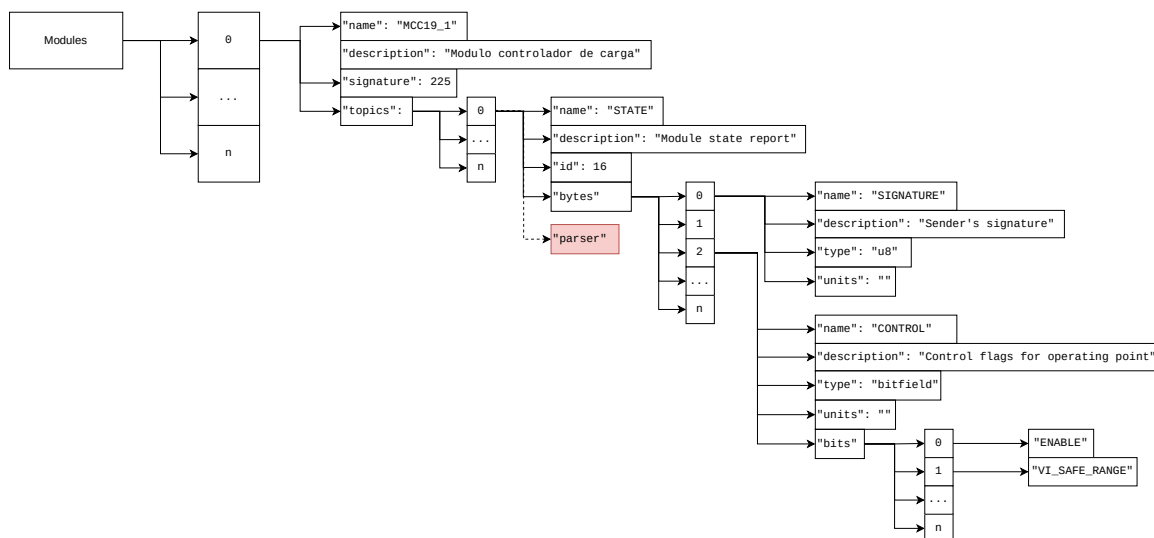
Os *firmwares* de 2019 utilizam um arquivo em C gerado automaticamente, que contém as definições necessárias para se fazer o empacotamento e desempacotamento das mensagens de cada módulo. De modo a permitir a interação de outros sistemas — como o desenvolvido neste trabalho — também é gerado um arquivo *JavaScript Object Notation* (JSON) — notação de objetos JavaScript "can\_ids.json", contendo a definição completa de todas as mensagens, de todos os módulos, tendo informações suficientes para a interpretação de qualquer mensagem.

A Figura 15 apresenta, em forma de um diagrama de árvore, como cada bit, de cada *byte*, de cada tópico, e de cada módulo é descrito pelo "can\_ids.json". Nesse ponto, é interessante notar a necessidade de se ter um documento que descreva detalhadamente cada parte do protocolo, pois, diferentemente de alguns protocolos em que a informação é transmitida juntamente com uma estrutura auto-descritiva, e muitas vezes humanamente legível, aqui, a única informação que trafega pela rede é constituída pelos dados, e então dependemos de um documento externo que tenha a descrição dos dados para interpretá-los corretamente.

Para contextualizar como a informação trafega na rede, a Figura 16 apresenta, de forma simplificada, os campos padrão da definição do CAN Data Frame (quadro de dados do protocolo CAN), e abaixo, como ele é usado pela camada de aplicação da embarcação. Cada bit da camada de aplicação equivale a um símbolo definido diretamente pela camada física do protocolo CAN, que no caso, pode ser entendido como o valor de um sinal diferencial de tensão (fisicamente confinado em um condutor elétrico) em relação a um limiar de tensão conhecido, amostrado em um período também conhecido (Kvaser, 2015).

Na Figura 15 observa-se, em vermelho, onde cada *parser* é injetado no

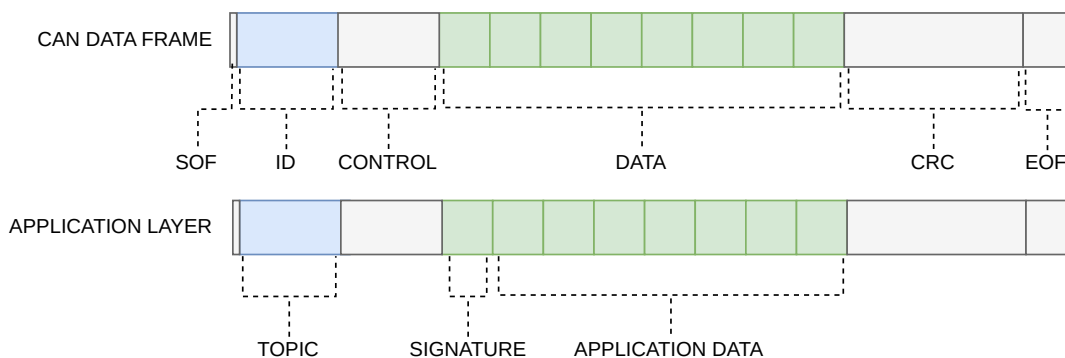
Figura 15 – Diagrama do Protocolo de Aplicação



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Esquema da camada de aplicação CAN, organizado por módulos, tópicos e sinais. O diagrama explicita a assinatura de cada módulo, os tópicos publicados e os campos com unidades, servindo como mapa lógico para o *parser* e a geração dos sinais.

Figura 16 – Quadro CAN e dados na camada de aplicação



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Estrutura do quadro CAN e empacotamento da camada de aplicação. O diagrama apresenta os campos do *frame* (SOF, ID, CONTROL, DATA, CRC e EOF) e a partição do *payload* em assinatura, tópico e dados de aplicação.

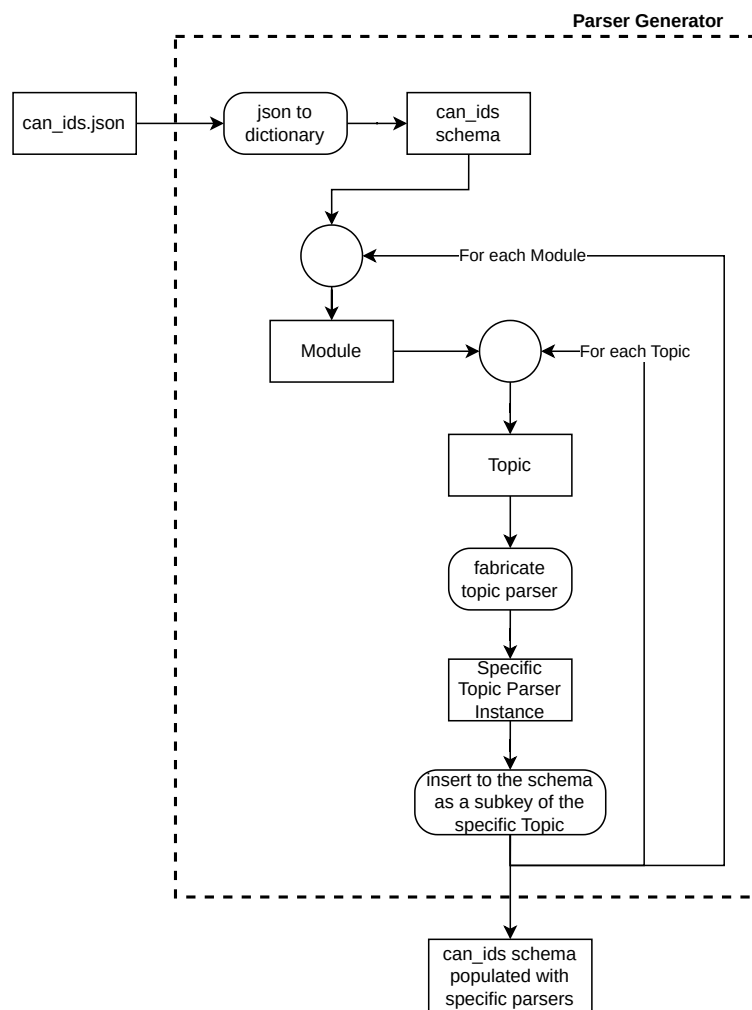
esquema que representa o protocolo de aplicação, ficando acessível da mesma forma das outras chaves do dicionário em Python, como mostra o trecho de código abaixo, em que o dado é interpretado pelo parser do tópico 33 do módulo 250, duas informações que estão disponíveis no pacote CAN recebido:

```
19 unparsed_data = b'\x00\x01\x02\x03\x04'
20 topic_id, module_signature = 33, 250
21 parsed_data = schema['modules'][module_signature]['topics'][topic_id]['parser'].
    from_bytes(bytearray(unparsed_data))
22 print(parsed_data)
```

#### 5.1.4 Gerador dos parsers

Para lidar com a geração de *parsers* automaticamente, criando, em tempo de execução, métodos especializados em interpretar para cada tópico, elaborou-se um código utilizando um *Factory Pattern* (Isaac Rodriguez, 2019). O fluxograma de dados mostrado na Figura 17 representa a arquitetura no módulo <solarboat\_data\_pipeline/lib/canparser\_generator.py> (CARDOSO, 2026a), no qual, a partir do esquema JSON do protocolo ("can\_ids.json") convertido internamente para um dicionário, itera-se sobre todos os módulos ali descritos, e para cada módulo, itera-se sobre todos os tópicos, fabricando um parser específico para cada tópico, que então é inserido neste dicionário, resultando na injeção dos *parsers* no próprio dicionário que inicialmente representa apenas o esquema.

Figura 17 – Diagrama do gerador dos *parsers*



Fonte: Elaboração própria (2026).

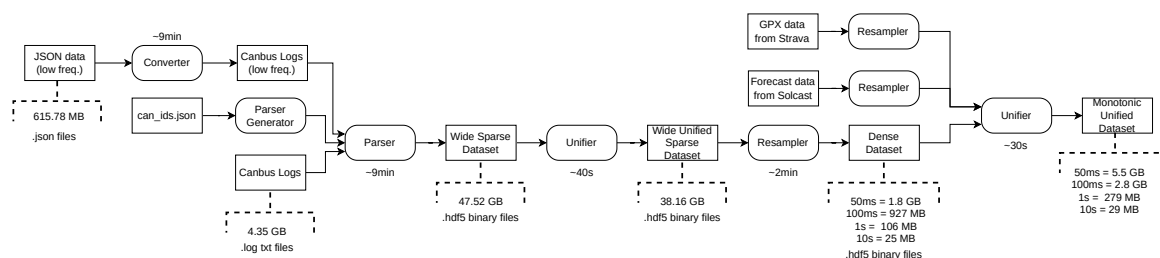
Legenda: Pipeline de geração dos *parsers* a partir do `can_ids.json`. Para cada módulo e tópico, um parser específico é fabricado e inserido no esquema, resultando em um mapeamento completo de assinatura, tópico e unidades para sinais.

### 5.1.5 Transformação dos dados

O volume dos dados brutos e o custo das transformações em termos de memória e tempo de processamento impedem seu tratamento em uma única etapa. A solução adotada foi organizar o trabalho em uma *pipeline* de transformação seguindo alguns dos princípios de arquitetura de *Extract, Transform, Load* (ETL) — extrair, transformar e carregar apresentada por Kimball e Caserta (2004), com estágios sequenciais, na qual, à medida que os dados trafegam, são limpos, e conformados.

A Figura 18 mostra o processo em um alto nível de abstração, traduzindo-se em chamadas das funções "parse()", "unify()", "resample()", e "unify\_forecast()" sequencialmente, realizadas pelo script <solarboat\_data\_pipeline/main\_2020.py> (CARDOSO, 2026a).

**Figura 18 – Diagrama da *pipeline* de transformação dos dados**



Fonte: Elaboração própria (2026).

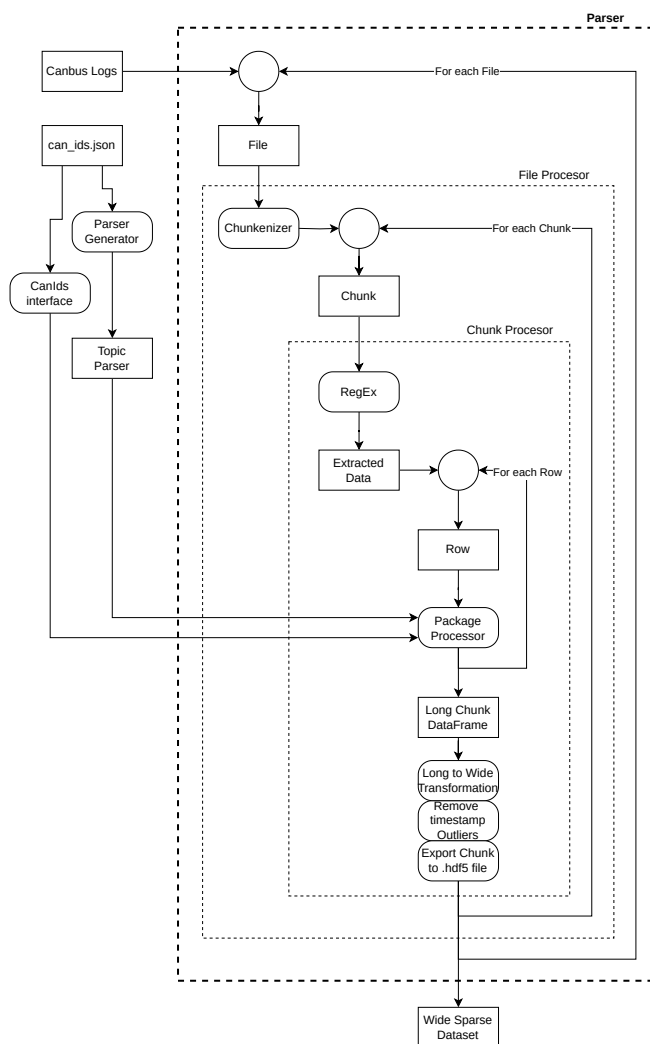
Legenda: Visão geral do pipeline de transformação de dados, desde logs CAN e dados auxiliares até o conjunto de dados denso. A figura apresenta as etapas principais (parser, unificação e reamostragem) e os volumes resultantes em diferentes períodos de amostragem.

Da esquerda para a direita, a primeira etapa é responsável por converter os dados extraídos do banco de dados para o formato *candump*, para que possam ser processados pelo *parser* juntamente com os *logs* da embarcação. O processamento completo dura aproximadamente 22 minutos em um processador Ryzen 9950x. Esta primeira etapa leva aproximadamente 9 minutos.

Logo à direita, o *Parser* (detalhado na Figura 19), que corresponde ao módulo <solarboat\_data\_pipeline/lib/canparser.py>, realiza a transformação dos 4,35 GB de *logs* iniciais em um conjunto de arquivos binários no formato *Hierarchical Data Format 5* (HDF5) — formato de dados hierárquico 5 representando os dados em formato *Wide* e *Sparse*. Esta etapa leva outros 9 minutos, ocupando 47,52 GB.

Para guiar a leitura do diagrama da Figura 19, o fluxo ocorre da esquerda para a direita, seguindo os blocos de processamento que o módulo <solarboat\_data\_pipeline/lib/canparser.py> executa. Primeiro, os *logs* são lidos em *chunks* e cada linha passa pelo bloco de extração via *Regex*, conforme a expressão regular apresentada em subseção 5.1.2, que separa *timestamp*, *interface*, *topic* e *payload*, descartando linhas inválidas. Em seguida, o bloco de preparação normaliza o tempo

Figura 19 – Diagrama do *Parser*



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Etapa de *parser* no pipeline: logs CAN são divididos em arquivos e blocos, registros são extraídos por *RegEx*, convertidos para formato largo e exportados como conjunto de dados esparsos. O diagrama explicita o fluxo por arquivo, bloco e linha.

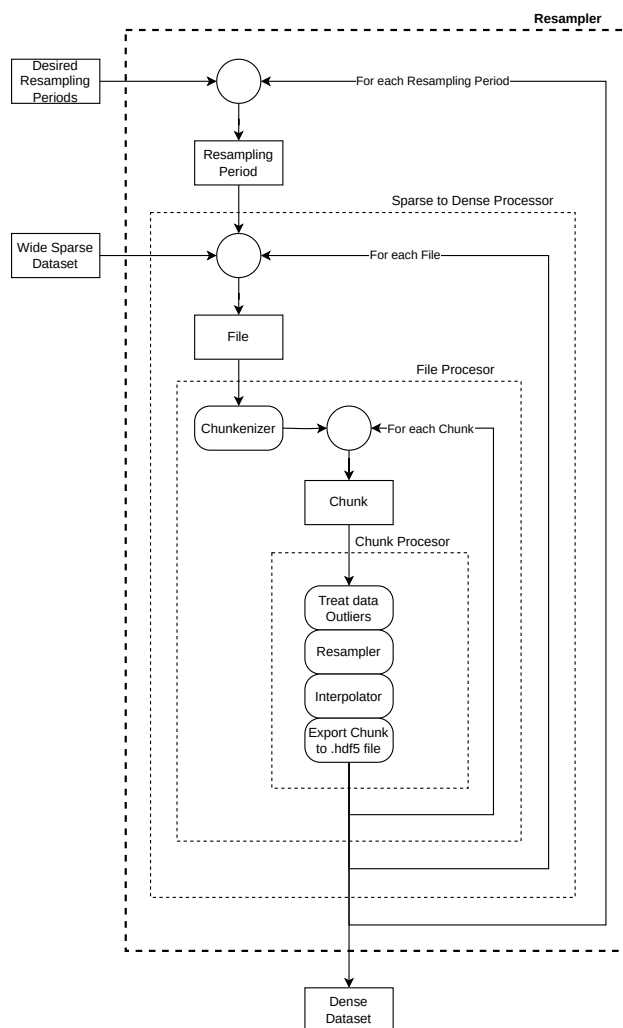
(conversão e correção de fuso), converte o *topic* de hexadecimal para inteiro e o *payload* para bytes. O bloco de identificação do módulo/tópico usa a assinatura extraída do primeiro *byte* do *payload* e consulta o esquema do protocolo ("can\_ids.json"); se não houver correspondência, a mensagem é ignorada. O bloco de interpretação do *payload* verifica o tamanho esperado, aplica o *parser* específico do tópico e converte cada *byte* em variável com unidade física, gerando registros no formato *Long*. Por fim, o bloco de conformação agrega por *timestamp* e por variável, faz o *pivot* para o formato *Wide/Sparse*, remove *outliers* de tempo e exporta cada *chunk* em HDF5, que é o produto desta etapa. Essa remoção de *outliers* é feita comparando a diferença entre carimbos de tempo separados por uma janela fixa (10 mil amostras); se a variação observada estiver muito acima ou abaixo de um limiar predefinido, as linhas correspondentes são descartadas, eliminando saltos temporais espúrios introduzidos por erros de registro no *log*.

Esses dados são então processados pelo primeiro Unifier (módulo <solarboat\_data\_pipeline/lib/unify\_parsed\_candump.py>), que aplica um corte temporal referente ao período desejado (do início ao fim da competição, neste caso), e ordena os dados em sequência temporal, resultando em um conjunto de dados ligeiramente menor (38,16 GB), pois os dados fora do período de interesse foram removidos, levando aproximadamente 40 segundos.

Avançando no diagrama (Figura 18), os dados são reamostrados pelo Resampler (módulo <solarboat\_data\_pipeline/lib/resampler.py>, detalhado na Figura 20), que é aplicado para os múltiplos períodos desejados (aqui, 10, e 1 segundos, e 100 e 50 milissegundos), produzindo, após aproximadamente 2 minutos, um conjunto de arquivos binários ainda particionados (*chunks*) para cada um dos períodos de amostragem desejados: ocupando 25 MB, 106 MB, 927 MB, e 1,8 GB, respectivamente para 10 s, 1 s, 100 ms, e 50 ms.

No diagrama da Figura 20, o fluxo representa o módulo <solarboat\_data\_pipeline/lib/resampler.py>. Os arquivos HDF5 particionados entram por *chunk* e têm o *timestamp* como índice. O bloco de reamostragem aplica a janela temporal desejada (por exemplo, 10 s, 1 s, 100 ms), agregando as amostras de cada intervalo segundo uma regra definida (primeiro valor, média, mediana ou último, conforme o conjunto de sinais). Em seguida, o bloco de preenchimento trata lacunas curtas com *forward fill* ou interpolação temporal, limitado a um número máximo de períodos para evitar extrapolações longas. Opcionalmente, um bloco de filtragem *low-pass* (filtro de Butterworth aplicado em *filtfilt*) suaviza sinais selecionados, preservando fase e restringindo o corte a uma fração segura da frequência de amostragem. O produto do estágio é um novo conjunto de *chunks* reamostrados, gravados em HDF5, um diretório por período.

Figura 20 – Diagrama do *Resampler*



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Etapa de reamostragem do pipeline: o conjunto de dados esparsos é convertido em denso por interpolação e sincronização temporal, processado por arquivo e bloco para cada período de reamostragem.

Para obter os dados climáticos (dados históricos de irradiância solar obtidos da *Application Programming Interface* (API) — interface de programação de aplicações Solcast (SOLCAST, 2020)) e de geolocalização (quando disponíveis, em arquivos *GPS Exchange Format* (GPX) — formato de intercâmbio GPS, do *Global Positioning System* (GPS) — Sistema de Posicionamento Global) integrados com os dados da rede CAN, ambos os conjuntos de dados são reamostrados e, em seguida, unificados por um segundo Unifier, de operação similar ao primeiro, levando aproximadamente 30 segundos, resultando em aproximadamente 29 MB, 279 MB, 2,8 GB, e 5,5 GB para os arquivos referentes a 10 s, 1 s, 100 ms, e 50 ms. O produto desta etapa são arquivos não mais particionados, ou seja, cada arquivo representa a competição inteira, sob um dos períodos de reamostragem escolhidos.

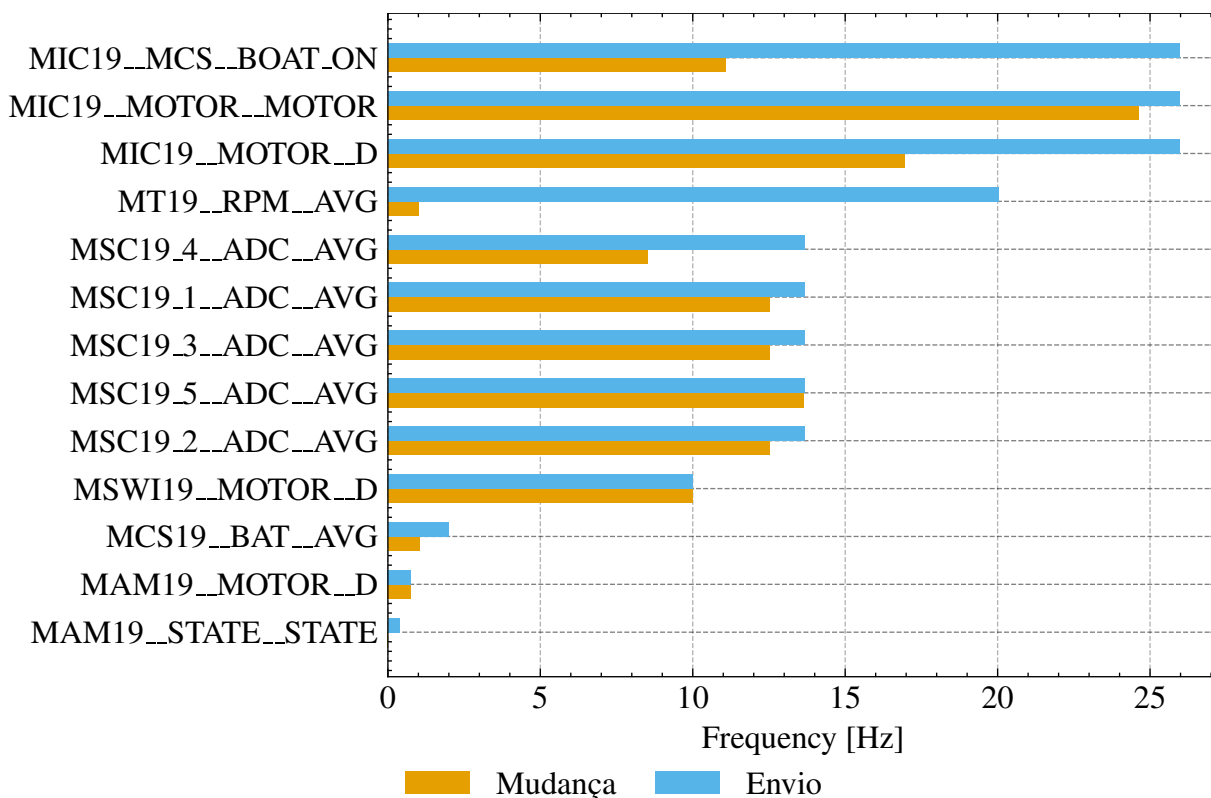
Para a escolha do período de reamostragem, a frequência de envio de cada mensagem, bem como a frequência de mudança de nível em cada sinal representado por tais mensagens, foram verificadas. A Figura 21 mostra a frequência para as mensagens que representam parte dos principais sinais de interesse: medidas de correntes e de tensões da bateria, de rotação do motor, e controles do piloto. Os 20 sinais relacionados à geração fotovoltaica foram ignorados aqui por estarem superamostrados, chegando a 532 Hz, enquanto os sinais mencionados, em uma análise conservadora, chegam a 25 Hz. Deste modo, após também levar em consideração a dinâmica de cada um destes sinais (devido à sua natureza), o autor decidiu utilizar 20 Hz como frequência para o sistema, muito embora a maior parte das dinâmicas se mantenha mesmo a 1 Hz.

Diferentes técnicas de reamostragem foram utilizadas para cada tipo de sinal. Para os sinais de natureza digital, como *flags* de estado, e de erro, utilizou-se a última amostra dentro do período, propagada adiante quando vazia. Para os sinais que representam grandezas físicas, como tensões, correntes, e rotação, bem como para os sinais de ciclo de trabalho (*duty cycle*), utilizou-se a média do período, realizando uma interpolação linear para preencher lacunas.

Um dos sinais que apresenta uma particularidade é o sensor de rotação. O módulo responsável, MT19, contava o número de pulsos por segundo, e convertia para rotações por minuto (RPM), e naturalmente, tendo apenas um ímã (ou seja, um único pulso por volta), sua resolução vertical torna-se quantizada em uma escada na qual cada degrau contabiliza 60 RPM. Nesse caso, o autor aplicou filtros passa-baixa em diferentes frequências, como mostrado na Figura 22 e visualmente escolheu aquele que acomodasse a dinâmica esperada. Tal filtro teve uma realização de defasagem nula, na frequência de corte de  $400 \times 10^{-3}$  Hz.

Outros sinais que requereram atenção particular constituíram o conjunto de sinais dos controladores de carga (hardware MCC18; assinatura MCC19). A mesma técnica do sinal de RPM foi aplicada, sendo escolhida a frequência de corte de 1 Hz,

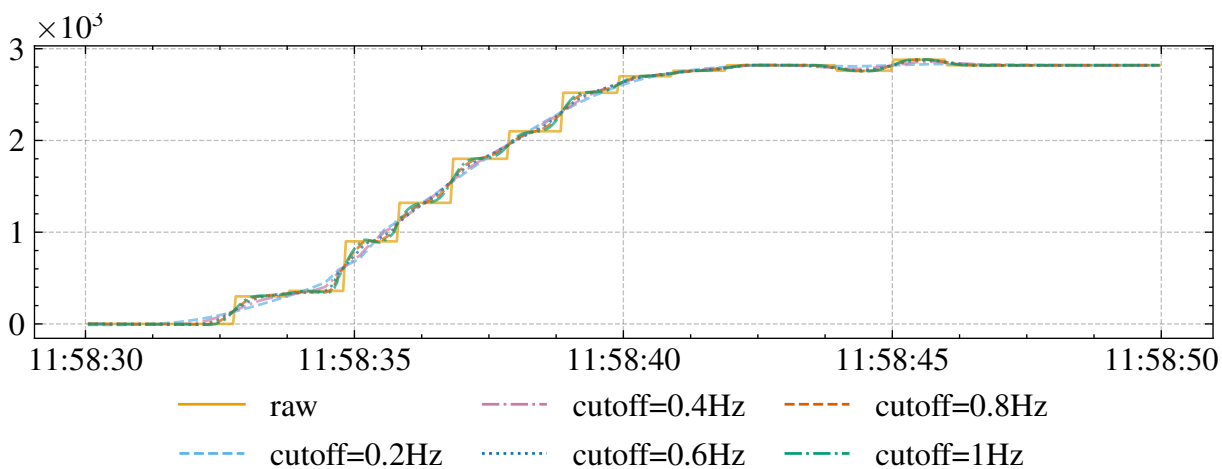
**Figura 21 – Taxas de envio e de mudança dos sinais principais**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Frequências de envio (Hz) e taxas de mudança dos sinais principais. Cada barra compara a taxa de publicação das mensagens CAN com a frequência de variação observada.

**Figura 22 – Comparação entre diferentes frequências de corte para o filtro do sinal de RPM do motor**



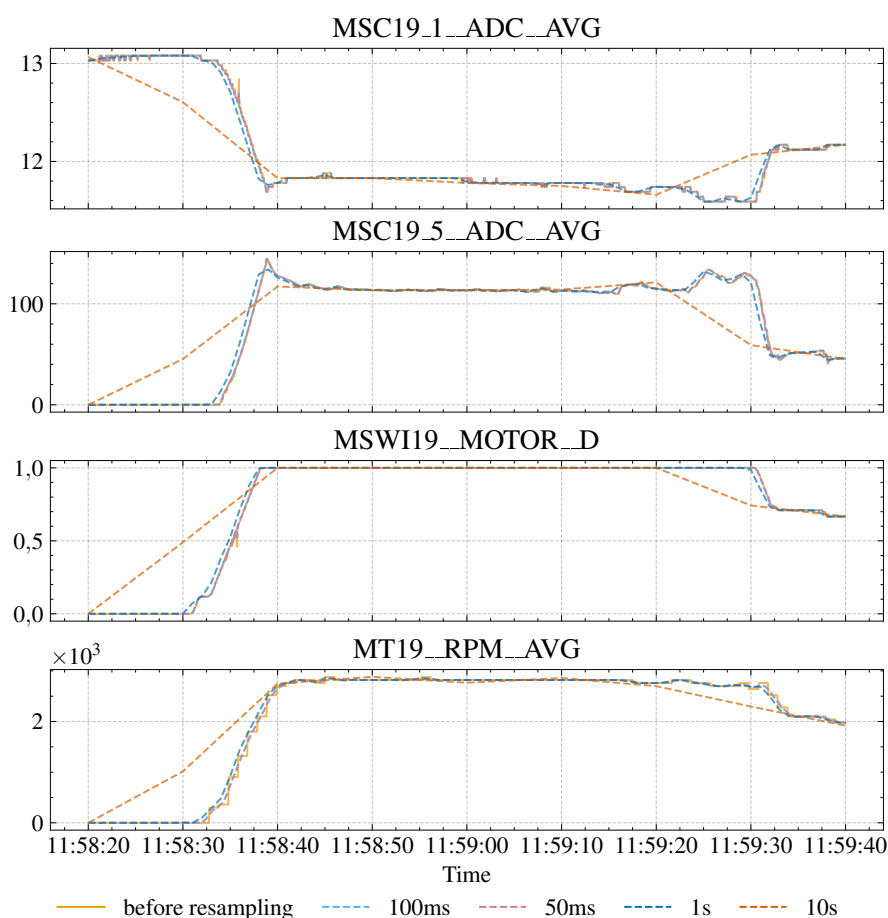
Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação do sinal de RPM do motor após filtragem passa-baixas com diferentes frequências de corte (0,2 a 1,0 Hz). O gráfico mostra o sinal bruto e as versões filtradas no intervalo analisado, evidenciando o compromisso entre suavização e transientes.

também de defasagem nula.

O resultado após a reamostragem pode ser observado nas Figuras 23, 24, e 25, nas quais se observa uma boa representação dos sinais físicos sob diferentes períodos de amostragem, e de melhor qualidade, como, por exemplo, sem artefatos de quantização ou ruído em excesso. Nota-se, também, que o sinal reamostrado a 10 Hz é insuficiente para representar a maior parte da dinâmica de tais sinais, sendo útil somente para processamentos que não visem a transitórios, ou caso uma aplicação necessite de melhor performance e aceite menor acurácia nos resultados.

**Figura 23 – Comparação entre diferentes períodos de reamostragem**



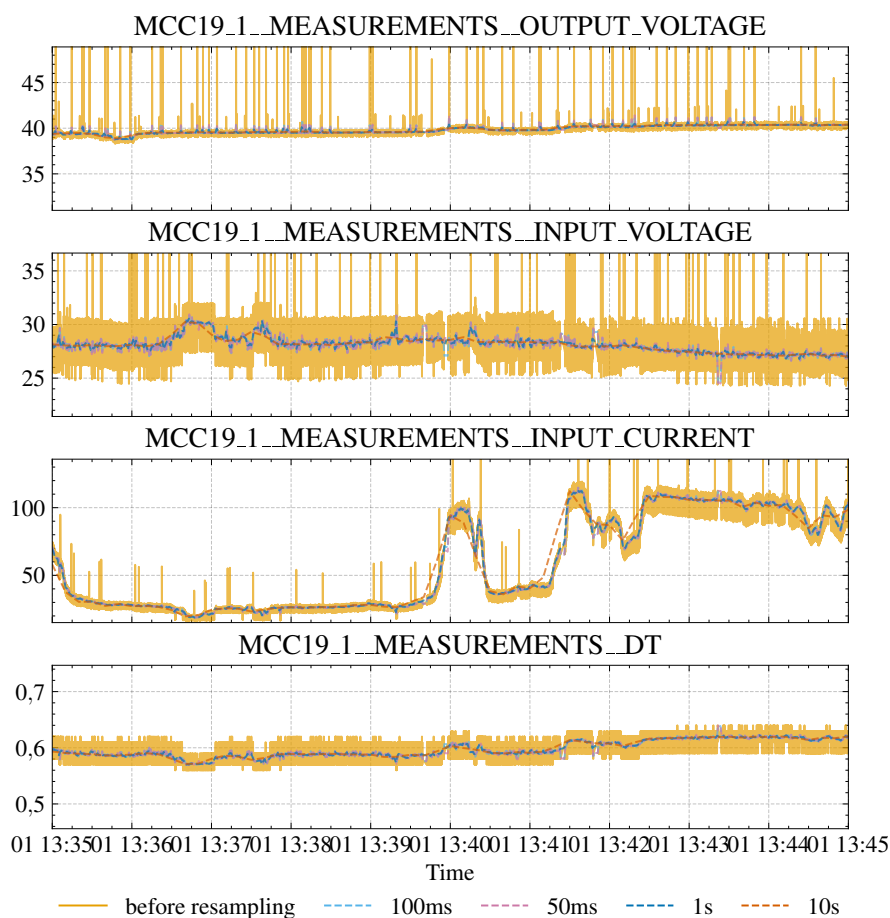
Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Efeito de diferentes períodos de reamostragem (50 ms, 100 ms, 1 s e 10 s) em sinais da bateria e do ESC. As séries são comparadas ao sinal original.

Após o último estágio da *pipeline*, que unificou os dados climáticos com os dados da embarcação, realizou-se visualmente um teste de alinhamento, mostrado na Figura 26, no qual se nota que, embora não perfeitamente, o contorno dos sinais de potência estimados acompanha a forma do sinal de potência estimado calculado utilizando o sinal climático como base ("Solar Input Power").

Para que o leitor entenda o tamanho dos dados processados, são 153 sinais

**Figura 24 – Comparação entre diferentes períodos de reamostragem**

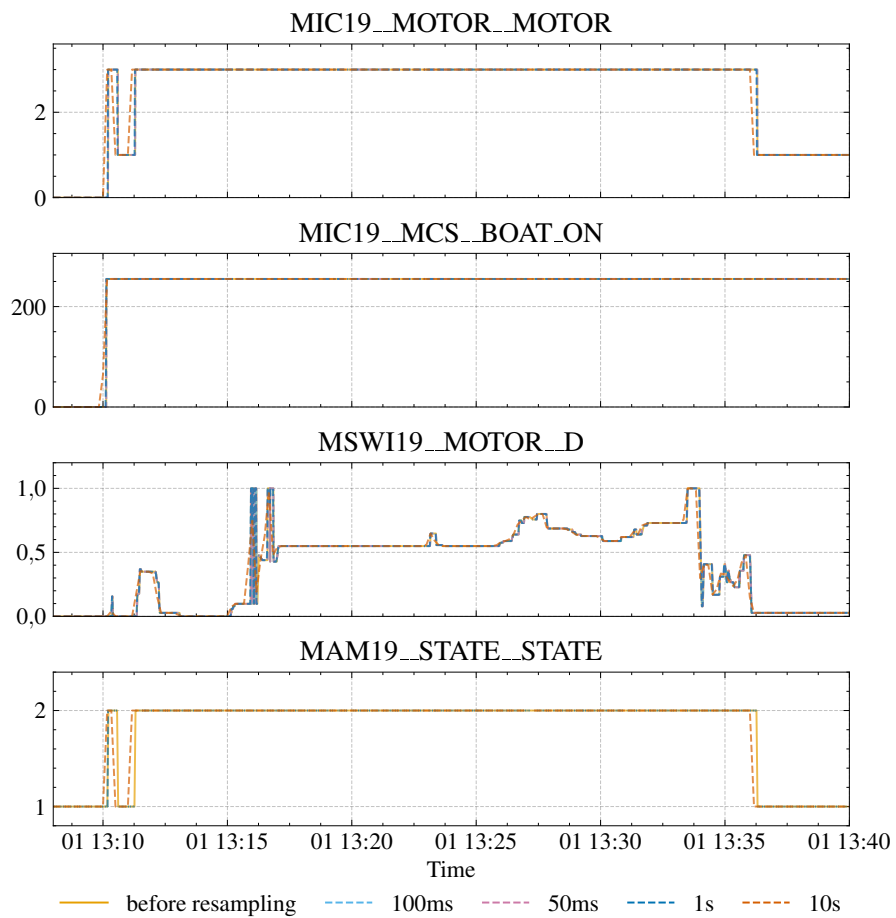


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação de períodos de reamostragem em sinais dos MPPTs (tensões de entrada/saída, correntes e ciclo de trabalho (*duty-cycle*)), evidenciando como a resolução temporal afeta a dinâmica observada.

que compreendem 5 provas distribuídas em 4 dias de competição, contendo de 20 a 40 horas de sinais contínuos, que na reamostragem de 50 milissegundos, se traduz em 6 milhões de amostras — uma matriz de 153 colunas por 6 milhões de linhas. Apesar disso, pela natureza modular do sistema da embarcação, há apenas cerca de 10 horas de dados contínuos em que todos os sinais estão presentes — em algumas provas, alguns módulos não essenciais não estavam operacionais, ou falharam no decorrer da prova, como é o caso de alguns dos sensores. A Figura 27 ilustra a presença de cada um dos módulos da embarcação durante o período da competição, destacando em vermelho a região onde todos os módulos estão presentes.

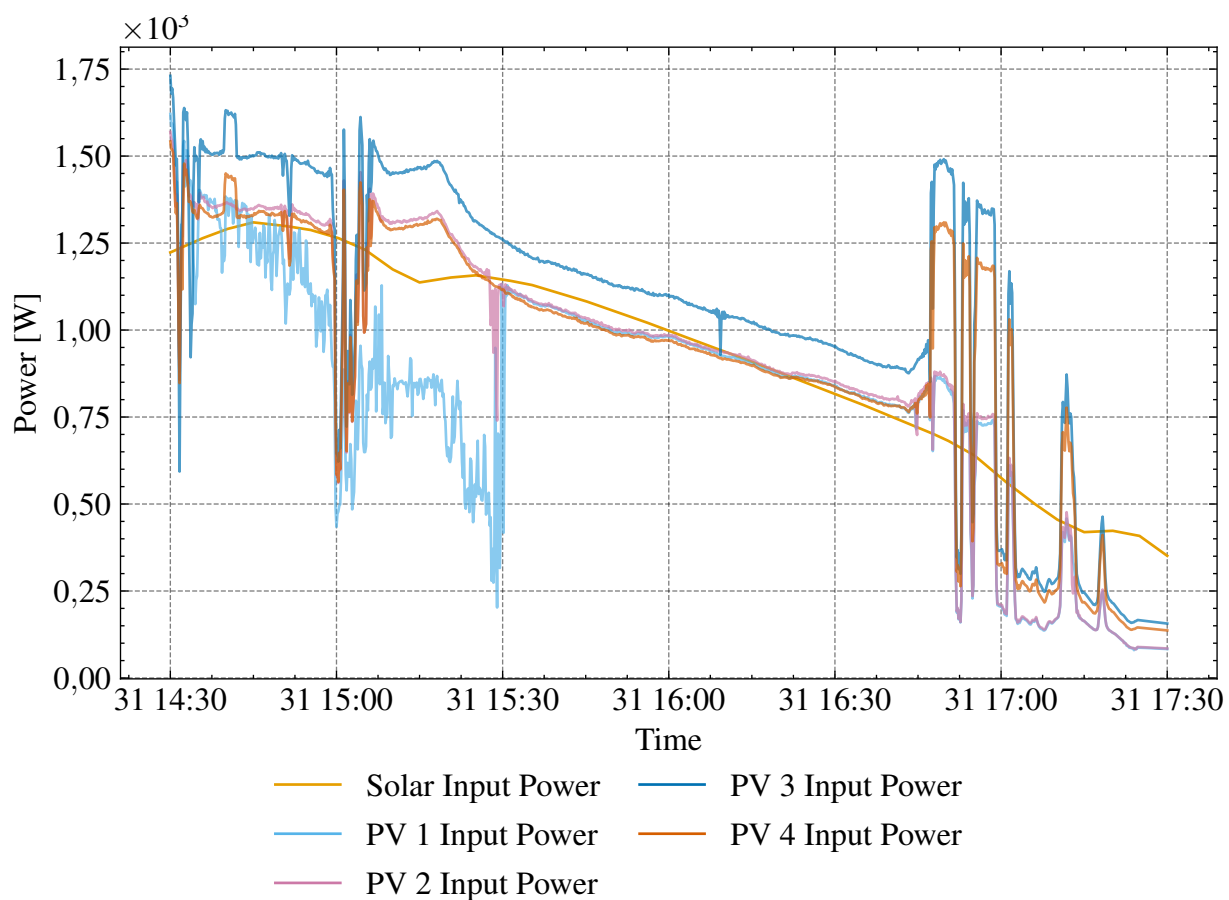
Figura 25 – Comparação entre diferentes períodos de reamostragem



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação de períodos de reamostragem para sinais de comando, estado do MAM e rotação do motor. As curvas reamostradas são confrontadas com o sinal original.

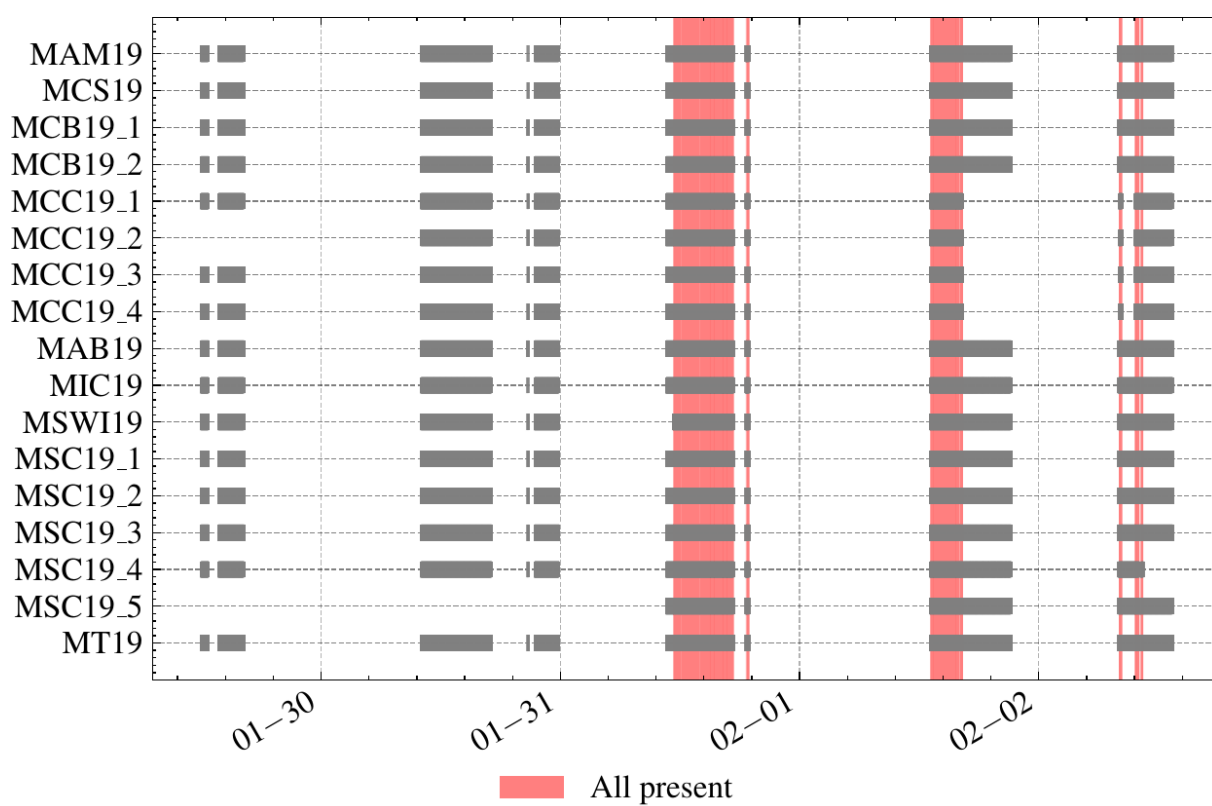
Figura 26 – Verificação de alinhamento após união com dados climáticos



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação temporal entre potência solar estimada (dados climáticos) e potência de entrada dos MPPTs. O gráfico mostra a potência agregada e as entradas de cada MPPT no mesmo intervalo.

Figura 27 – Presença dos módulos no tempo



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Presença dos módulos CAN ao longo do tempo. Cada bloco cinza mostra quando um módulo esteve ativo, em vermelho são destacados períodos em que todos os módulos estão presentes.

## 5.2 Dados climáticos

Para obter séries históricas de irradiância solar, o autor optou pela base de dados da Solcast (SOLCAST, 2020). A escolha se justifica pela maior resolução temporal e espacial, assim como pela maior disponibilidade em comparação com os demais serviços disponíveis para o território brasileiro, como os apresentados, e comparados por (SANTOS *et al.*, 2020),

De acordo com a comparação feita por Santos *et al.* (2020), se o custo for deixado de lado, a Solcast se destaca por oferecer alta resolução espacial (1 a 2 km) e temporal (na época, 15 minutos). É interessante notar a versatilidade dos dados oferecidos pela plataforma: dados históricos, em tempo real, e previsões, cobrindo diversos cenários e futuras integrações possíveis para este trabalho.

Embora seja uma solução comercial, o acesso aos dados de alta resolução (hoje, 5 minutos) foi concedido gratuitamente para fins acadêmicos após contato com a empresa por parte do autor.

O processamento dos dados brutos fornecidos pela API da Solcast é realizado pelo *script* `<solarboat_data_pipeline/lib/process_solcast_historic_data.py>` (CARDOSO, 2026a), o qual, a partir do arquivo CSV baixado da plataforma, renomeia as variáveis para mais fácil acesso ("dni", "ghi", "dhi", "airmass", "albedo"), além de escolher o índice da série temporal como "PeriodStart", convertendo-o para o fuso horário local da embarcação.

Como uma nota de implementação, o autor destaca o processamento para cálculo da Irradiância no plano do arranjo (*Plane-of-Array Irradiance* – POA) a partir dos componentes de Irradiância direta normal (*Direct Normal Irradiance* – DNI), Irradiância global horizontal (*Global Horizontal Irradiance* – GHI) e Irradiância difusa horizontal (*Diffuse Horizontal Irradiance* – DHI). Aqui, os *timestamps* são deslocados, em meio período ( $T/2$ ), de modo a centralizar a estimativa da posição solar no intervalo de amostragem, e por fim é utilizada a biblioteca "PVLlib" (ANDERSON *et al.*, 2023) para calcular os componentes da irradiação total utilizando o modelo de céu isotrópico e o modelo de massa de ar de Kasten-Young (1989).

A frequência nativa dos dados é inferida<sup>2</sup> e a energia acumulada é calculada por integração trapezoidal da irradiância POA utilizando `"scipy.integrate.cumtrapz"`. O resultado é exportado em formato CSV. A unificação subsequente faz o reindexamento desses dados para os registros de tempo da telemetria e aplica interpolação linear (`".interpolate(method='linear')"`) antes de sua junção.

<sup>2</sup> por diferenciação de seu *timestamps*.

### 5.3 Dados de geolocalização

Não existem registros de geolocalização disponíveis para a competição de 2020; porém, dados de GPS referentes à competição de 2022 foram obtidos por meio do *smartphone* do piloto, registrados pelo aplicativo *Strava* e exportados em formato GPX.

Para integrar essas informações aos dados da telemetria da embarcação, os arquivos brutos são processados pelo *script* `<solarboat_data_pipeline/lib/process_gpx_data.py>` (CARDOSO, 2026a). A ingestão utiliza a biblioteca "gpx\_converter", que extrai latitude, longitude e *timestamps*. Essa série temporal é normalizada para o fuso horário "America/Sao\_Paulo" e filtrada.

Como o GPX traz apenas uma série temporal de posição, derivam-se grandezas cinemáticas que descrevem o movimento da embarcação. O rumo ("heading") é calculado trigonometricamente entre pontos subsequentes utilizando "arctan2", e a velocidade instantânea é derivada da razão entre a distância percorrida (computada por meio da fórmula de Haversine) e o intervalo de tempo entre amostras.

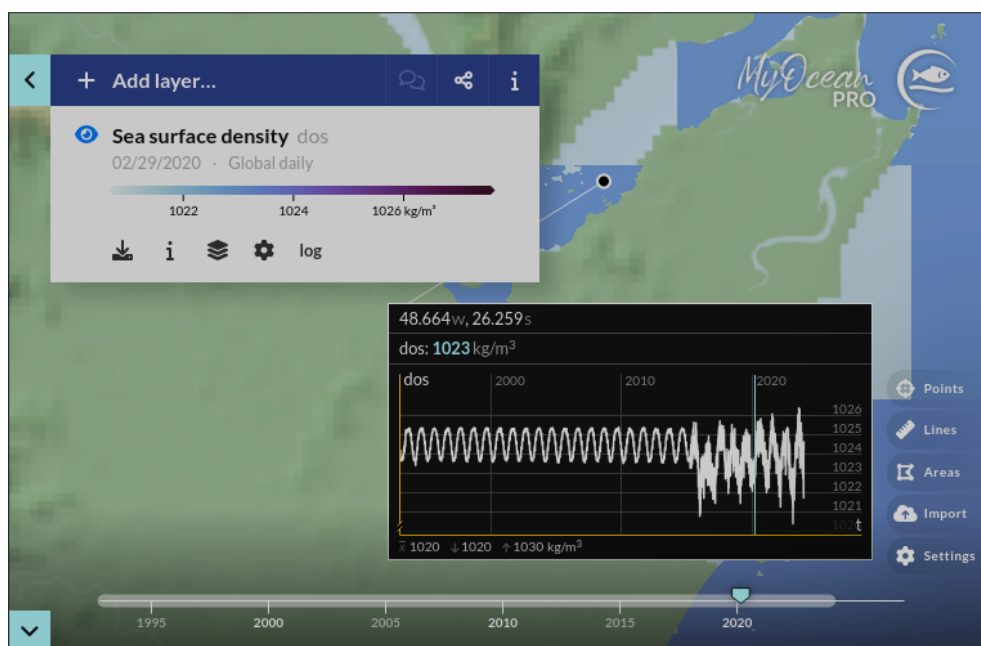
Como os dados de GPS e os dados da telemetria têm taxas (e instantes) de amostragem diferentes, a integração exige uma sincronização, e reamostragem. A sincronização utiliza o reindexamento da série de GPS para os instantes de tempo exatos da telemetria, enquanto a reamostragem utiliza o método *forward-fill* ("ffill"), que propaga a última posição e velocidade conhecidas até a próxima observação temporal, de modo que cada linha do banco de dados final (HDF5) tenha informações de geolocalização válidas, identificadas pelo prefixo "gps\_".

### 5.4 Dados oceanográficos

Para os parâmetros hidrodinâmicos necessários, foram levantados os dados oceanográficos locais referentes ao período e ao local da competição. Utilizando o serviço My Ocean Pro, foram acessados os dados do Copernicus Marine Service (European Union-Copernicus Marine Service, 2020) e extraídos os valores de densidade, salinidade, e temperatura da água do mar para a região de São Francisco do Sul na data de 29 de fevereiro de 2020, como mostrados nas figuras 28 e 29.

Tais dados foram então inseridos na ferramenta online *Water Properties Calculator* (WATER... , 2025), como mostrado na Figura 30, para estimar a viscosidade dinâmica da água, resultando em uma salinidade de 34,97 ppt, uma densidade de  $1,023 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , uma temperatura de 26,53 °C, e uma viscosidade dinâmica de  $926,8 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$ .

Figura 28 – My Ocean Pro — densidade



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura do My Ocean Pro (Copernicus Marine Service) com o campo de densidade superficial do mar. O marcador está na posição de São Francisco do Sul (aprox. 48,66 W; 26,26 S) na data de 29/02/2020, com valor local de densidade em torno de  $1,023 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; a legenda de cores mapeia a variação espacial da densidade na região mostrada.

Figura 29 – My Ocean Pro — salinidade



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura do My Ocean Pro com o campo de salinidade superficial do mar. O ponto de interesse em São Francisco do Sul (aprox. 48,66 W; 26,26 S) em 29/02/2020 apresenta salinidade local de 34,97 ppt; a barra de cores indica o gradiente espacial de salinidade no entorno, usado como referência para a condição de contorno hidrodinâmica adotada.

Figura 30 – Water Properties Calculator

[Home](#) | [Articles](#) | [Calculators](#) | [Snapshots](#) | [Links](#)

### Water Properties Calculator

\* Special thanks to the SEAWATER LAB team at MIT.  
\* Special thanks to Boomer from [www.reefcentral.com](http://www.reefcentral.com) for his help.

---

This calculator estimates various properties of surface seawater at a given salinity and temperature, assuming that pressure is held constant at 0.1 MPa (1 atm). The code is based on MATLAB algorithms released in the [The Seawater Thermophysical Properties Library](#)[1]

[1] Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V, and Syed M. Zubair  
Thermophysical Properties of Seawater: A Review of Existing Correlations and Data  
Desalination and Water Treatment, Vol. 16, pp.354-380, April 2010.

<p>Water Salinity: <input type="text" value="34.97"/> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Parts-Per-Thousand (ppt)</span></p> <p>Water Temperature: <input type="text" value="26.53"/> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Celsius/Centigrade</span></p> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="Calculate"/></p>	<p>Specific Heat: <input type="text" value="4.002"/> kJ/kg*K</p> <p>Latent Heat of Vaporization: <input type="text" value="2.353"/> kJ/kg</p> <p>Dynamic Viscosity: <input type="text" value="0.0009268"/> kg/m*s</p> <p>Surface Tension: <input type="text" value="0.07259"/> N/m</p> <p>Vapor Pressure: <input type="text" value="3399.39"/> N/m<sup>2</sup></p>	<p>Boiling Point Elevation: <input type="text" value="0.3128"/> K</p> <p>Thermal Conductivity: <input type="text" value="0.61083"/> W/m*K</p> <p>Specific Enthalpy: <input type="text" value="105.876"/> kJ/kg</p> <p>Specific Entropy: <input type="text" value="0.37"/> kJ/kg</p> <p>Osmotic Coefficient: <input type="text" value="0.9071"/></p>
--	--	---

---

Copyright © 2010-2025 Hamza Muhammad Arain.  
For more information please contact me [directly](#), or as "TheH" on [www.reefcentral.com](http://www.reefcentral.com)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Tela do *Water Properties Calculator* com os parâmetros inseridos para água do mar superficial (salinidade 34,97 ppt e temperatura 26,53 °C a  $100 \times 10^{-3}$  MPa). A interface apresenta, entre outras propriedades calculadas, densidade  $1,023 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> e viscosidade dinâmica  $926,8 \times 10^{-6}$  kg m<sup>-1</sup> s, valores utilizados nos parâmetros hidrodinâmicos do estudo.

## 5.5 Pós-processamento

Para facilitar o uso dos dados nos processos de modelagem e parametrização, uma última etapa de processamento se faz necessária. Esta etapa, porém, é separada das anteriores, pois é inerente à topologia, e ao funcionamento da embarcação em cada edição da competição: a tradução dos dados enviados por cada módulo na rede CAN para sinais interpretáveis, o que depende do posicionamento dos sensores, das conexões elétricas, assim como da semântica de cada versão de *firmware*.

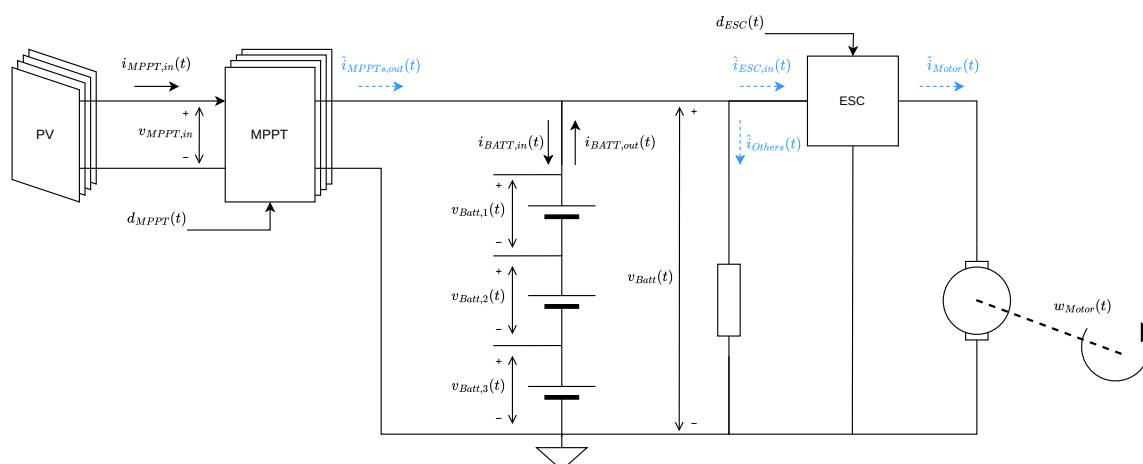
Apesar de existirem 153 mensagens distintas na rede, o corpo que integra este trabalho se resume ao conjunto mínimo de sinais suficientes para representar o funcionamento dinâmico e energético da embarcação — tensões, correntes, sinais de controle (*duty-cycle*), e a rotação no eixo do motor, além dos sinais de velocidade longitudinal e irradiação solar — o que nos permite descartar a grande maioria dos sinais, restando apenas alguns deles, os quais são descritos na lista abaixo:

- Módulo Controlador de Carga (hardware MCC18; assinatura MCC19) "MCC19\_x";  
"x" de 1 a 4:
  - "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_INPUT\_VOLTAGE": tensão de entrada do painel "x";

- "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_INPUT\_CURRENT": corrente de entrada do painel "x";
- "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_OUTPUT\_VOLTAGE": tensão de saída da bateria principal;
- "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_DT": *duty-cycle*, controlado pelo *firmware*;
- Módulo Tacômetro 2019 "MT19":
  - "MT19\_\_RPM\_\_AVG": rotação angular no eixo do motor em *RPM*;
- Módulo de Interface de Controle "MIC19", controlado pelo piloto:
  - "MIC19\_\_MCS\_\_BOAT\_ON": chave para ligar o barco;
  - "MIC19\_\_MOTOR\_\_MOTOR": chave para ligar motor;
  - "MIC19\_\_MOTOR\_\_D": potenciômetro (analógico) para controlar o motor;
- Módulo de interface na direção 2019 "MSWI19", controlado pelo piloto:
  - "MSWI19\_\_MOTOR\_\_D": potenciômetro (digital) para controlar o motor;
- Módulo de Carregamento do Sistema "MCS19":
  - "MCS19\_\_BAT\_\_AVG": tensão da bateria principal;
- Módulo de Sensor CAN 2019 "MSC19\_x" "x" de 1, 2, 3, 4, e 5:
  - "MSC19\_1\_\_ADC\_\_AVG": tensão da bateria 1;
  - "MSC19\_2\_\_ADC\_\_AVG": tensão da bateria 2;
  - "MSC19\_3\_\_ADC\_\_AVG": tensão da bateria 3;
  - "MSC19\_4\_\_ADC\_\_AVG": corrente de entrada da bateria;
  - "MSC19\_5\_\_ADC\_\_AVG": corrente de saída da bateria;
- Módulo de Acionamento do Motor 2019 "MAM19":
  - "MAM19\_\_MOTOR\_\_D": *duty-cycle* efetivamente aplicado no conversor;

O diagrama elétrico simplificado ilustrado na Figura 31 mostra onde estão posicionadas as grandezas mensuradas pelos sinais mencionados acima, representadas com setas sólidas, enquanto os sinais de interesse, porém não medidos, estão em linhas tracejadas azuis.

Figura 31 – Localização dos sinais medidos



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Diagrama elétrico simplificado do sistema com pontos de medição. Setas contínuas representam grandezas instrumentadas (correntes e tensões nos MPPTs, banco de baterias e ESC) e setas tracejadas representam sinais de interesse não medidos. O diagrama inclui PV, MPPT, banco de baterias e propulsão.

A relação entre as mensagens da rede CAN e os sinais do circuito elétrico acima é listada abaixo:

- "MSWI19\_\_MOTOR\_\_D" e "MIC19\_\_MOTOR\_\_D" representam  $d_{ESC}(t)$ ;
- "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_INPUT\_VOLTAGE" representa  $v_{MPPTx,in}(t)$ ;
- "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_INPUT\_CURRENT" representa  $i_{MPPTx,in}(t)$ ;
- "MCC19\_x\_\_MEASUREMENTS\_\_OUTPUT\_VOLTAGE" representa  $v_{MPPTx,out}(t)$ ;
- "MSC19\_1\_\_ADC\_\_AVG" representa  $v_{Batt,1}(t)$ ;
- "MSC19\_2\_\_ADC\_\_AVG" representa  $v_{Batt,2}(t)$ ;
- "MSC19\_3\_\_ADC\_\_AVG" representa  $v_{Batt,3}(t)$ ;
- "MSC19\_4\_\_ADC\_\_AVG" representa  $i_{Batt,in}(t)$ ;
- "MSC19\_5\_\_ADC\_\_AVG" representa  $i_{Batt,out}(t)$ ;
- "MCS19\_\_BAT\_\_AVG" representa  $v_{Batt}(t)$ ;
- "MT19\_\_RPM\_\_AVG" representa  $w_{Motor}(t)$ ;

Considerando a corrente positiva quando a bateria está descarregando, temos que:

$$v_{Batt}(t) = v_{Batt,1}(t) + v_{Batt,2}(t) + v_{Batt,3}(t) = v_{MPPTx,out}(t) \quad (5.1)$$

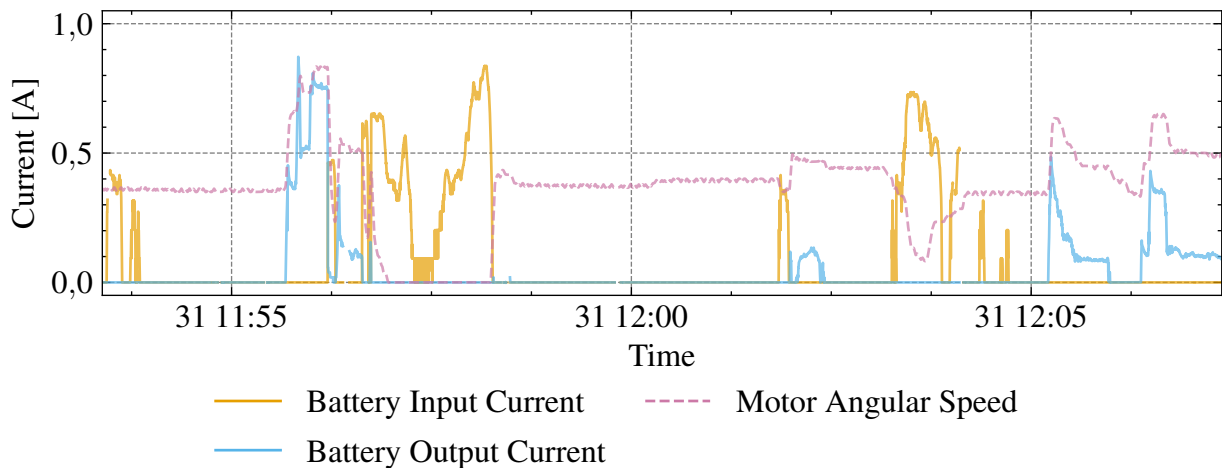
$$i_{Batt}(t) = i_{Batt,out}(t) - i_{Batt,in}(t) \quad (5.2)$$

A partir disso, a relação dos sinais mensurados com os sinais não mensurados (que precisam ser estimados) se dá por:

$$i_{Batt}(t) = i_{Batt,out}(t) - i_{Batt,in}(t) = \hat{i}_{ESC,in}(t) + \hat{i}_{Others,in}(t) - \hat{i}_{MPPTs,out}(t) \quad (5.3)$$

Para ilustrar a dinâmica dos sinais de corrente, foram plotados na Figura 32, os sinais normalizados dos sensores de corrente de entrada e saída da bateria, juntamente com a rotação angular como sinal auxiliar, que demonstra o barco em movimento. Para aproximadamente a mesma faixa de rotação (e provavelmente potência exigida) do motor, pode-se observar períodos de carga, de descarga, e períodos em que nenhuma corrente circula pelas baterias (ou, mais precisamente, não foi detectada pelos sensores). Isso significa que para que as correntes não medidas passem a ser conhecidas, é necessária uma estimativa dos estados internos que produzem as cargas dinâmicas do sistema.

**Figura 32 – Dinâmica das correntes com a embarcação em operação**



Fonte: Elaboração própria (2026).

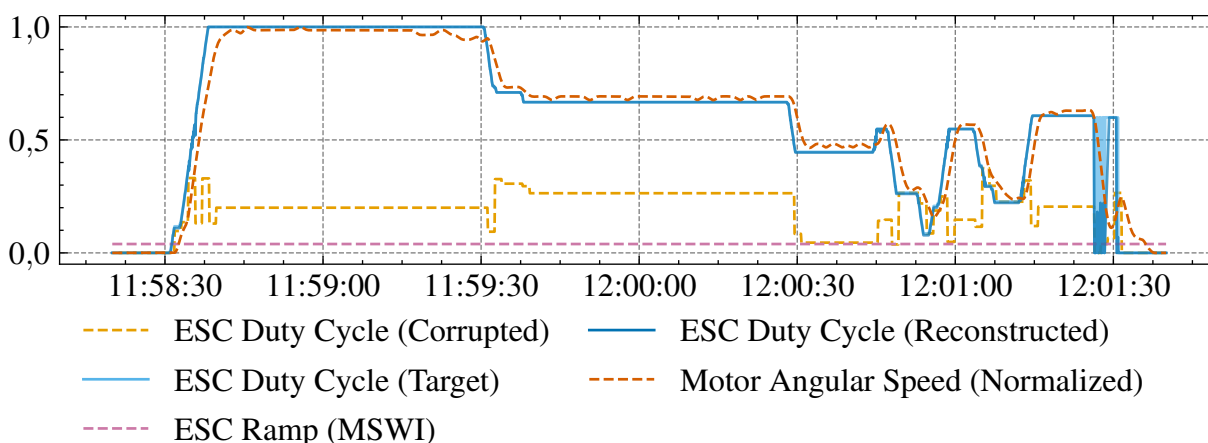
Legenda: Séries temporais das correntes de entrada e saída da bateria (em A) com a embarcação em operação, acompanhadas pela velocidade angular do motor como referência de demanda. O eixo temporal destaca janelas de carga, descarga e períodos sem corrente detectada, evidenciando a necessidade de estimativa das correntes não medidas.

Alguns dos sinais contidos nas mensagens CAN enviadas pelos diversos módulos apresentaram problemas e precisaram ser corrigidos antes de serem utilizadas na modelagem.

### 5.5.1 Reconstrução do *duty-cycle* do ESC

Devido a um erro no *firmware* do "MAM19", as mensagens "MAM19\_\_MOTOR\_\_D", que representam o sinal efetivamente aplicado no conversor, estão corrompidas por conta de um *overflow*: a representação interna do sinal cabe em um "uint16", mas foi empacotado na mensagem como um "uint8" sem nenhuma conversão. Tal *overflow* pode ser observado na Figura 33 — o sinal corrompido (*Corrupted*) nunca passando de aproximadamente  $330 \times 10^{-3}$

**Figura 33 – Reconstrução do sinal de ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do MAM**



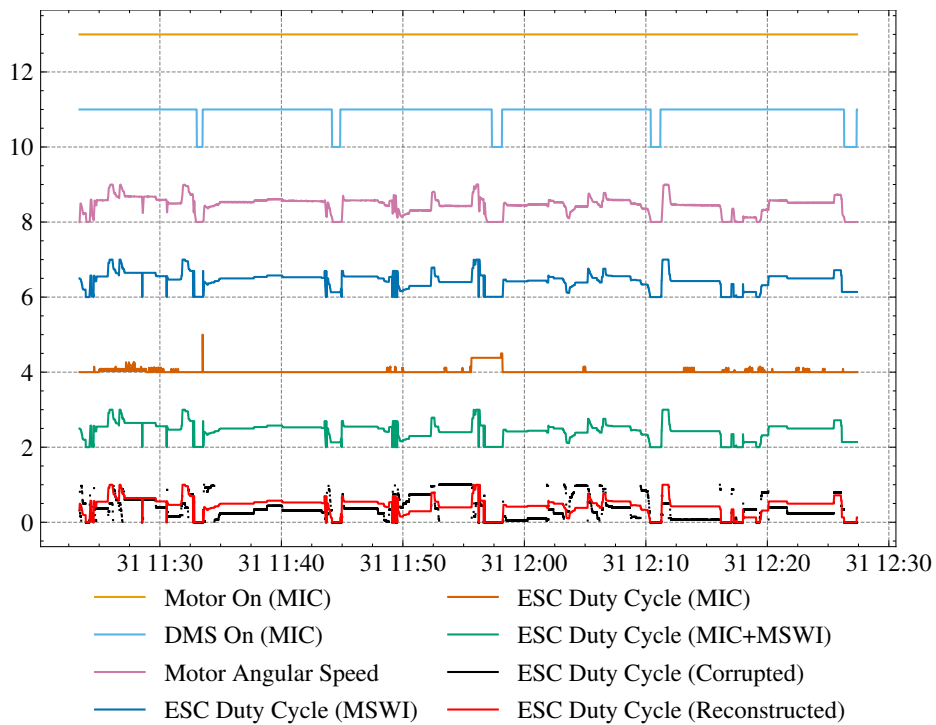
Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Reconstrução do ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do ESC no intervalo 11:58:30–12:01:30. A figura compara o sinal corrompido do MAM com o sinal reconstruído e o sinal alvo (*Target*), além de incluir a rampa do ESC (MSWI) e a velocidade angular do motor normalizada, mostrando a coerência temporal entre comando e resposta.

Como temos acesso a todos os sinais que alimentam o MAM19, e temos acesso ao seu *firmware*, podemos replicar seu comportamento em *Python* e utilizá-lo em uma simulação para reconstruir o seu sinal de *duty-cycle*.

O resultado pode ser observado nas Figuras 33 e 34, que mostram o sinal reconstruído (*Reconstructed*) acompanhando o sinal de entrada controlado pelo piloto, aqui chamado de *Target* (alvo), em comparação com o sinal originalmente corrompido. É possível, também, observar que os sinais têm uma forte correlação com a velocidade angular do motor, aqui normalizada no intervalo.

**Figura 34 – Reconstrução do sinal de ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do MAM**

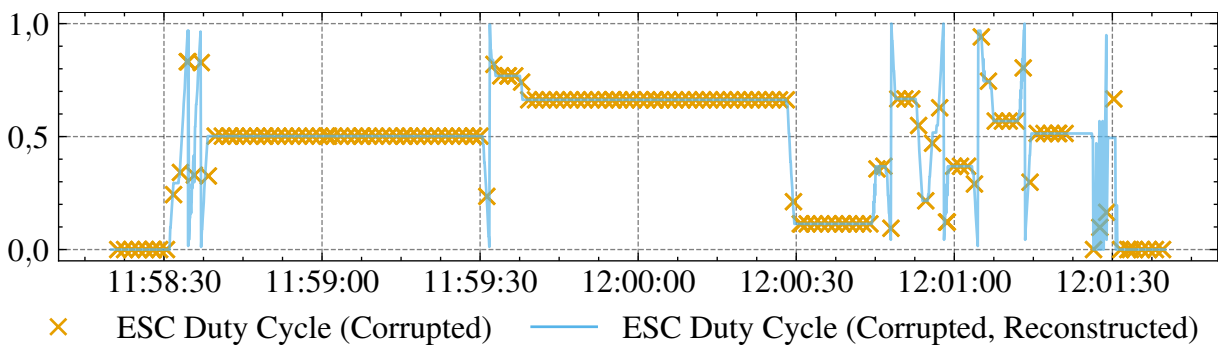


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação ampliada da reconstrução do ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do ESC ao longo de 11:30–12:30. São mostrados os sinais de controle do piloto (MIC), o ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do ESC obtido por diferentes fontes (MIC, MIC+MSWI), o sinal corrompido e o reconstruído, além da rotação do motor, permitindo verificar a consistência entre comando, reconstrução e dinâmica do atuador.

Para conferência do comportamento do *firmware* simulado em *Python*, o mesmo *bug* que causou a corrupção do sinal foi também implementada. Na Figura 35 podemos ver que o sinal corrompido reconstruído se alinha às amostras do sinal corrompido original, ou seja, o comportamento do *firmware* na simulação obedece ao comportamento real.

**Figura 35 – Reconstrução do sinal corrompido de ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do MAM**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Validação do modelo de corrupção do ciclo de trabalho (*duty-cycle*): o sinal corrompido reconstruído é comparado ao sinal corrompido original no intervalo 11:58:30–12:01:30, evidenciando que a simulação reproduz o comportamento de *overflow* do *firmware*.

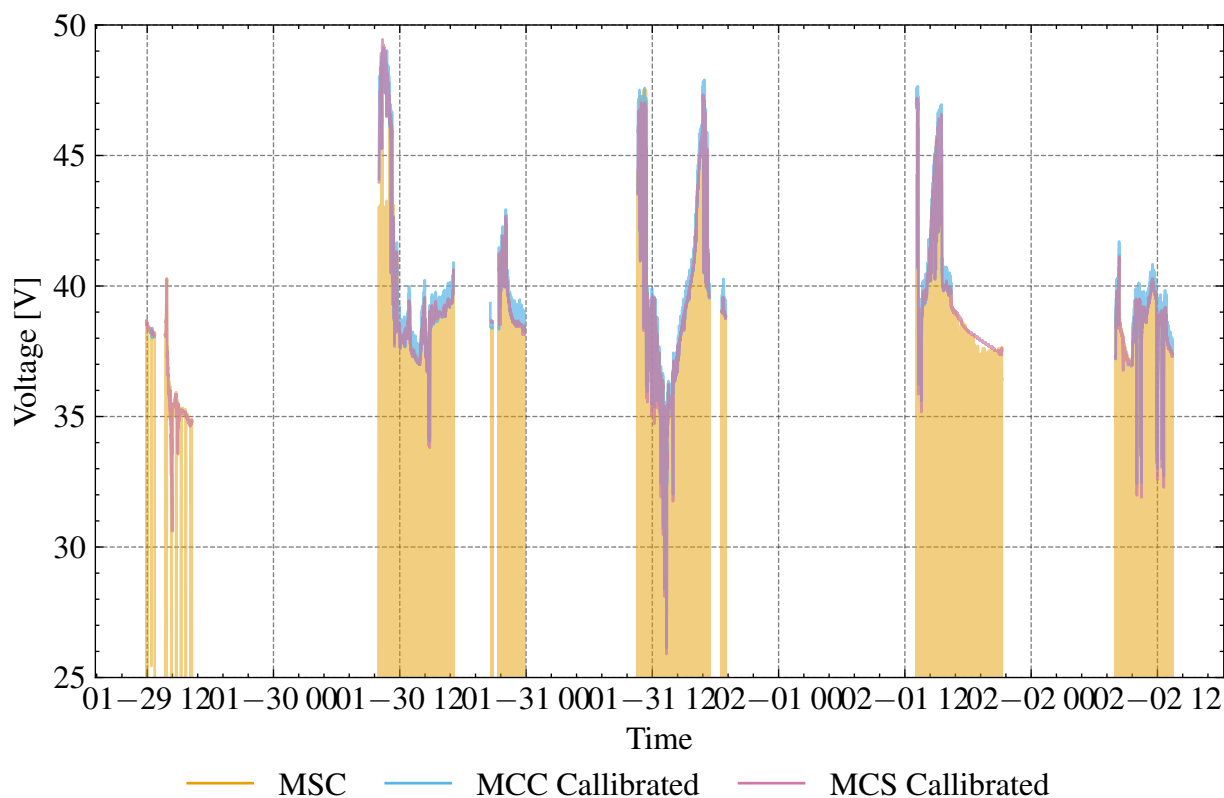
### 5.5.2 Reconstrução da tensão do banco de Baterias

Para a tensão das baterias, embora se tenha uma grande redundância, pois o sinal é medido por diferentes módulos, temos diferentes problemas em cada um dos sinais disponíveis:

- os sensores por célula ("MSC19\_1", "MSC19\_2", e "MSC19\_3") têm ruído elevado e, por vezes, tais sensores falharam intermitentemente, causando muitas descontinuidades;
- por outro lado, o sinal medindo a tensão do banco de baterias feito pelo "MCS19", que é o menos ruidoso, não foi calibrado;
- os módulos "MCB19\_1" e "MCB19\_2" também medem a tensão do banco, mas eles somente se conectam à bateria principal quando precisam carregar as baterias auxiliares, e por logística, isso era somente feito em intervalos entre as provas, portanto, a disponibilidade deste sinal é insuficiente;
- por fim, os sinais dos quatro "MCC"s são ruidosos mesmo após a filtragem realizada no estágio de reamostragem, e não estão muito bem calibrados.

Podemos calibrar tanto o "MSC19" quanto os "MCC"s com base nos momentos de disponibilidade dos sensores por célula "MSC19". A Figura 36 mostra o resultado ("MCC Calibrated" e "MCS Calibrated") para os sinais após calibragem, em comparação com a soma dos sinais dos sensores de cada bateria "MSC", com excesso de descontinuidades. Aqui, o gráfico está focando no intervalo de tensão entre 25 e 50, mas as descontinuidades dos "MSC" levam o sinal a zero.

Figura 36 – Medições da tensão do banco de baterias de diferentes fontes



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação das medições de tensão do banco de baterias obtidas por diferentes módulos ao longo de 29/01–02/02. A curva MSC (soma das células) apresenta descontinuidades, enquanto as séries calibradas MCS e MCC são mais estáveis; o gráfico foca a faixa de 25–50 V para evidenciar concordância e divergências entre as fontes após calibração.

### 5.5.3 Outros ajustes

Outros pequenos ajustes foram realizados, como, por exemplo, ajustes de escala para os sinais de rotação angular do motor (de rotações por minuto para radianos por segundo), e de *centi-amperes* para Amperes no caso dos sinais de corrente de entrada dos "MCC".

Além disso, no caso dos "MCC", foram removidos breves artefatos, e valores irrealis, possivelmente decorrentes de travamentos ou erros no *firmware*.

### 5.5.4 Dados exportados

Após todos os ajustes, os dados foram exportados para um "csv" de 2,5 GB, que será usado como fonte de dados pelos processos de parametrização e simulação descritos no decorrer das próximas seções.

## 5.6 Resumo dos dados pós-processados

Como resultado do processamento dos dados, temos 70 sinais distribuídos pelos 5 dias de competição, correspondendo a 7 milhões de observações ao longo do tempo, aqui reamostradas a 20 Hz.

Os principais sinais de cada subsistema de interesse deste trabalho podem ser acessados pelas colunas mostradas no Quadro 14.

Quadro 14 – Descrição dos sinais

Subsistema	Coluna	Descrição
Geração	"Solar POA"	Irradiância ( $W m^{-2}$ )
	"MPPT 1 Duty Cycle"	<i>duty-cycle</i> aplicado pelo controlador
	"MPPT 2 Duty Cycle"	
	"MPPT 3 Duty Cycle"	
	"MPPT 4 Duty Cycle"	
	"MPPT 1 Input Current"	Corrente de entrada no conversor
	"MPPT 2 Input Current"	
	"MPPT 3 Input Current"	
	"MPPT 4 Input Current"	
	"MPPT 1 Input Voltage"	Tensão de entrada no conversor
	"MPPT 2 Input Voltage"	
	"MPPT 3 Input Voltage"	
	"MPPT 4 Input Voltage"	
	"MPPT 1 Output Voltage"	Tensão de saída no conversor
"MPPT 2 Output Voltage"		
"MPPT 3 Output Voltage"		
"MPPT 4 Output Voltage"		
Bateria	"Battery Pack Voltage"	Tensão da bateria
	"Battery Current"	Corrente da bateria
	"Battery Input Current"	Corrente de entrada da bateria
	"Battery Output Current"	Corrente de saída da bateria
Propulsão	"ESC Duty Cycle"	<i>duty-cycle</i> aplicado ao conversor do ESC
	"Motor Angular Speed"	Velocidade angular no eixo do motor

Fonte: Elaboração própria (2026).

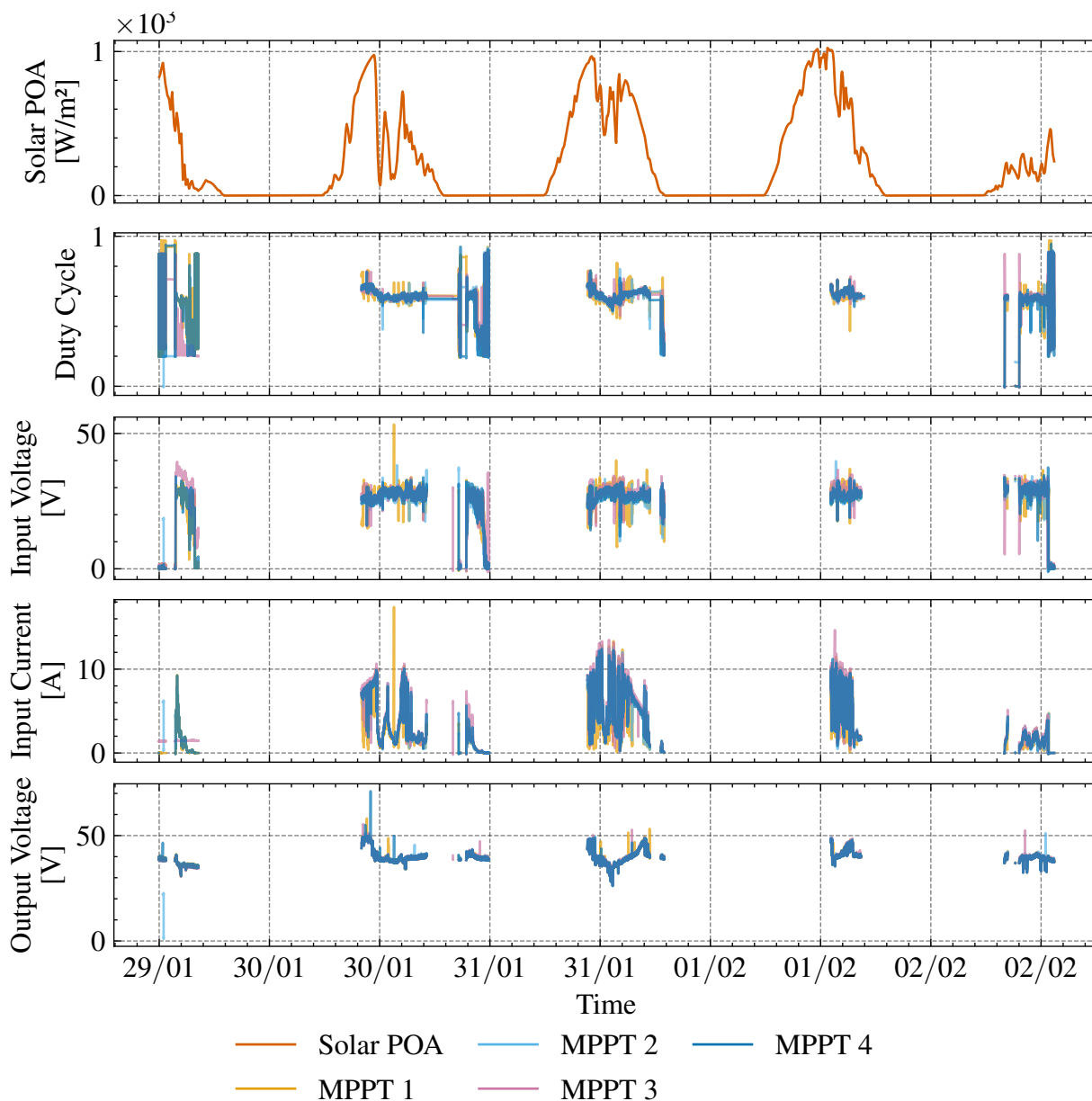
Os sinais do subsistema de geração energética, que compreende painéis fotovoltaicos e MPPTs, podem ser vistos na Figura 37, na qual se observa o sinal de irradiância, obtido pela integração com os dados climáticos da Solcast, seguido dos sinais medidos pelo próprio conversor.

Na Figura 38 podemos ver os sinais do subsistema da bateria, compreendendo a tensão e a corrente da bateria, além dos sinais isolados dos sensores de corrente de entrada e de saída.

Para o subsistema da propulsão, temos os sinais de *duty-cycle* do ESC e da rotação angular do motor, como mostrado na Figura 39.

Nestas figuras, podemos observar diversos blocos de dados divididos por espaços vazios, indicando a rotina de manutenção e descanso entre provas da competição.

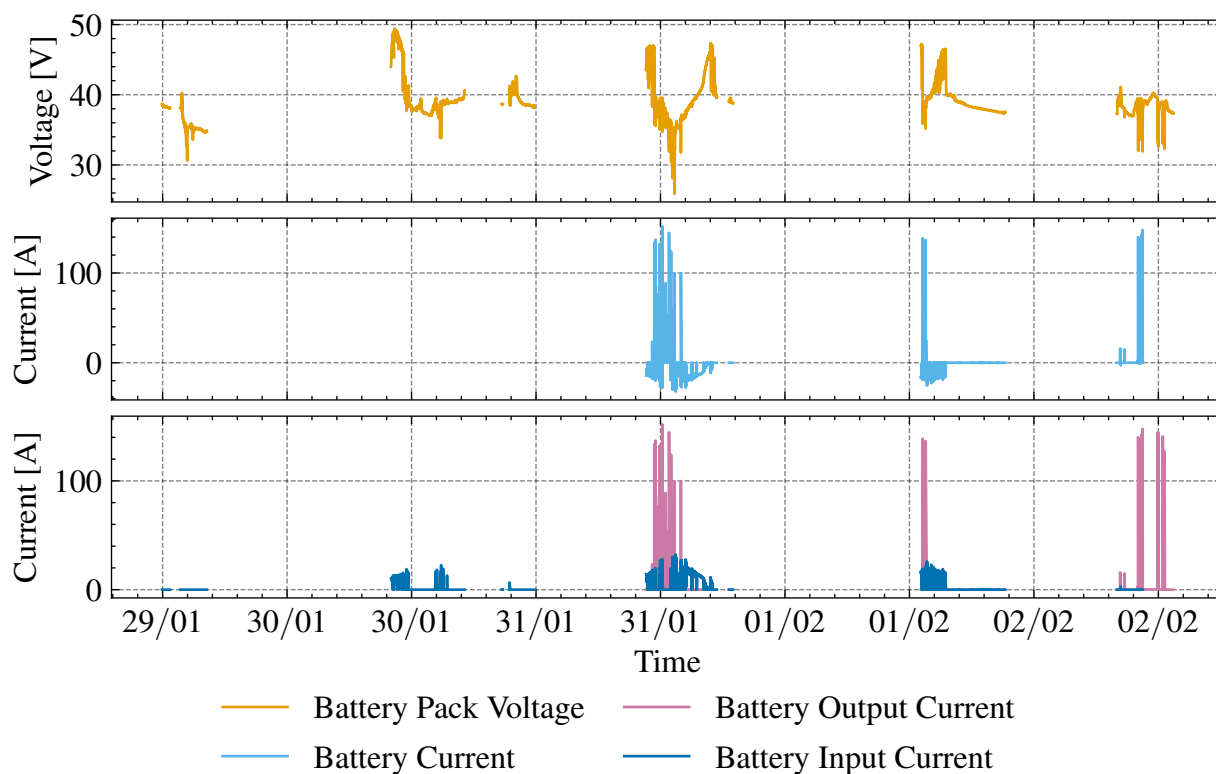
Figura 37 – Sinais da geração



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Séries temporais do subsistema de geração entre 29/01 e 02/02. São exibidos irradiância no plano do painel (*Solar POA*, W/m<sup>2</sup>), ciclo de trabalho dos conversores MPPT e tensões/correntes de entrada e saída (V e A). As curvas permitem observar a coerência entre variabilidade de irradiância, atuação dos MPPT e o condicionamento elétrico entregue ao barramento.

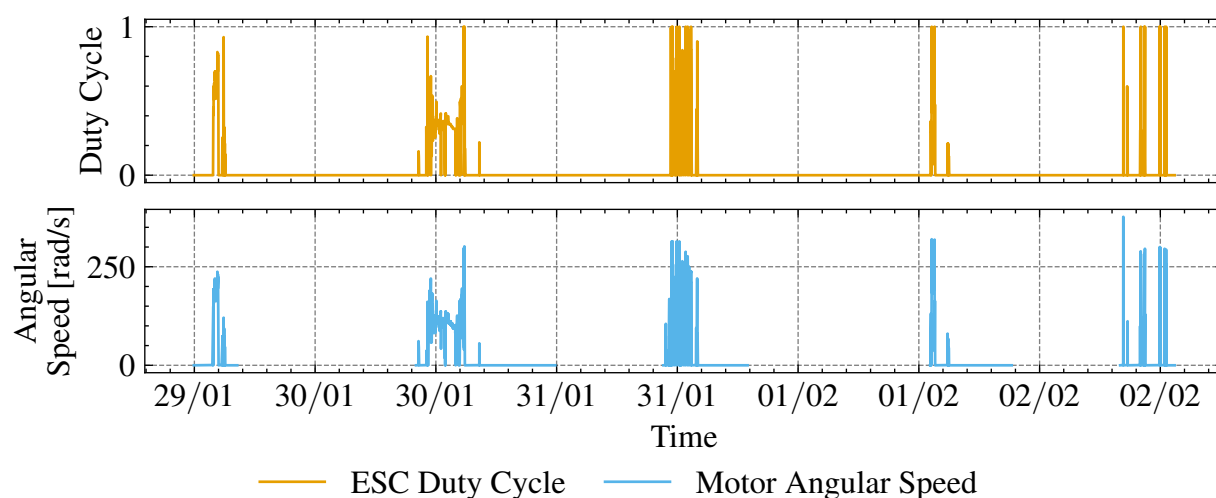
Figura 38 – Sinais da bateria



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Séries temporais do subsistema de bateria (29/01 a 02/02), com tensão do banco (V) e correntes de entrada e saída (A). O gráfico apresenta a tensão do *pack* e as correntes medidas em cada sentido de fluxo, permitindo identificar períodos de carga e descarga e sua relação com o perfil de operação do barco.

Figura 39 – Sinais da propulsão



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Sinais do subsistema de propulsão no período 29/01–02/02. O eixo superior mostra o ciclo de trabalho aplicado ao ESC e o inferior a velocidade angular do motor ( $\text{rad s}^{-1}$ ), permitindo relacionar a atuação do controlador com a resposta dinâmica do atuador ao longo da corrida.

## 6 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo, os modelos matemáticos utilizados para representar cada componente do sistema da embarcação solar são detalhados. A modelagem busca descrever o comportamento dinâmico e estático dos subsistemas mecânicos e elétricos, permitindo a simulação do desempenho energético e propulsivo.

### 6.1 Hélice

A hélice é modelada em condição de água livre (*open water*), na qual o empuxo e o torque são obtidos a partir de coeficientes adimensionais em função da razão de avanço  $J$ . Esta escolha permite representar a carga hidrodinâmica no eixo por meio de relações algébricas, compatíveis com simulações em tempo discreto (CARLTON, 2007; OOSTERVELD; OOSSANEN, 1975). Efeitos não estacionários (cavitação, ventilação, e dependências de Reynolds) não são representados explicitamente.

As relações a seguir utilizam a conversão entre velocidade angular e rotação, bem como as identidades de potência no eixo, e potência propulsiva útil. A eficiência em água livre é apresentada em duas formas equivalentes. As Eqs. 6.1–6.4 e 6.6–6.8 seguem a formulação clássica de água livre para hélices (CARLTON, 2007). Os polinômios para  $k_{Prop,t,ow}$  e  $k_{Prop,q,ow}$  (Eqs. 6.9–6.10) utilizam os coeficientes reportados para as séries B (OOSTERVELD; OOSSANEN, 1975). A Eq. 6.13 adota a aproximação da hélice como disco sólido.

Quadro 15 – Símbolos do modelo da hélice em água livre (*open water*)

Símbolo	Descrição (unidade)
$\omega_{Prop}(t)$	Velocidade angular da hélice ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$n_{Prop}(t)$	Rotação da hélice (Hz)
$u_{Prop,ow}(t)$	Velocidade de avanço em água livre ( $\text{m s}^{-1}$ )
$D_{Prop}$	Diâmetro da hélice (m)
$j_{Prop,ow}(t)$	Razão de avanço em água livre (–)
$\rho_{water}$	Densidade da água ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$k_{Prop,t,ow}(\cdot)$	Coefficiente de empuxo (–)
$k_{Prop,q,ow}(\cdot)$	Coefficiente de torque (–)
$k_{Prop,T_n}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}$ (–)
$k_{Prop,Q_n}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}$ (–)
$m$	Ordem do polinômio (–)
$t_{Prop,ow}(t)$	Empuxo em água livre (N)
$q_{Prop,ow}(t)$	Torque em água livre (N m)
$p_{Prop,in,ow}(t)$	Potência mecânica no eixo (W)
$p_{Prop,out,ow}(t)$	Potência propulsiva útil (W)
$\eta_{Prop,ow}(t)$	Eficiência em água livre (–)
$S_{Prop}$	Área do disco varrido ( $\text{m}^2$ )
$M_{Prop}$	Massa da hélice (kg)
$I_{Prop,r}$	Inércia rotacional da hélice ( $\text{kg m}^2$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$n_{Prop}(t) = \frac{\omega_{Prop}(t)}{2\pi} \quad (6.1)$$

$$p_{Prop,in,ow}(t) = \omega_{Prop}(t)q_{Prop,ow}(t) \quad (6.2)$$

$$p_{Prop,out,ow}(t) = t_{Prop,ow}(t)u_{Prop,ow}(t) \quad (6.3)$$

$$\eta_{Prop,ow}(t) = \frac{j_{Prop,ow}(t)k_{Prop,t,ow}(j_{Prop,ow}(t))}{2\pi k_{Prop,q,ow}(j_{Prop,ow}(t))} \quad (6.4)$$

$$\eta_{Prop,ow}(t) = \frac{p_{Prop,out,ow}(t)}{p_{Prop,in,ow}(t)} \quad (6.5)$$

$$j_{Prop,ow}(t) = \frac{u_{Prop,ow}(t)}{D_{Prop}n_{Prop}(t)} \quad (6.6)$$

$$t_{Prop,ow}(t) = D_{Prop}^4 \rho_{water} k_{Prop,t,ow}(j_{Prop,ow}(t)) n_{Prop}^2(t) \quad (6.7)$$

$$q_{Prop,ow}(t) = D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Prop,q,ow}(j_{Prop,ow}(t)) n_{Prop}^2(t) \quad (6.8)$$

$$k_{Prop,t,ow}(j_{Prop,ow}(t)) = \sum_{n=0}^m j_{Prop,ow}^n(t) k_{Prop,T_n} \quad (6.9)$$

$$k_{Prop,q,ow}(j_{Prop,ow}(t)) = \sum_{n=0}^m j_{Prop,ow}^n(t) k_{Prop,Q_n} \quad (6.10)$$

$$p_{Prop,in,ow}(t) = 2\pi D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Prop,q,ow}(j_{Prop,ow}(t)) n_{Prop}^3(t) \quad (6.11)$$

$$S_{Prop} = \frac{\pi D_{Prop}^2}{4} \quad (6.12)$$

$$I_{Prop,r} = \frac{D_{Prop}^2 M_{Prop}}{8} \quad (6.13)$$

## 6.2 Casco

O casco é modelado no eixo longitudinal, descrevendo a evolução da velocidade  $u_{Hull}(t)$  a partir do balanço entre a força propulsiva e a resistência ao avanço. A resistência efetiva  $r_{Hull}(t)$  é representada por uma equação quadrática em função da velocidade, agregando as contribuições aerodinâmicas e hidrodinâmicas por meio de um coeficiente equivalente (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017). A massa adicionada  $M_{Hull,a}$  é considerada para representar o efeito inercial do fluido acelerado juntamente com a embarcação (BIRK, 2019).

As potências mecânicas associadas ao avanço são calculadas a partir das forças e da velocidade, permitindo definir um coeficiente de eficiência  $\eta_{Hull}(t)$  para fins de análise energética.

$$\frac{d}{dt}u_{Hull}(t) = \frac{(1 - T_{Hull,ded}) t_{Prop}(t) - r_{Hull}(t)}{M_{Hull,a} + M_{Hull}} \quad (6.14)$$

$$r_{Hull,t}(t) = \frac{C_{Hull,T} (S_{Hull,air} \rho_{air} + S_{Hull,water} \rho_{water}) u_{Hull}^2(t)}{2} \quad (6.15)$$

Quadro 16 – Símbolos do modelo longitudinal do casco

Símbolo	Descrição (unidade)
$u_{Hull}(t)$	Velocidade longitudinal do casco ( $m s^{-1}$ )
$u_{Hull,0}$	Velocidade inicial ( $m s^{-1}$ )
$M_{Hull}$	Massa total da embarcação (kg)
$M_{Hull,a}$	Massa adicionada hidrodinâmica (kg)
$t_{Hull}(t)$	Força propulsiva aplicada ao casco (N)
$r_{Hull,t}(t)$	Resistência total equivalente (N)
$r_{Hull}(t)$	Resistência efetiva (N)
$C_{Hull,T}$	Coefficiente agregado de resistência (-)
$S_{Hull,air}$	Área efetiva ao ar ( $m^2$ )
$S_{Hull,water}$	Área efetiva à água ( $m^2$ )
$\rho_{air}$	Densidade do ar ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_{water}$	Densidade da água ( $kg m^{-3}$ )
$p_{Hull,in}(t)$	Potência associada ao empuxo (W)
$p_{Hull,out}(t)$	Potência associada à resistência (W)
$\eta_{Hull}(t)$	Eficiência definida como $p_{Hull,out}/p_{Hull,in}$ (-)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$p_{Hull,out}(t) = r_{Hull,t}(t)u_{Hull}(t) \quad (6.16)$$

$$p_{Hull,in}(t) = t_{Hull}(t)u_{Hull}(t) \quad (6.17)$$

$$\eta_{Hull}(t) = \frac{p_{Hull,out}(t)}{p_{Hull,in}(t)} \quad (6.18)$$

Para a inicialização em regime estacionário, impõe-se uma condição inicial para a velocidade e para o balanço de forças no casco, de modo a evitar aceleração impulsiva no instante inicial.

$$u_{Hull}(t) = u_{Hull,0} \quad (6.19)$$

$$r_{Hull}(t) = t_{Hull}(t) \quad (6.20)$$

### 6.3 Acoplamento entre casco e hélice

O acoplamento entre casco e hélice modifica as condições de escoamento vistas pela hélice e a resistência efetiva do casco. A velocidade de avanço no disco da hélice  $u_{Prop}(t)$  é reduzida pela fração de esteira  $W_{Hull}$ , enquanto o empuxo necessário para mover o casco  $t_{Hull}(t)$  é ajustado por um coeficiente de dedução de empuxo  $T_{Hull,ded}$ . Além disso, o torque instalado é relacionado ao torque em água livre por meio de um fator de eficiência rotacional  $\eta_{Prop,R}$  (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017). Neste trabalho, para o modelo instalado, adota-se  $j_{Prop,ow}(t) = j_{Prop}(t)$ , isto é, os coeficientes em água livre ( $k_{Prop,t,ow}$  e  $k_{Prop,q,ow}$ ) são avaliados na razão de avanço instalada.

Quadro 17 – Símbolos do acoplamento casco–hélice (esteira e dedução de empuxo)

Símbolo	Descrição (unidade)
$W_{Hull}$	Fração de esteira (-)
$T_{Hull,ded}$	Coefficiente de dedução de empuxo (-)
$u_{Hull}(t)$	Velocidade do casco ( $m s^{-1}$ )
$u_{Prop}(t)$	Velocidade efetiva de avanço na hélice ( $m s^{-1}$ )
$D_{Prop}$	Diâmetro da hélice (m)
$n_{Prop}(t)$	Rotação da hélice (Hz)
$j_{Prop}(t)$	Razão de avanço (-)
$t_{Hull}(t)$	Empuxo aplicado ao casco (N)
$t_{Prop}(t)$	Empuxo da hélice (N)
$t_{Prop,ow}(t)$	Empuxo em água livre (N)
$q_{Prop}(t)$	Torque instalado (N m)
$q_{Prop,ow}(t)$	Torque em água livre (N m)
$\eta_{Prop,R}$	Fator/eficiência rotacional (-)
$\omega_{Prop}(t)$	Velocidade angular da hélice ( $rad s^{-1}$ )
$p_{Prop,in}(t)$	Potência no eixo (W)
$p_{Prop,out}(t)$	Potência propulsiva útil (W)
$\eta_{Prop}(t)$	Eficiência (-)
$M_{Hull}, M_{Hull,a}$	Massa e massa adicionada (kg)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$u_{Prop}(t) = (1 - W_{Hull}) u_{Hull}(t) \quad (6.21)$$

$$r_{Hull}(t) = r_{Hull,t}(t) \quad (6.22)$$

$$t_{Hull}(t) = (1 - T_{Hull,ded}) t_{Prop}(t) \quad (6.23)$$

$$t_{Prop}(t) = D_{Prop}^4 \rho_{water} k_{Prop,t,ow} (j_{Prop}(t)) n_{Prop}^2(t) \quad (6.24)$$

$$q_{Prop}(t) = \frac{D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Prop,q,ow} (j_{Prop}(t)) n_{Prop}^2(t)}{\eta_{Prop,R}} \quad (6.25)$$

$$j_{Prop}(t) = \frac{(1 - W_{Hull}) u_{Hull}(t)}{D_{Prop} n_{Prop}(t)} \quad (6.26)$$

$$k_{Prop,t,ow}(j_{Prop}(t)) = \sum_{n=0}^m j_{Prop}^n(t) k_{Prop,Tn} \quad (6.27)$$

$$k_{Prop,q,ow}(j_{Prop}(t)) = \sum_{n=0}^m j_{Prop}^n(t) k_{Prop,Qn} \quad (6.28)$$

$$p_{Prop,in}(t) = \omega_{Prop}(t) q_{Prop}(t) \quad (6.29)$$

$$p_{Prop,out}(t) = t_{Prop}(t) u_{Prop}(t) \quad (6.30)$$

$$\eta_{Prop}(t) = \frac{p_{Prop,out}(t)}{p_{Prop,in}(t)} \quad (6.31)$$

$$p_{Prop,in}(t) = \frac{2\pi D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Prop,q,ow} (j_{Prop}(t)) n_{Prop}^3(t)}{\eta_{Prop,R}} \quad (6.32)$$

$$\frac{d}{dt} u_{Hull}(t) = \frac{(1 - T_{Hull,ded}) t_{Prop}(t) - r_{Hull}(t)}{M_{Hull,a} + M_{Hull}} \quad (6.33)$$

## 6.4 Transmissão

A transmissão mecânica conecta o motor à hélice e é representada por uma razão cinemática  $k_{Trans}$  e por uma eficiência  $\eta_{Trans}(t)$ . As relações a seguir estabelecem a coerência entre as velocidades, os torques, e as potências nos eixos de entrada e de saída. Além disso, define-se a inércia equivalente refletida ao eixo de entrada, utilizada no acoplamento com o motor (NORTON, 2020; UICKER; PENNOCK; SHIGLEY, 2017).

Quadro 18 – Símbolos do modelo de transmissão (razão, eficiência, e reflexão de inércia)

Símbolo	Descrição (unidade)
$k_{Trans}$	Razão de transmissão $\omega_{out}/\omega_{in}$ (-)
$\eta_{Trans}(t)$	Eficiência da transmissão (-)
$\omega_{Trans,in}(t)$	Velocidade angular de entrada ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$\omega_{Trans,out}(t)$	Velocidade angular de saída ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$q_{Trans,in}(t)$	Torque de entrada (N m)
$q_{Trans,out}(t)$	Torque de saída (N m)
$p_{Trans,in}(t)$	Potência de entrada (W)
$p_{Trans,out}(t)$	Potência de saída (W)
$I_{Trans,r,in}$	Inércia do conjunto de entrada ( $\text{kg m}^2$ )
$I_{Trans,r,out}$	Inércia do conjunto de saída ( $\text{kg m}^2$ )
$I_{Trans,r,out,Load}$	Inércia da carga na saída ( $\text{kg m}^2$ )
$I_{Trans,r,in,Eq}$	Inércia equivalente refletida à entrada ( $\text{kg m}^2$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$I_{Trans,r,in,Eq} = I_{Trans,r,in} + k_{Trans}^2 (I_{Trans,r,out,Load} + I_{Trans,r,out}) \quad (6.34)$$

$$p_{Trans,in}(t) = \omega_{Trans,in}(t)q_{Trans,in}(t) \quad (6.35)$$

$$p_{Trans,out}(t) = \omega_{Trans,out}(t)q_{Trans,out}(t) \quad (6.36)$$

$$p_{Trans,out}(t) = \eta_{Trans}(t)p_{Trans,in}(t) \quad (6.37)$$

$$\omega_{Trans,out}(t) = k_{Trans}\omega_{Trans,in}(t) \quad (6.38)$$

$$q_{Trans,in}(t) = \frac{p_{Trans,in}(t)}{\omega_{Trans,in}(t)} \quad (6.39)$$

$$q_{Trans,out}(t) = \frac{\eta_{Trans}(t)q_{Trans,in}(t)}{k_{Trans}} \quad (6.40)$$

$$q_{Trans,out}(t) = \frac{p_{Trans,out}(t)}{\omega_{Trans,out}(t)} \quad (6.41)$$

## 6.5 Acoplamento entre transmissão e hélice

O acoplamento entre a saída da transmissão e a hélice impõe a continuidade do eixo, igualando as velocidades angulares, e transmitindo torque e potência. A inércia da hélice é utilizada como inércia de carga na saída da transmissão. As expressões finais fornecem formas explícitas para a potência e o torque de entrada da transmissão em função das grandezas da hélice e das eficiências.

Quadro 19 – Símbolos do acoplamento entre transmissão e hélice

Símbolo	Descrição (unidade)
$\omega_{Prop}(t)$	Velocidade angular da hélice (rad s <sup>-1</sup> )
$\omega_{Trans,out}(t)$	Velocidade angular na saída da transmissão (rad s <sup>-1</sup> )
$p_{Prop,in}(t)$	Potência no eixo da hélice (W)
$p_{Trans,out}(t)$	Potência na saída da transmissão (W)
$p_{Trans,in}(t)$	Potência na entrada da transmissão (W)
$\eta_{Trans}(t)$	Eficiência da transmissão (-)
$q_{Prop}(t)$	Torque da hélice (N m)
$q_{Trans,out}(t)$	Torque na saída da transmissão (N m)
$I_{Trans,r,out,Load}$	Inércia de carga na saída (kg m <sup>2</sup> )
$I_{Prop,r}$	Inércia da hélice (kg m <sup>2</sup> )
$k_{Trans}$	Razão de transmissão (-)
$\omega_{Trans,in}(t)$	Velocidade angular na entrada (rad s <sup>-1</sup> )
$D_{Prop}$	Diâmetro da hélice (m)
$\rho_{water}$	Densidade da água (kg m <sup>-3</sup> )
$k_{Prop,q,ow}(\cdot), j_{Prop}(t)$	Coefficiente de torque e razão de avanço instalada (-)
$\eta_{Prop,R}$	Eficiência rotacional relativa (-)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$\omega_{Prop}(t) = \omega_{Trans,out}(t) \quad (6.42)$$

$$p_{Prop,in}(t) = p_{Trans,out}(t) \quad (6.43)$$

$$p_{Prop,in}(t) = \eta_{Trans}(t)p_{Trans,in}(t) \quad (6.44)$$

$$\omega_{Prop}(t) = k_{Trans}\omega_{Trans,in}(t) \quad (6.45)$$

$$q_{Trans,out}(t) = q_{Prop}(t) \quad (6.46)$$

$$I_{Trans,r,out,Load} = I_{Prop,r} \quad (6.47)$$

$$p_{Trans,in}(t) = \frac{D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Trans}^3 \omega_{Trans,in}^3(t) k_{Prop,q,ow}(j_{Prop}(t))}{4\pi^2 \eta_{Prop,R} \eta_{Trans}(t)} \quad (6.48)$$

$$q_{Trans,in}(t) = \frac{D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Trans}^3 \omega_{Trans,in}^2(t) k_{Prop,q,ow}(j_{Prop}(t))}{4\pi^2 \eta_{Prop,R} \eta_{Trans}(t)} \quad (6.49)$$

## 6.6 Motor

O motor é modelado por um conjunto de equações eletromecânicas que descrevem a dinâmica elétrica da corrente do motor juntamente com a dinâmica mecânica da velocidade angular em seu eixo, com acoplamento via constantes de força contraeletromotriz e de torque. O torque de carga  $q_{Motor,load}(t)$  é fornecido pelo acoplamento com a carga conectada no eixo. Para a condição inicial e a análise em regime permanente, são utilizadas expressões algébricas obtidas impondo derivadas nulas (CHAPMAN, 2012).

Quadro 20 – Símbolos do modelo eletromecânico do motor

Símbolo	Descrição (unidade)
$i_{Motor}(t)$	Corrente do motor (A)
$v_{Motor}(t)$	Tensão aplicada ao motor (V)
$R_{Motor,A}$	Resistência equivalente ( $\Omega$ )
$L_{Motor,A}$	Indutância equivalente (H)
$\omega_{Motor}(t)$	Velocidade angular ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$\theta_{Motor}(t)$	Posição angular (rad)
$K_{Motor,V}$	Constante de força eletromotriz (FEM) ( $\text{V s rad}^{-1}$ )
$K_{Motor,Q}$	Constante de torque ( $\text{N m A}^{-1}$ )
$B_{Motor}$	Atrito viscoso ( $\text{N m s rad}^{-1}$ )
$q_{Motor,load}(t)$	Torque de carga no eixo (N m)
$I_{Motor,r}$	Inércia do rotor ( $\text{kg m}^2$ )
$I_{Motor,r,load}$	Inércia equivalente da carga refletida ( $\text{kg m}^2$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$\frac{d}{dt}i_{Motor}(t) = \frac{-K_{Motor,V}\omega_{Motor}(t) - R_{Motor,A}i_{Motor}(t) + v_{Motor}(t)}{L_{Motor,A}} \quad (6.50)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{Motor}(t) = \frac{-B_{Motor}\omega_{Motor}(t) + K_{Motor,Q}i_{Motor}(t) - q_{Motor,load}(t)}{I_{Motor,r,load} + I_{Motor,r}} \quad (6.51)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_{Motor}(t) = \omega_{Motor}(t) \quad (6.52)$$

$$i_{Motor}(t) = \frac{B_{Motor}v_{Motor}(t) + K_{Motor,V}q_{Motor,load}(t)}{B_{Motor}R_{Motor,A} + K_{Motor,Q}K_{Motor,V}} \quad (6.53)$$

$$\omega_{Motor}(t) = \frac{K_{Motor,Q}v_{Motor}(t) - R_{Motor,A}q_{Motor,load}(t)}{B_{Motor}R_{Motor,A} + K_{Motor,Q}K_{Motor,V}} \quad (6.54)$$

## 6.7 Acoplamento entre motor e transmissão

O acoplamento entre o motor e a transmissão impõe a continuidade da velocidade angular no eixo de entrada e estabelece as relações de potência e torque entre os subsistemas. A inércia equivalente refletida ao motor é obtida pela reflexão das inércias da transmissão e da carga na saída por meio da razão de transmissão  $k_{Trans}$ . As expressões a seguir também incluem formas alternativas para o torque de carga no motor, seja por igualdade com o torque de entrada da transmissão, seja por uma expressão expandida em termos do carregamento hidrodinâmico e das eficiências (NORTON, 2020; UICKER; PENNOCK; SHIGLEY, 2017; CARLTON, 2007; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

$$\omega_{Trans,in}(t) = \omega_{Motor}(t) \quad (6.55)$$

$$p_{Trans,in}(t) = \eta_{Motor}(t)p_{Motor,in}(t) \quad (6.56)$$

Quadro 21 – Símbolos do acoplamento entre o motor e a transmissão

Símbolo	Descrição (unidade)
$\omega_{Motor}(t)$	Velocidade angular do motor (rad s <sup>-1</sup> )
$\omega_{Trans,in}(t)$	Velocidade angular na entrada da transmissão (rad s <sup>-1</sup> )
$p_{Motor,in}(t)$	Potência elétrica de entrada do motor (W)
$\eta_{Motor}(t)$	Eficiência do motor (-)
$p_{Trans,in}(t)$	Potência na entrada da transmissão (W)
$q_{Trans,in}(t)$	Torque na entrada da transmissão (N m)
$q_{Motor,load}(t)$	Torque de carga visto pelo motor (N m)
$I_{Motor,r,load}$	Inércia equivalente de carga refletida ao motor (kg m <sup>2</sup> )
$I_{Trans,r,in}$	Inércia da transmissão (entrada) (kg m <sup>2</sup> )
$I_{Trans,r,out}$	Inércia da transmissão (saída) (kg m <sup>2</sup> )
$I_{Prop,r}$	Inércia da hélice (kg m <sup>2</sup> )
$k_{Trans}$	Razão de transmissão $\omega_{out}/\omega_{in}$ (-)
$\eta_{Trans}(t)$	Eficiência da transmissão (-)
$q_{Prop}(t)$	Torque efetivo da hélice (N m)
$D_{Prop}$	Diâmetro da hélice (m)
$\rho_{water}$	Densidade da água (kg m <sup>-3</sup> )
$k_{Prop,q,ow}(\cdot)$	Coefficiente de torque em água livre (-)
$j_{Prop}(t)$	Razão de avanço instalada (-)
$\eta_{Prop,R}$	Eficiência rotacional (-)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$q_{Trans,in}(t) = q_{Motor,load}(t) \quad (6.57)$$

$$I_{Motor,r,load} = I_{Trans,r,in} + k_{Trans}^2 (I_{Prop,r} + I_{Trans,r,out}) \quad (6.58)$$

$$q_{Motor,load}(t) = q_{Trans,in}(t) \quad (6.59)$$

$$q_{Motor,load}(t) = \frac{D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Trans}^3 \omega_{Trans,in}^2(t) k_{Prop,q,ow}(j_{Prop}(t))}{4\pi^2 \eta_{Prop,R} \eta_{Trans}(t)} \quad (6.60)$$

$$q_{Motor,load}(t) = \frac{k_{Trans} q_{Prop}(t)}{\eta_{Trans}(t)} \quad (6.61)$$

## 6.8 ESC

O controlador eletrônico de velocidade (ESC) é modelado por um conversor CC-CC médio do tipo *chopper* operando no primeiro quadrante (tensão e correntes positivas, apenas), conectado a uma carga “RLE” (um motor), que é submetida a uma tensão (de saída), resultado da modulação por largura de pulso definida pela razão cíclica  $d_{ESC}(t)$ , transformando a tensão de entrada  $v_{ESC,in}(t)$  na tensão de saída  $v_{ESC,out}(t)$ , sendo igual à tensão de entrada multiplicada pela razão cíclica aplicada. As perdas são agregadas por componentes de condução e comutação em semicondutores, permitindo obter a corrente de entrada por balanço de potência (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2020). Para a computação das perdas, as correntes RMS na chave (6.64) e no diodo (6.65) foram calculadas com base nas formas de onda do conversor atuando em uma carga “RLE”.

Quadro 22 – Símbolos do modelo médio do ESC e de suas perdas

Símbolo	Descrição (unidade)
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica efetiva (-)
$v_{ESC,in}(t)$	Tensão de entrada (V)
$v_{ESC,out}(t)$	Tensão média de saída (V)
$v_{ESC,ds,sw}(t)$	Tensão efetiva para perdas de comutação (V)
$V_{ESC,ds,ov}$	Fator de sobretensão (-)
$i_{ESC,in}(t)$	Corrente de entrada (A)
$i_{ESC,out}(t)$	Corrente de saída (A)
$i_{ESC,M,RMS}(t)$	Corrente RMS no MOSFET (A)
$i_{ESC,D,RMS}(t)$	Corrente RMS no diodo (A)
$i_{ESC,D,AVG}(t)$	Corrente média no diodo (A)
$R_{ESC,ds,on}$	Resistência $R_{DS(on)}$ do MOSFET ( $\Omega$ )
$V_{ESC,F}$	Queda direta do diodo (V)
$R_{ESC,D}$	Resistência série do diodo ( $\Omega$ )
$F_{ESC,s}$	Frequência de comutação (Hz)
$E_{ESC,on}, E_{ESC,off}$	Energia por comutação (J)
$Q_{ESC,rr}$	Carga de recuperação reversa (C)
$p_{ESC,loss}(t)$	Perda total do ESC (W)
$p_{ESC,in}(t)$	Potência de entrada (W)
$p_{ESC,out}(t)$	Potência de saída (W)
$\eta_{ESC}(t)$	Eficiência do ESC (-)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$v_{ESC,out}(t) = d_{ESC}(t)v_{ESC,in}(t) \quad (6.62)$$

$$v_{ESC,ds,sw}(t) = (V_{ESC,ds,ov} + 1)v_{ESC,in}(t) \quad (6.63)$$

$$i_{ESC,M,RMS}(t) = \sqrt{d_{ESC}(t)}i_{ESC,out}(t) \quad (6.64)$$

$$i_{ESC,D,RMS}(t) = \sqrt{1 - d_{ESC}(t)}i_{ESC,out}(t) \quad (6.65)$$

$$i_{ESC,D,AVG}(t) = (1 - d_{ESC}(t))i_{ESC,out}(t) \quad (6.66)$$

$$p_{ESC,M,cond}(t) = R_{ESC,ds,on}i_{ESC,M,RMS}^2(t) \quad (6.67)$$

$$p_{ESC,D,cond}(t) = V_{ESC,F}i_{ESC,D,AVG}(t) + R_{ESC,D}i_{ESC,D,RMS}^2(t) \quad (6.68)$$

$$p_{ESC,M,sw}(t) = \frac{F_{ESC,s}(E_{ESC,off} + E_{ESC,on})v_{ESC,ds,sw}(t)}{v_{ESC,in}(t)} \quad (6.69)$$

$$p_{ESC,D,sw}(t) = F_{ESC,s}Q_{ESC,rr}v_{ESC,ds,sw}(t) \quad (6.70)$$

$$p_{ESC,loss}(t) = p_{ESC,D,cond}(t) + p_{ESC,D,sw}(t) + p_{ESC,M,cond}(t) + p_{ESC,M,sw}(t) \quad (6.71)$$

$$p_{ESC,in}(t) = i_{ESC,in}(t)v_{ESC,in}(t) \quad (6.72)$$

$$p_{ESC,out}(t) = i_{ESC,out}(t)v_{ESC,out}(t) \quad (6.73)$$

$$i_{ESC,in}(t) = \frac{i_{ESC,out}(t)v_{ESC,out}(t) + p_{ESC,loss}(t)}{v_{ESC,in}(t)} \quad (6.74)$$

$$\eta_{ESC}(t) = \frac{p_{ESC,out}(t)}{p_{ESC,in}(t)} \quad (6.75)$$

$$p_{ESC,in}(t) = p_{ESC,loss}(t) + p_{ESC,out}(t) \quad (6.76)$$

$$p_{ESC,out}(t) = \eta_{ESC}(t)p_{ESC,in}(t) \quad (6.77)$$

## 6.9 Acoplamento entre ESC e motor

A saída do ESC alimenta o motor elétrico. No modelo médio, impõe-se que a tensão aplicada ao motor seja proporcional ao barramento CC pela razão cíclica  $d_{ESC}(t)$  e que a corrente do motor seja igual à corrente na saída do ESC. As relações de potência são utilizadas para manter a consistência energética entre as grandezas de entrada e saída do conversor.

Quadro 23 – Símbolos do acoplamento entre ESC e motor (modelo médio)

Símbolo	Descrição (unidade)
$p_{Motor,in}(t)$	Potência elétrica de entrada do motor (W)
$p_{ESC,out}(t)$	Potência de saída do ESC (W)
$p_{ESC,in}(t)$	Potência de entrada do ESC (W)
$\eta_{ESC}(t)$	Eficiência do ESC (–)
$v_{Motor}(t)$	Tensão média aplicada ao motor (V)
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica efetiva (–)
$v_{ESC,in}(t)$	Tensão do barramento CC (V)
$i_{Motor}(t)$	Corrente do motor (A)
$i_{ESC,out}(t)$	Corrente de saída do ESC (A)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$p_{Motor,in}(t) = p_{ESC,out}(t) \quad (6.78)$$

$$v_{Motor}(t) = d_{ESC}(t)v_{ESC,in}(t) \quad (6.79)$$

$$i_{Motor}(t) = i_{ESC,out}(t) \quad (6.80)$$

$$p_{Motor,in}(t) = \eta_{ESC}(t)p_{ESC,in}(t) \quad (6.81)$$

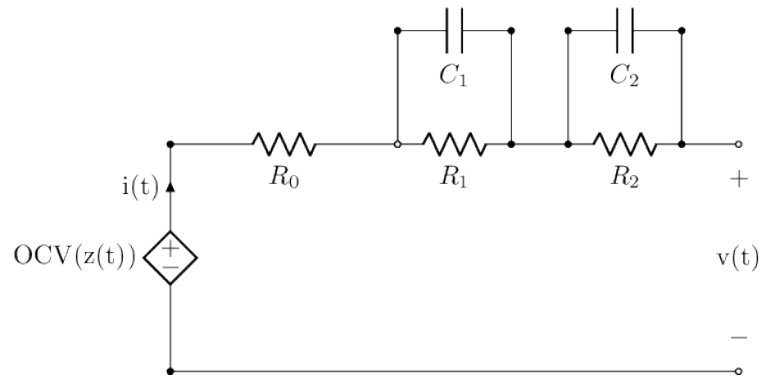
## 6.10 Bateria

A bateria é representada por um modelo de circuito equivalente de segunda ordem (2RC), capaz de capturar a dinâmica transitória de tensão e a evolução do estado de carga (SOC). Neste modelo, a tensão de circuito aberto  $v_{Batt,oc}(\cdot)$  depende do SOC  $z_{Batt}(t)$ , enquanto os ramos  $RC$  representam efeitos de polarização. A tensão terminal resulta da superposição dos termos resistivos e das tensões internas, escalonada pelo número de células em série  $N_{Batt,S}$  (PLETT, 2015).

$$\frac{d}{dt}v_{Batt,C_1}(t) = \frac{i_{Batt}(t)}{C_{Batt,1}} - \frac{v_{Batt,C_1}(t)}{C_{Batt,1}R_{Batt,1}} \quad (6.82)$$

$$\frac{d}{dt}v_{Batt,C_2}(t) = \frac{i_{Batt}(t)}{C_{Batt,2}} - \frac{v_{Batt,C_2}(t)}{C_{Batt,2}R_{Batt,2}} \quad (6.83)$$

Figura 40 – Esquemático do modelo de circuito equivalente de segunda ordem para uma bateria



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Esquemático do modelo elétrico PNGV com dois ramos RC. A tensão de circuito aberto é representada por uma fonte dependente do SOC, em série com a resistência ôhmica e dois ramos  $R-C$  que modelam dinâmicas de polarização. O diagrama explicita a corrente aplicada e a tensão terminal usada na simulação.

Quadro 24 – Símbolos do modelo de bateria (circuito equivalente com dois ramos RC)

Símbolo	Descrição (unidade)
$t$	Tempo (s)
$v_{Batt}(t)$	Tensão terminal do pack (V)
$i_{Batt}(t)$	Corrente terminal do pack (A)
$N_{Batt,S}$	Número de células em série no pack (-)
$R_{Batt,0}$	Resistência série ( $\Omega$ ) por célula
$R_{Batt,1}$	Resistência do 1º ramo RC ( $\Omega$ )
$C_{Batt,1}$	Capacitância do 1º ramo RC (F)
$R_{Batt,2}$	Resistência do 2º ramo RC ( $\Omega$ )
$C_{Batt,2}$	Capacitância do 2º ramo RC (F)
$v_{Batt,C_1}(t)$	Tensão interna do 1º ramo RC (V)
$v_{Batt,C_2}(t)$	Tensão interna do 2º ramo RC (V)
$z_{Batt}(t)$	Estado de carga (SOC) (-)
$\eta_{Batt}(t)$	Eficiência coulômbica (-)
$Q_{Batt}$	Capacidade para integração do SOC (C)
$v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t))$	Tensão de circuito aberto em função do SOC (V) por célula
$k_{Batt,V,OC_n}$	Coeficiente do polinômio OCV-SOC (V)
$m$	Ordem do polinômio OCV-SOC (-)
$z_{Batt,0}$	SOC inicial (-)
$i_{Batt,0}$	Corrente inicial (A)
$v_{Batt,0}$	Tensão terminal inicial (V)
$v_{Batt,oc,0}$	OCV inicial (V)
$v_{Batt,C,0}$	Tensão inicial comum assumida nos ramos RC (V)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$\frac{d}{dt} z_{Batt}(t) = - \frac{\eta_{Batt}(t) i_{Batt}(t)}{Q_{Batt}} \quad (6.84)$$

$$v_{Batt}(t) = N_{Batt,S} \left( \begin{array}{l} - R_{Batt,0} i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_1}(t) \\ - v_{Batt,C_2}(t) + v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t)) \end{array} \right) \quad (6.85)$$

$$\{k_{Batt,V,OC_n}\}_{n=0}^m \quad (6.86)$$

$$v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t)) = \sum_{n=0}^m z_{Batt}^n(t) k_{Batt,V,OC_n} \quad (6.87)$$

As condições iniciais são definidas por meio do SOC inicial e de uma inicialização consistente das tensões internas dos ramos  $RC$ , de modo a compatibilizar a tensão terminal  $v_{Batt,0}$  no instante inicial.

$$z_{Batt}(0) = z_{Batt,0} \quad (6.88)$$

$$v_{Batt,oc,0} = \sum_{n=0}^m z_{Batt,0}^n k_{Batt,V,OC_n} \quad (6.89)$$

$$v_{Batt,C,0} = -\frac{R_{Batt,0} i_{Batt,0}}{2} + \frac{v_{Batt,oc,0}}{2} - \frac{v_{Batt,0}}{2N_{Batt,S}} \quad (6.90)$$

$$v_{Batt,C_1}(0) = v_{Batt,C,0} \quad (6.91)$$

$$v_{Batt,C_2}(0) = v_{Batt,C,0} \quad (6.92)$$

### 6.11 Acoplamento entre bateria e ESC

O ESC conecta-se diretamente ao barramento CC definido pela bateria. Assim, a tensão de entrada do ESC é igual à tensão terminal da bateria. A corrente da bateria é obtida por um balanço de correntes no barramento, no qual correntes adicionais (por exemplo, outros ramos conectados ao mesmo nó) são agregadas no termo  $i_{[...]}(t)$ . A convenção de sinais segue a dinâmica do SOC:  $i_{Batt}(t) > 0$  representa descarga.

Quadro 25 – Símbolos do acoplamento elétrico entre bateria e ESC

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{ESC,in}(t)$	Tensão de entrada do ESC (V)
$v_{Batt}(t)$	Tensão do barramento da bateria (V)
$i_{Batt}(t)$	Corrente da bateria (A)
$i_{ESC,in}(t)$	Corrente do ESC no barramento (A)
$i_{[...]}(t)$	Corrente agregada de outras ramificações (A)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$v_{ESC,in}(t) = v_{Batt}(t) \quad (6.93)$$

$$i_{Batt}(t) = i_{ESC,in}(t) + i_{[...]}(t) \quad (6.94)$$

## 6.12 MPPT

O rastreador de ponto de máxima potência (MPPT) é modelado como um conversor CC–CC descrito a nível de potência, com eficiência média  $\eta_{MPPT}(t)$ . Não se representa algoritmo de rastreamento, laços de controle, dinâmica de chaveamento ou saturações internas. O objetivo é capturar a transferência média de potência entre os barramentos de entrada e saída e as perdas associadas por meio de  $\eta_{MPPT}(t)$  (Trishan Efram, 2007; ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2020).

Quadro 26 – Símbolos do modelo simplificado do MPPT (balanço de potência)

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{MPPT,in}(t)$	Tensão no barramento de entrada (V)
$i_{MPPT,in}(t)$	Corrente no barramento de entrada (A)
$p_{MPPT,in}(t)$	Potência elétrica na entrada (W)
$\eta_{MPPT}(t)$	Eficiência do conversor (–)
$p_{MPPT,out}(t)$	Potência elétrica na saída (W)
$v_{MPPT,out}(t)$	Tensão no barramento de saída (V)
$i_{MPPT,out}(t)$	Corrente no barramento de saída (A)
$n_{MPPTs}$	Número de conversores em paralelo (–)
$p_{MPPTs,in}(t)$	Potência total na entrada dos MPPTs (W)
$p_{MPPTs,out}(t)$	Potência total na saída dos MPPTs (W)
$i_{MPPTs,out}(t)$	Corrente total entregue ao barramento CC (A)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$p_{MPPT,in}(t) = i_{MPPT,in}(t)v_{MPPT,in}(t) \quad (6.95)$$

$$p_{MPPT,out}(t) = \eta_{MPPT}(t)p_{MPPT,in}(t) \quad (6.96)$$

$$i_{MPPT,out}(t) = \frac{p_{MPPT,out}(t)}{v_{MPPT,out}(t)} \quad (6.97)$$

$$p_{MPPTs,in}(t) = n_{MPPTs}p_{MPPT,in}(t) \quad (6.98)$$

$$p_{MPPTs,out}(t) = n_{MPPTs}p_{MPPT,out}(t) \quad (6.99)$$

$$i_{MPPTs,out}(t) = n_{MPPTs}i_{MPPT,out}(t) \quad (6.100)$$

$$i_{MPPTs,out}(t) = \frac{n_{MPPTs}\eta_{MPPT}(t)p_{MPPT,in}(t)}{v_{MPPT,out}(t)} \quad (6.101)$$

## 6.13 Acoplamento entre MPPT e bateria

O acoplamento entre a saída do MPPT e o barramento da bateria impõe igualdade de tensão no barramento CC. A equação de correntes a seguir representa uma lei de Kirchhoff de correntes no nó do barramento, na qual termos adicionais são agregados em  $i_{[...]}(t)$ . A convenção de sinais adotada no restante do capítulo deve ser mantida ao interpretar esta relação.

Quadro 27 – Símbolos do acoplamento entre a saída do MPPT e o barramento da bateria

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{MPPT,out}(t)$	Tensão na saída do MPPT (V)
$v_{Batt}(t)$	Tensão terminal do pack/barramento CC (V)
$i_{MPPTs,out}(t)$	Corrente total injetada pelos MPPTs no barramento (A)
$i_{ESC,in}(t)$	Corrente absorvida pelo ESC no barramento (A)
$i_{Batt}(t)$	Corrente da bateria (A)
$i_{[...]}(t)$	Corrente agregada de outros ramos no barramento (A)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$v_{MPPT,out}(t) = v_{Batt}(t) \quad (6.102)$$

$$i_{ESC,in}(t) = i_{Batt}(t) + i_{MPPTs,out}(t) + i_{[...]}(t) \quad (6.103)$$

## 6.14 Painéis fotovoltaicos

Um modelo energético simplificado foi adotado para o gerador fotovoltaico, baseado em balanço de potência. A irradiância incidente  $g_{PV}(t)$  atua sobre uma área efetiva  $S_{PV}$ , resultando na potência radiante  $p_{PV,in}(t)$ . A conversão fotoelétrica é representada por uma eficiência global  $\eta_{PV}(t)$  aplicada diretamente à radiação incidente ((DECEASED); BECKMAN; BLAIR, 2020).

Neste nível de abstração, a curva  $I-V$  do módulo é negligenciada, assim como a dinâmica de rastreamento do ponto de máxima potência; essas escolhas reduzem a complexidade numérica e evitam a necessidade de resolver equações implícitas durante a simulação, assim como a modelagem do comportamento dos algoritmos implementados no *firmware* responsáveis por rastrear o ponto de máxima potência.

Quadro 28 – Símbolos do modelo simplificado dos painéis fotovoltaicos

Símbolo	Descrição (unidade)
$S_{PV}$	Área efetiva de captação ( $m^2$ )
$g_{PV}(t)$	Irradiância incidente no plano do painel ( $W m^{-2}$ )
$p_{PV,in}(t)$	Potência radiante incidente no painel (W)
$\eta_{PV}(t)$	Eficiência global fotovoltaica (-)
$p_{PV,out}(t)$	Potência elétrica na saída do painel (W)
$v_{PV,out}(t)$	Tensão na saída do painel (V)
$i_{PV,out}(t)$	Corrente na saída do painel (A)
$n_{PVs}$	Número de painéis/ramais agregados (-)
$p_{PVs,in}(t)$	Potência incidente total do conjunto fotovoltaico (W)
$p_{PVs,out}(t)$	Potência elétrica total do conjunto fotovoltaico (W)
$i_{PVs,out}(t)$	Corrente total na saída do conjunto fotovoltaico (A)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$p_{PV,in}(t) = S_{PV}g_{PV}(t) \quad (6.104)$$

$$p_{PV,out}(t) = \eta_{PV}(t)p_{PV,in}(t) \quad (6.105)$$

$$p_{PV,out}(t) = i_{PV,out}(t)v_{PV,out}(t) \quad (6.106)$$

$$p_{PVs,in}(t) = n_{PVs}p_{PV,in}(t) \quad (6.107)$$

$$p_{PVs,out}(t) = n_{PVs}p_{PV,out}(t) \quad (6.108)$$

$$i_{PVs,out}(t) = n_{PVs}i_{PV,out}(t) \quad (6.109)$$

### 6.15 Acoplamento entre painel fotovoltaico e MPPT

Define-se o acoplamento elétrico entre a saída do gerador fotovoltaico e a entrada do conversor MPPT. O acoplamento impõe continuidade de tensão e corrente no nó de interconexão. O MPPT é tratado apenas por balanço de potência, sem representar a dinâmica do algoritmo de rastreamento, como comentado na subseção anterior.

Quadro 29 – Símbolos do acoplamento entre painel fotovoltaico e entrada do MPPT

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{PV,out}(t)$	Tensão na saída do painel fotovoltaico (V)
$i_{PV,out}(t)$	Corrente na saída do painel fotovoltaico (A)
$v_{MPPT,in}(t)$	Tensão na entrada do MPPT (V)
$i_{MPPT,in}(t)$	Corrente na entrada do MPPT (A)
$p_{MPPT,in}(t)$	Potência elétrica na entrada do MPPT (W)
$p_{MPPT,out}(t)$	Potência elétrica na saída do MPPT (W)
$\eta_{MPPT}(t)$	Eficiência global do MPPT (–)
$n_{PVs}$	Número de ramais fotovoltaicos (–)
$n_{MPPTs}$	Número de unidades MPPT (–)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$v_{MPPT,in}(t) = v_{PV,out}(t) \quad (6.110)$$

$$i_{MPPT,in}(t) = i_{PV,out}(t) \quad (6.111)$$

$$p_{MPPT,in}(t) = i_{MPPT,in}(t)v_{MPPT,in}(t) \quad (6.112)$$

$$p_{MPPT,out}(t) = \eta_{MPPT}(t)p_{MPPT,in}(t) \quad (6.113)$$

$$n_{PVs} = n_{MPPTs} \quad (6.114)$$

### 6.16 Outras cargas

As cargas auxiliares são representadas por um modelo de potência constante no barramento CC. Assim, a corrente é obtida pela razão entre a potência demandada e a tensão no terminal de alimentação. O modelo não descreve a dinâmica interna de conversores auxiliares.

$$i_{OTH,in}(t) = \frac{p_{OTH,in}(t)}{v_{OTH,in}(t)} \quad (6.115)$$

Quadro 30 – Símbolos do modelo de cargas auxiliares (potência constante)

Símbolo	Descrição (unidade)
$p_{OTH,in}(t)$	Potência elétrica demandada pelas cargas auxiliares (W)
$v_{OTH,in}(t)$	Tensão de alimentação das cargas auxiliares (V)
$i_{OTH,in}(t)$	Corrente consumida pelas cargas auxiliares (A)

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 6.17 Acoplamento entre outras cargas e bateria

A corrente da bateria é obtida por balanço de correntes no barramento CC, combinando a corrente absorvida pelo ESC, a corrente fornecida pelos MPPT e a corrente das cargas auxiliares. A expressão fecha o acoplamento elétrico no barramento, devendo ser consistente com a convenção de sinais adotada para  $i_{Batt}(t)$  no modelo da bateria.

Quadro 31 – Balanço de correntes no barramento CC (bateria, MPPT, e cargas auxiliares)

Símbolo	Descrição (unidade)
$i_{Batt}(t)$	Corrente da bateria (A)
$i_{ESC,in}(t)$	Corrente do ESC no barramento (A)
$i_{MPPTs,out}(t)$	Corrente total dos MPPT (A) (injeção no barramento)
$i_{OTH,in}(t)$	Corrente das cargas auxiliares (A) (consumo no barramento)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$i_{Batt}(t) = i_{ESC,in}(t) - i_{MPPTs,out}(t) + i_{OTH,in}(t) \quad (6.116)$$

### 6.18 Resolvendo correntes

Nesta etapa, obtêm-se expressões explícitas para as correntes no barramento CC a partir dos balanços de potência. Essas expressões são utilizadas na etapa seguinte para obter uma forma fechada para a tensão terminal da bateria, evitando a resolução de um sistema algébrico a cada passo de simulação.

$$i_{MPPTs,out}(t) = \frac{S_{PV} n_{MPPTs} \eta_{MPPT}(t) \eta_{PV}(t) g_{PV}(t)}{v_{Batt}(t)} \quad (6.117)$$

$$i_{ESC,in}(t) = \frac{1}{v_{Batt}(t)} \left( \begin{aligned} &F_{ESC,s} Q_{ESC,rr} (V_{ESC,ds,ov} + 1) v_{Batt}(t) \\ &+ F_{ESC,s} (E_{ESC,off} + E_{ESC,on}) (V_{ESC,ds,ov} + 1) \\ &- R_{ESC,D} (d_{ESC}(t) - 1) i_{Motor}^2(t) \\ &+ R_{ESC,ds,on} d_{ESC}(t) i_{Motor}^2(t) \\ &- V_{ESC,F} (d_{ESC}(t) - 1) i_{Motor}(t) \\ &+ d_{ESC}(t) i_{Motor}(t) v_{Batt}(t) \end{aligned} \right) \quad (6.118)$$

Quadro 32 – Símbolos utilizados na resolução explícita de correntes no barramento CC

Símbolo	Descrição (unidade)
$i_{MPPTs,out}(t)$	Corrente total injetada pelos MPPTs no barramento (A)
$S_{PV}$	Área efetiva do conjunto fotovoltaico (m <sup>2</sup> )
$n_{MPPTs}$	Número de MPPTs (-)
$\eta_{MPPT}(t)$	Eficiência do MPPT (-)
$\eta_{PV}(t)$	Eficiência fotovoltaica (-)
$g_{PV}(t)$	Irradiância (W m <sup>-2</sup> )
$v_{Batt}(t)$	Tensão do barramento/bateria (V)
$i_{ESC,in}(t)$	Corrente de entrada do ESC (A)
$F_{ESC,s}$	Frequência de comutação (Hz)
$Q_{ESC,rr}$	Carga de recuperação reversa (C)
$V_{ESC,ds,ov}$	Fator de sobretensão (-)
$E_{ESC,off}, E_{ESC,on}$	Energia por comutação (J)
$R_{ESC,ds,on}$	Resistência $R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica efetiva (-)
$i_{Motor}(t)$	Corrente do motor (A)
$V_{ESC,F}$	Queda direta do diodo (V)
$R_{ESC,D}$	Resistência série do diodo ( $\Omega$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

## 6.19 Resolvendo a tensão da bateria

A tensão terminal  $v_{Batt}(t)$  pode ser obtida por uma solução explícita quando as correntes no barramento CC são substituídas por expressões em função de potência e tensão. Neste modelo, a presença de termos do tipo  $i = p/v$  conduz a uma equação implícita em  $v_{Batt}(t)$  que pode ser reescrita na forma quadrática. A expressão a seguir utiliza a raiz fisicamente admissível, garantindo  $v_{Batt}(t) > 0$ .

$$v_{Batt}(t) = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4c}}{2} \quad (6.119)$$

$$b = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 \quad (6.120)$$

$$b_0 = -F_{ESC,s} N_{Batt,S} Q_{ESC,rr} R_{Batt,0} V_{ESC,ds,ov} \quad (6.121)$$

$$b_1 = -F_{ESC,s} N_{Batt,S} Q_{ESC,rr} R_{Batt,0} \quad (6.122)$$

$$b_2 = -N_{Batt,S} R_{Batt,0} d_{ESC}(t) i_{Motor}(t) \quad (6.123)$$

$$b_3 = -N_{Batt,S} v_{Batt,C_1}(t) \quad (6.124)$$

$$b_4 = -N_{Batt,S} v_{Batt,C_2}(t) \quad (6.125)$$

$$b_5 = N_{Batt,S} v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t)) \quad (6.126)$$

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} \quad (6.127)$$

$$c_0 = -E_{ESC,off} F_{ESC,s} N_{Batt,S} R_{Batt,0} V_{ESC,ds,ov} \quad (6.128)$$

$$c_1 = -E_{ESC,off} F_{ESC,s} N_{Batt,S} R_{Batt,0} \quad (6.129)$$

$$c_2 = -E_{ESC,on} F_{ESC,s} N_{Batt,S} R_{Batt,0} V_{ESC,ds,ov} \quad (6.130)$$

Quadro 33 – Símbolos da solução explícita para a tensão da bateria no barramento CC

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{Batt}(t)$	Tensão terminal do pack/barramento (V)
$b, b_0, \dots, b_5$	Coefficientes agregados da solução (V)
$c, c_0, \dots, c_{10}$	Termos agregados sob a raiz ( $V^2$ )
$F_{ESC,s}$	Frequência de chaveamento do ESC (Hz)
$Q_{ESC,rr}$	Carga de recuperação reversa do diodo (C)
$V_{ESC,ds,ov}$	Fator de sobretensão efetiva (-)
$R_{Batt,0}$	Resistência série ( $\Omega$ ) por célula
$N_{Batt,S}$	Número de células em série (-)
$E_{ESC,off}, E_{ESC,on}$	Energia por comutação (J)
$R_{ESC,ds,on}$	Resistência $R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica efetiva (-)
$i_{Motor}(t)$	Corrente do motor (A)
$v_{Batt,C_1}(t)$	Tensão interna RC1 (V)
$v_{Batt,C_2}(t)$	Tensão interna RC2 (V)
$v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t))$	Tensão em circuito aberto (V) por célula
$S_{PV}$	Área efetiva fotovoltaica ( $m^2$ )
$n_{MPPTs}$	Número de MPPT (-)
$\eta_{MPPT}(t)$	Eficiência do MPPT (-)
$\eta_{PV}(t)$	Eficiência fotovoltaica (-)
$g_{PV}(t)$	Irradiância ( $W m^{-2}$ )
$V_{ESC,F}$	Queda direta do diodo (V)
$R_{ESC,D}$	Resistência série do diodo ( $\Omega$ )
$p_{OTH,in}(t)$	Potência das cargas auxiliares (W)

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$c_3 = -E_{ESC,on}F_{ESC,s}N_{Batt,S}R_{Batt,0} \quad (6.131)$$

$$c_4 = N_{Batt,S}R_{Batt,0}R_{ESC,D}d_{ESC}(t)i_{Motor}^2(t) \quad (6.132)$$

$$c_5 = -N_{Batt,S}R_{Batt,0}R_{ESC,D}i_{Motor}^2(t) \quad (6.133)$$

$$c_6 = -N_{Batt,S}R_{Batt,0}R_{ESC,ds,on}d_{ESC}(t)i_{Motor}^2(t) \quad (6.134)$$

$$c_7 = N_{Batt,S}R_{Batt,0}S_{PV}n_{MPPTs}\eta_{MPPT}(t)\eta_{PV}(t)g_{PV}(t) \quad (6.135)$$

$$c_8 = N_{Batt,S}R_{Batt,0}V_{ESC,F}d_{ESC}(t)i_{Motor}(t) \quad (6.136)$$

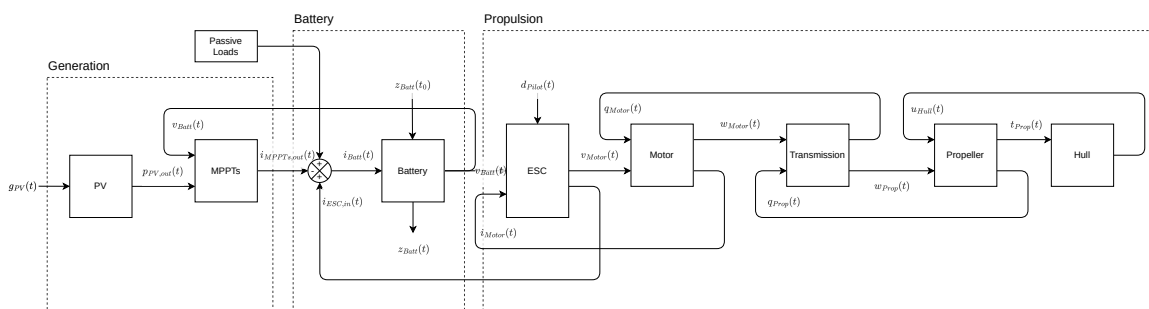
$$c_9 = -N_{Batt,S}R_{Batt,0}V_{ESC,F}i_{Motor}(t) \quad (6.137)$$

$$c_{10} = -N_{Batt,S}R_{Batt,0}p_{OTH,in}(t) \quad (6.138)$$

## 6.20 Modelo da embarcação solar

Com a modelagem dos subsistemas e de seus acoplamentos físicos, obtém-se um modelo integrado da embarcação solar. A arquitetura geral é apresentada na Figura 41, que organiza o fluxo de energia e de sinais desde a geração fotovoltaica até a resposta hidrodinâmica do casco.

Figura 41 – Diagrama de blocos do modelo completo da embarcação solar



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Diagrama do modelo completo da embarcação solar com geração (PV+MPPT), armazenamento (bateria), cargas passivas e cadeia propulsiva (ESC, motor, transmissão, hélice e casco). As setas mostram o fluxo de energia entre os subsistemas.

### 6.20.1 Descrição do fluxo de sinais

O sistema é excitado por duas entradas principais: a irradiância  $g_{PV}(t)$  e o comando do piloto  $d_{ESC}(t)$ .

No subsistema de geração, a irradiância incide sobre os painéis fotovoltaicos, convertendo potência solar em potência elétrica. Os rastreadores de ponto de máxima potência (MPPTs) condicionam essa potência e injetam corrente  $i_{MPPTs,out}(t)$  no barramento CC. A bateria participa desse barramento como elemento de armazenamento e amortecimento dinâmico, fazendo com que a tensão terminal  $v_{Batt}(t)$  resulte do balanço instantâneo entre geração, propulsão e cargas auxiliares.

No subsistema de propulsão elétrica, o ESC recebe  $d_{ESC}(t)$  e  $v_{Batt}(t)$  e impõe a tensão média aplicada ao motor,  $v_{Motor}(t)$ . O motor converte potência elétrica em potência mecânica, produzindo torque e velocidade angular  $\omega_{Motor}(t)$ . A transmissão adapta torque e rotação entre motor e hélice por meio da razão  $k_{Trans}$  e de sua eficiência.

No subsistema hidrodinâmico, a hélice converte potência mecânica em empuxo  $t_{Prop}(t)$ , dependente da rotação e da razão de avanço. Esse empuxo é transferido ao casco com as correções de interação casco-hélice (esteira e dedução de empuxo). O casco, por sua vez, impõe a resistência ao avanço  $r_{Hull}(t)$ , e a diferença entre empuxo efetivo e resistência define a aceleração e a velocidade longitudinal  $u_{Hull}(t)$ .

Assim, o modelo fecha simultaneamente os laços elétricos e mecânicos: a carga hidrodinâmica afeta o torque exigido do motor, o torque exigido afeta a corrente drenada, a corrente drenada altera o estado da bateria, e o estado da bateria realimenta a tensão disponível no barramento.

### 6.20.2 Variantes de modelo

Para os diferentes objetivos metodológicos do trabalho, são definidas três variantes com o mesmo núcleo físico e com interfaces distintas:

1. **Modelo simples:** usa as entradas de alto nível  $g_{PV}(t)$  e  $d_{ESC}(t)$  e expõe apenas os sinais principais ( $v_{Batt}$ ,  $i_{Batt}$ ,  $i_{MPPTs,out}$ ,  $\omega_{Motor}$ ,  $i_{ESC,in}$  e  $u_{Hull}$ ), sendo a variante adotada como base para identificação e validação direta.
2. **Modelo completo:** mantém as mesmas entradas e os mesmos estados do modelo simples, mas expõe o conjunto completo de sinais internos ( $80 + 6n_{MPPTs}$  saídas), permitindo análise energética detalhada por subsistema.
3. **Modelo interno:** usa sinais medidos disponíveis em campo ( $v_{Batt}(t)$ ,  $d_{ESC}(t)$  e pares  $i_{MPPTk,in}(t)/v_{MPPTk,in}(t)$ ) para reconstruir variáveis internas não diretamente instrumentadas, preservando a mesma dinâmica de estados do modelo base.

Essa separação evita sobrecarga desnecessária em cada etapa: o modelo simples prioriza robustez de parametrização, o modelo completo prioriza observabilidade interna e o modelo interno prioriza inferência a partir da instrumentação real disponível.

## 6.21 Modelo simples

O modelo simples corresponde ao sistema SolarBoat implementado em `<solarboat_model/models/2020/boat/model.py>` (CARDOSO, 2026b). Ele descreve a dinâmica acoplada entre bateria, cadeia propulsiva e casco, com 2 entradas, 6 estados e 6 saídas.

As equações auxiliares do modelo simples são:

$$v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t)) = \sum_{n=0}^m z_{Batt}^n(t) k_{Batt,V,OC_n} \quad (6.139)$$

$$i_{MPPTs,out}(t) = \frac{S_{PV} n_{MPPTs} \eta_{MPPT} \eta_{PV} g_{PV}(t)}{v_{Batt}(t)} \quad (6.140)$$

$$i_{OTH,in}(t) = \frac{p_{OTH,in}}{v_{Batt}(t)} \quad (6.141)$$

$$i_{Batt}(t) = i_{ESC,in}(t) - i_{MPPTs,out}(t) + i_{OTH,in}(t) \quad (6.142)$$

$$I_{Motor,r,load} = I_{Trans,r,in} + k_{Trans}^2 (I_{Prop,r} + I_{Trans,r,out}) \quad (6.143)$$

$$v_{Motor}(t) = d_{ESC}(t) v_{Batt}(t) \quad (6.144)$$

$$n_{Prop}(t) = \frac{k_{Trans} \omega_{Motor}(t)}{2\pi} \quad (6.145)$$

$$j_{Prop}(t) = \frac{(1 - W_{Hull}) u_{Hull}(t)}{D_{Prop} n_{Prop}(t)} \quad (6.146)$$

$$k_{Prop,t,ow}(j_{Prop}(t)) = \sum_{n=0}^m j_{Prop}^n(t) k_{Prop,T_n} \quad (6.147)$$

$$k_{Prop,q,ow}(j_{Prop}(t)) = \sum_{n=0}^m j_{Prop}^n(t) k_{Prop,Q_n} \quad (6.148)$$

Quadro 34 – Parâmetros do modelo simples

Símbolo	Descrição (unidade)
$\rho_{water}, \rho_{air}$	Densidades da água e do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$S_{Hull,water}, S_{Hull,air}$	Áreas efetivas do casco ( $\text{m}^2$ )
$C_{Hull,T}, M_{Hull}, \bar{M}_{Hull,a}$	Resistência agregada, massa e massa adicionada do casco
$W_{Hull}, T_{Hull,ded}$	Fração de esteira e dedução de empuxo
$D_{Prop}, \eta_{Prop,R}$	Diâmetro da hélice e fator rotacional
$k_{Prop,T_n}, \bar{k}_{Prop,Q_n}$	Coeficientes dos polinômios de empuxo e torque da hélice
$k_{Trans}, \eta_{Trans}$	Relação e eficiência da transmissão
$I_{Trans,r,in}, I_{Trans,r,out}, I_{Prop,r}$	Inércias da transmissão e da hélice ( $\text{kg m}^2$ )
$R_{Motor,A}, L_{Motor,A}$	Resistência e indutância do motor ( $\Omega, \text{H}$ )
$K_{Motor,V}, K_{Motor,Q}, B_{Motor}, I_{Motor,r}$	Constantes e inércia do motor
$R_{Batt,0}, R_{Batt,1}, R_{Batt,2}$	Resistências do modelo de bateria ( $\Omega$ )
$C_{Batt,1}, C_{Batt,2}$	Capacitâncias dos ramos RC (F)
$Q_{Batt}, \eta_{Batt}, \bar{N}_{Batt,S}$	Capacidade, eficiência coulômbica e número de células em série
$k_{Batt,V,OC_n}$	Coeficientes do polinômio OCV–SOC
$S_{PV}, \eta_{PV}$	Área e eficiência fotovoltaica
$n_{MPPTs}, \eta_{MPPT}$	Número de MPPTs e eficiência
$F_{ESC,s}, Q_{ESC,rr}, V_{ESC,ds,ov}$	Parâmetros de comutação do ESC
$R_{ESC,ds,on}, R_{ESC,D}, V_{ESC,F}$	Parâmetros de condução do ESC
$E_{ESC,on}, E_{ESC,off}$	Energias de comutação do ESC
$POTH,in$	Potência agregada das cargas auxiliares (W)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 35 – Entradas do modelo simples

Símbolo	Descrição (unidade)
$g_{PV}(t)$	Irradiância incidente ( $\text{W m}^{-2}$ )
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica de comando do ESC (–)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 36 – Estados do modelo simples

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{Batt,C_1}(t)$	Tensão do ramo RC1 da bateria (V)
$v_{Batt,C_2}(t)$	Tensão do ramo RC2 da bateria (V)
$z_{Batt}(t)$	Estado de carga (SOC) (–)
$i_{Motor}(t)$	Corrente do motor (A)
$\omega_{Motor}(t)$	Velocidade angular do motor ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$u_{Hull}(t)$	Velocidade longitudinal do casco ( $\text{m s}^{-1}$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 37 – Saídas do modelo simples

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{Batt}(t)$	Tensão terminal do banco de baterias (V)
$i_{Batt}(t)$	Corrente da bateria (A)
$i_{MPPTs,out}(t)$	Corrente total entregue pelos MPPTs (A)
$\omega_{Motor}(t)$	Velocidade angular do motor ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$i_{ESC,in}(t)$	Corrente de entrada do ESC (A)
$u_{Hull}(t)$	Velocidade longitudinal do casco ( $\text{m s}^{-1}$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$t_{Prop}(t) = D_{Prop}^4 \rho_{water} k_{Prop,t,ow} (j_{Prop}(t)) n_{Prop}^2(t) \quad (6.149)$$

$$q_{Prop}(t) = \frac{D_{Prop}^5 \rho_{water} k_{Prop,q,ow} (j_{Prop}(t)) n_{Prop}^2(t)}{\eta_{Prop,R}} \quad (6.150)$$

$$q_{Motor,load}(t) = \frac{k_{Trans} q_{Prop}(t)}{\eta_{Trans}} \quad (6.151)$$

$$t_{Prop,e}(t) = (1 - T_{Hull,ded}) t_{Prop}(t) \quad (6.152)$$

$$r_{Hull}(t) = \frac{C_{Hull,T} (S_{Hull,air} \rho_{air} + S_{Hull,water} \rho_{water}) u_{Hull}^2(t)}{2} \quad (6.153)$$

As equações diferenciais de estado são:

$$\frac{d}{dt} v_{Batt,C_1}(t) = \frac{R_{Batt,1} i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_1}(t)}{C_{Batt,1} R_{Batt,1}} \quad (6.154)$$

$$\frac{d}{dt} v_{Batt,C_2}(t) = \frac{R_{Batt,2} i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_2}(t)}{C_{Batt,2} R_{Batt,2}} \quad (6.155)$$

$$\frac{d}{dt} z_{Batt}(t) = -\frac{\eta_{Batt} i_{Batt}(t)}{Q_{Batt}} \quad (6.156)$$

$$\frac{d}{dt} i_{Motor}(t) = \frac{-K_{Motor,V} \omega_{Motor}(t) - R_{Motor,A} i_{Motor}(t) + v_{Motor}(t)}{L_{Motor,A}} \quad (6.157)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{Motor}(t) = \frac{-B_{Motor} \omega_{Motor}(t) + K_{Motor,Q} i_{Motor}(t) - q_{Motor,load}(t)}{I_{Motor,r} + I_{Motor,r,load}} \quad (6.158)$$

$$\frac{d}{dt} u_{Hull}(t) = \frac{t_{Prop,e}(t) - r_{Hull}(t)}{M_{Hull} + M_{Hull,a}} \quad (6.159)$$

A tensão terminal da bateria segue da solução analítica da equação algébrica não linear do barramento:

$$v_{Batt}(t) = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4c}}{2} \quad (6.160)$$

$$b = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5$$

$$b_0 = -F_{ESC,s} N_{Batt,S} Q_{ESC,rr} R_{Batt,0} V_{ESC,ds,ov}$$

$$b_1 = -F_{ESC,s} N_{Batt,S} Q_{ESC,rr} R_{Batt,0}$$

$$\begin{aligned}
b_2 &= -N_{Batt,S}R_{Batt,0}d_{ESC}(t)i_{Motor}(t) \\
b_3 &= -N_{Batt,S}v_{Batt,C_1}(t) \\
b_4 &= -N_{Batt,S}v_{Batt,C_2}(t) \\
b_5 &= N_{Batt,S}v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t)) \\
c &= c_0 + c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} \\
c_0 &= -E_{ESC,off}F_{ESC,s}N_{Batt,S}R_{Batt,0}V_{ESC,ds,ov} \\
c_1 &= -E_{ESC,off}F_{ESC,s}N_{Batt,S}R_{Batt,0} \\
c_2 &= -E_{ESC,on}F_{ESC,s}N_{Batt,S}R_{Batt,0}V_{ESC,ds,ov} \\
c_3 &= -E_{ESC,on}F_{ESC,s}N_{Batt,S}R_{Batt,0} \\
c_4 &= N_{Batt,S}R_{Batt,0}R_{ESC,D}d_{ESC}(t)i_{Motor}^2(t) \\
c_5 &= -N_{Batt,S}R_{Batt,0}R_{ESC,D}i_{Motor}^2(t) \\
c_6 &= -N_{Batt,S}R_{Batt,0}R_{ESC,ds,on}d_{ESC}(t)i_{Motor}^2(t) \\
c_7 &= N_{Batt,S}R_{Batt,0}S_{PV}n_{MPPTs}\eta_{MPPT}\eta_{PV}g_{PV}(t) \\
c_8 &= N_{Batt,S}R_{Batt,0}V_{ESC,F}d_{ESC}(t)i_{Motor}(t) \\
c_9 &= -N_{Batt,S}R_{Batt,0}V_{ESC,F}i_{Motor}(t) \\
c_{10} &= -N_{Batt,S}R_{Batt,0}p_{OTH,in}
\end{aligned}$$

A corrente de entrada do ESC é dada por:

$$i_{ESC,in}(t) = \frac{1}{v_{Batt}(t)} \begin{pmatrix} F_{ESC,s}Q_{ESC,rr}(V_{ESC,ds,ov} + 1)v_{Batt}(t) \\ + F_{ESC,s}(E_{ESC,off} + E_{ESC,on})(V_{ESC,ds,ov} + 1) \\ - R_{ESC,D}(d_{ESC}(t) - 1)i_{Motor}^2(t) \\ + R_{ESC,ds,on}d_{ESC}(t)i_{Motor}^2(t) \\ - V_{ESC,F}(d_{ESC}(t) - 1)i_{Motor}(t) \\ + d_{ESC}(t)i_{Motor}(t)v_{Batt}(t) \end{pmatrix} \quad (6.161)$$

As demais saídas são diretas:  $i_{Batt}(t)$  pela Equação 6.142,  $i_{MPPTs,out}(t)$  pela Equação 6.140,  $\omega_{Motor}(t)$  como estado e  $u_{Hull}(t)$  como estado.

Condições iniciais usadas na implementação:

$$z_{Batt}(0) = z_{Batt,0} \quad (6.162)$$

$$v_{Batt}(0) = v_{Batt,0} \quad (6.163)$$

$$i_{Batt}(0) = 0 \quad (6.164)$$

$$v_{Batt,oc}(0) = \sum_{n=0}^m z_{Batt,0}^n k_{Batt,V,OC_n} \quad (6.165)$$

$$v_{Batt,C_1}(0) = v_{Batt,C_2}(0) = \frac{v_{Batt,oc}(0) - R_{Batt,0}i_{Batt}(0) - v_{Batt}(0)/N_{Batt,S}}{2} \quad (6.166)$$

$$i_{Motor}(0) = 0 \quad (6.167)$$

$$\omega_{Motor}(0) = 0 \quad (6.168)$$

$$u_{Hull}(0) = u_{Hull,0} \quad (6.169)$$

No código, salvaguardas numéricas (por exemplo, saturações e proteção contra divisão por zero) são aplicadas para robustez de simulação; elas não alteram a forma teórica apresentada neste texto.

## 6.22 Modelo completo

O modelo completo corresponde ao sistema SolarBoatFull implementado em <solarboat\_model/models/2020/boat/model.py> (CARDOSO, 2026b). Ele mantém o mesmo núcleo dinâmico do modelo simples (2 entradas e 6 estados), porém expõe todas as variáveis internas como saídas.

Neste texto,  $n_{PV_s}$  representa o número de ramais FV agregados. Quando não for especificado, adota-se  $n_{PV_s} = n_{MPPT_s}$ , como na implementação.

Assim, o número total de saídas é:

$$n_y = 80 + 6n_{MPPT_s} \quad (6.170)$$

Para o caso adotado no trabalho, com  $n_{MPPT_s} = 4$ , obtém-se  $n_y = 104$  saídas.

Quadro 38 – Entradas do modelo completo

Símbolo	Descrição (unidade)
$g_{PV}(t)$	Irradiância incidente ( $W m^{-2}$ )
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica de comando do ESC (-)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 39 – Estados do modelo completo

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{Batt,C_1}(t)$	Tensão no ramo RC1 da bateria (V)
$v_{Batt,C_2}(t)$	Tensão no ramo RC2 da bateria (V)
$z_{Batt}(t)$	Estado de carga da bateria (SOC) (-)
$i_{Motor}(t)$	Corrente de armadura do motor (A)
$\omega_{Motor}(t)$	Velocidade angular do motor ( $rad s^{-1}$ )
$u_{Hull}(t)$	Velocidade longitudinal do casco ( $m s^{-1}$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

As equações diferenciais de estado são as mesmas do modelo simples:

$$\frac{d}{dt}v_{Batt,C_1}(t) = \frac{R_{Batt,1}i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_1}(t)}{C_{Batt,1}R_{Batt,1}} \quad (6.171)$$

Quadro 40 – Agrupamento das saídas do modelo completo

Grupo	Sinais expostos
Bateria (8)	$v_{Batt}, i_{Batt}, v_{Batt,C_1}, v_{Batt,C_2}, z_{Batt}, v_{Batt,oc}, p_{Batt,out}, p_{Batt,in}$
PV (4)	$p_{PV,in}, p_{PV,out}, \eta_{PV}, g_{PV}$
MPPT por canal $k$ (6)	$i_{MPPTk,in}, v_{MPPTk,in}, p_{MPPTk,in}, v_{MPPTk,out}, i_{MPPTk,out}, p_{MPPTk,out}$
Agregados PV/MPPT (13)	$p_{PVs,in}, p_{PVs,out}, i_{PVs,out}, p_{MPPT,in}, p_{MPPT,out}, v_{MPPT,in}, v_{MPPT,out}, i_{MPPT,in}, i_{MPPT,out}, \eta_{MPPT}, p_{MPPTs,in}, p_{MPPTs,out}, i_{MPPTs,out}$
ESC (15)	$v_{ESC,in}, v_{ESC,out}, i_{ESC,in}, i_{ESC,out}, p_{ESC,in}, p_{ESC,out}, \eta_{ESC}, p_{ESC,loss}, p_{ESC,M,cond}, p_{ESC,D,cond}, p_{ESC,M,sw}, p_{ESC,D,sw}, i_{ESC,M,RMS}, i_{ESC,D,RMS}, i_{ESC,D,AVG}$
Motor (8)	$i_{Motor}, v_{Motor}, \omega_{Motor}, q_{Motor,load}, p_{Motor,in}, p_{Motor,out}, p_{Motor,loss}, \eta_{Motor}$
Transmissão (7)	$\omega_{Trans,in}, \omega_{Trans,out}, q_{Trans,in}, q_{Trans,out}, p_{Trans,in}, p_{Trans,out}, \eta_{Trans}$
Hélice (17)	$u_{Prop}, u_{Prop,ow}, n_{Prop}, \omega_{Prop}, t_{Prop}, q_{Prop}, p_{Prop,in}, p_{Prop,out}, \eta_{Prop}, j_{Prop}, k_{Prop,t,ow}, k_{Prop,q,ow}, t_{Prop,ow}, q_{Prop,ow}, p_{Prop,in,ow}, p_{Prop,out,ow}, \eta_{Prop,ow}$
Casco (6)	$u_{Hull}, t_{Hull}, r_{Hull,t}, p_{Hull,in}, p_{Hull,out}, \eta_{Hull}$
Cargas auxiliares (2)	$p_{OTH,in}, i_{OTH,in}$

Fonte: Elaboração própria (2026).

$$\frac{d}{dt}v_{Batt,C_2}(t) = \frac{R_{Batt,2}i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_2}(t)}{C_{Batt,2}R_{Batt,2}} \quad (6.172)$$

$$\frac{d}{dt}z_{Batt}(t) = -\frac{\eta_{Batt}i_{Batt}(t)}{Q_{Batt}} \quad (6.173)$$

$$\frac{d}{dt}i_{Motor}(t) = \frac{-K_{Motor,V}\omega_{Motor}(t) - R_{Motor,A}i_{Motor}(t) + v_{Motor}(t)}{L_{Motor,A}} \quad (6.174)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{Motor}(t) = \frac{-B_{Motor}\omega_{Motor}(t) + K_{Motor,Q}i_{Motor}(t) - q_{Motor,load}(t)}{I_{Motor,r} + I_{Motor,r,load}} \quad (6.175)$$

$$\frac{d}{dt}u_{Hull}(t) = \frac{t_{Prop,e}(t) - r_{Hull,t}(t)}{M_{Hull} + M_{Hull,a}} \quad (6.176)$$

As relações algébricas do modelo completo são organizadas por subsistema.

#### Bateria e barramento CC:

$$v_{Batt,oc}(z_{Batt}(t)) = \sum_{n=0}^m z_{Batt}^n(t) k_{Batt,V,OC_n} \quad (6.177)$$

$$i_{OTH,in}(t) = \frac{p_{OTH,in}}{v_{Batt}(t)} \quad (6.178)$$

$$i_{Batt}(t) = i_{ESC,in}(t) - i_{MPPTs,out}(t) + i_{OTH,in}(t) \quad (6.179)$$

$$p_{Batt,out}(t) = i_{Batt}(t)v_{Batt}(t), \quad p_{Batt,in}(t) = -i_{Batt}(t)v_{Batt}(t) \quad (6.180)$$

As expressões fechadas de  $v_{Batt}(t)$  e  $i_{ESC,in}(t)$  são as mesmas apresentadas no modelo simples (Equação 6.160 e Equação 6.161).

#### Geração (PV + MPPT):

$$p_{PV,in}(t) = S_{PV}g_{PV}(t), \quad p_{PV,out}(t) = \eta_{PV}p_{PV,in}(t) \quad (6.181)$$

$$p_{PVs,in}(t) = n_{PVs}p_{PV,in}(t), \quad p_{PVs,out}(t) = n_{PVs}p_{PV,out}(t) \quad (6.182)$$

$$p_{MPPTs,in}(t) = p_{PVs,out}(t) \quad (6.183)$$

$$p_{MPPTs,out}(t) = \eta_{MPPT}p_{MPPTs,in}(t) \quad (6.184)$$

$$i_{MPPTs,out}(t) = \frac{p_{MPPTs,out}(t)}{v_{Batt}(t)} \quad (6.185)$$

**ESC:**

$$v_{ESC,in}(t) = v_{Batt}(t), \quad v_{ESC,out}(t) = d_{ESC}(t)v_{ESC,in}(t) \quad (6.186)$$

$$i_{ESC,out}(t) = i_{Motor}(t) \quad (6.187)$$

$$p_{ESC,in}(t) = i_{ESC,in}(t)v_{ESC,in}(t) \quad (6.188)$$

$$p_{ESC,out}(t) = i_{ESC,out}(t)v_{ESC,out}(t) \quad (6.189)$$

$$i_{ESC,M,RMS}(t) = \sqrt{d_{ESC}(t)} i_{ESC,out}(t) \quad (6.190)$$

$$i_{ESC,D,RMS}(t) = \sqrt{1 - d_{ESC}(t)} i_{ESC,out}(t) \quad (6.191)$$

$$i_{ESC,D,AVG}(t) = (1 - d_{ESC}(t))i_{ESC,out}(t) \quad (6.192)$$

$$p_{ESC,loss}(t) = p_{ESC,M,cond}(t) + p_{ESC,D,cond}(t) + p_{ESC,M,sw}(t) + p_{ESC,D,sw}(t) \quad (6.193)$$

$$\eta_{ESC}(t) = \frac{p_{ESC,out}(t)}{p_{ESC,in}(t)} \quad (6.194)$$

**Motor, transmissão, hélice e casco:**

$$v_{Motor}(t) = d_{ESC}(t)v_{Batt}(t), \quad n_{Prop}(t) = \frac{k_{Trans}\omega_{Motor}(t)}{2\pi} \quad (6.195)$$

$$j_{Prop}(t) = \frac{(1 - W_{Hull})u_{Hull}(t)}{D_{Prop}n_{Prop}(t)} \quad (6.196)$$

$$t_{Prop}(t) = D_{Prop}^4 \rho_{water} k_{Prop,t,ow}(j_{Prop}(t))n_{Prop}^2(t) \quad (6.197)$$

$$q_{Prop}(t) = \frac{D_{Prop}^5 \rho_{water}}{\eta_{Prop,R}} k_{Prop,q,ow}(j_{Prop}(t))n_{Prop}^2(t) \quad (6.198)$$

$$q_{Motor,load}(t) = \frac{k_{Trans}q_{Prop}(t)}{\eta_{Trans}}, \quad t_{Prop,e}(t) = (1 - T_{Hull,ded})t_{Prop}(t) \quad (6.199)$$

$$r_{Hull,t}(t) = \frac{C_{Hull,T}}{2} (S_{Hull,air}\rho_{air} + S_{Hull,water}\rho_{water}) u_{Hull}^2(t) \quad (6.200)$$

As potências e eficiências de motor, transmissão, hélice e casco são obtidas pelas definições usuais de produto torque–velocidade, força–velocidade e razão entre potência de saída e entrada em cada bloco.

As condições iniciais seguem as mesmas hipóteses do modelo simples:

$z_{Batt}(0) = z_{Batt,0}$ ,  $v_{Batt}(0) = v_{Batt,0}$ ,  $i_{Motor}(0) = 0$ ,  $\omega_{Motor}(0) = 0$  e  $u_{Hull}(0) = u_{Hull,0}$ , com  $v_{Batt,C_1}(0) = v_{Batt,C_2}(0)$  obtidos a partir do equilíbrio inicial da bateria.

No código, há proteções numéricas para robustez de simulação (por exemplo, saturação de  $d_{ESC}$  e proteção de divisões). Essas proteções são de implementação e não alteram a forma teórica apresentada.

### 6.23 Modelo interno

O modelo interno corresponde ao sistema `SolarBoatInternalSignalModel` implementado em `<solarboat_model/models/2020/boat/model.py>` (CARDOSO, 2026b). O objetivo deste modelo é reconstruir sinais internos a partir de sinais disponíveis em sensores, mantendo os mesmos 6 estados dinâmicos do modelo simples/completo.

Aqui,  $n_{PVs}$  denota o número de ramais FV agregados, assumindo-se  $n_{PVs} = n_{MPPTs}$  quando esse valor não é informado explicitamente.

Quadro 41 – Entradas do modelo interno

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{Batt}(t)$	Tensão terminal da bateria medida no barramento CC (V)
$d_{ESC}(t)$	Razão cíclica de comando do ESC (-)
$i_{MPPTk,in}(t), v_{MPPTk,in}(t)$	Corrente e tensão medidas na entrada de cada MPPT, com $k = 1, \dots, n_{MPPTs}$ (A, V)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 42 – Estados do modelo interno

Símbolo	Descrição (unidade)
$v_{Batt,C_1}(t)$	Tensão no ramo RC1 da bateria (V)
$v_{Batt,C_2}(t)$	Tensão no ramo RC2 da bateria (V)
$z_{Batt}(t)$	Estado de carga da bateria (SOC) (-)
$i_{Motor}(t)$	Corrente de armadura do motor (A)
$\omega_{Motor}(t)$	Velocidade angular do motor ( $\text{rad s}^{-1}$ )
$u_{Hull}(t)$	Velocidade longitudinal do casco ( $\text{m s}^{-1}$ )

Fonte: Elaboração própria (2026).

O conjunto de saídas do modelo interno é o mesmo do modelo completo:

$$n_y = 80 + 6 n_{MPPTs} \quad (6.201)$$

A principal diferença está na reconstrução da cadeia de geração a partir das entradas medidas em cada MPPT:

$$p_{MPPTk,in}(t) = i_{MPPTk,in}(t) v_{MPPTk,in}(t) \quad (6.202)$$

$$p_{MPPTk,out}(t) = \eta_{MPPT} p_{MPPTk,in}(t) \quad (6.203)$$

$$p_{MPPTs,in}(t) = \sum_{k=1}^{n_{MPPTs}} p_{MPPTk,in}(t), \quad p_{MPPTs,out}(t) = \sum_{k=1}^{n_{MPPTs}} p_{MPPTk,out}(t) \quad (6.204)$$

$$i_{MPPTs,out}(t) = \frac{p_{MPPTs,out}(t)}{v_{Batt}(t)} \quad (6.205)$$

$$p_{PVs,out}(t) = p_{MPPTs,in}(t), \quad p_{PVs,in}(t) = \frac{p_{PVs,out}(t)}{\eta_{PV}} \quad (6.206)$$

$$g_{PV}(t) = \frac{p_{PVs,in}(t)}{n_{PVs} S_{PV}} \quad (6.207)$$

Com isso, as equações de bateria, ESC e propulsão passam a usar  $v_{Batt}(t)$  medido e os termos reconstruídos acima, mantendo a mesma estrutura das equações dinâmicas do modelo completo.

A expressão de  $i_{ESC,in}(t)$  segue a mesma formulação do modelo simples (Equação 6.161), mudando apenas a origem de  $v_{Batt}(t)$ , que neste caso é uma entrada medida.

As equações de estado permanecem:

$$\frac{d}{dt}v_{Batt,C_1}(t) = \frac{R_{Batt,1}i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_1}(t)}{C_{Batt,1}R_{Batt,1}} \quad (6.208)$$

$$\frac{d}{dt}v_{Batt,C_2}(t) = \frac{R_{Batt,2}i_{Batt}(t) - v_{Batt,C_2}(t)}{C_{Batt,2}R_{Batt,2}} \quad (6.209)$$

$$\frac{d}{dt}z_{Batt}(t) = -\frac{\eta_{Batt}i_{Batt}(t)}{Q_{Batt}} \quad (6.210)$$

$$\frac{d}{dt}i_{Motor}(t) = \frac{-K_{Motor,V}\omega_{Motor}(t) - R_{Motor,A}i_{Motor}(t) + v_{Motor}(t)}{L_{Motor,A}} \quad (6.211)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{Motor}(t) = \frac{-B_{Motor}\omega_{Motor}(t) + K_{Motor,Q}i_{Motor}(t) - q_{Motor,load}(t)}{I_{Motor,r} + I_{Motor,r,load}} \quad (6.212)$$

$$\frac{d}{dt}u_{Hull}(t) = \frac{t_{Prop,e}(t) - r_{Hull,t}(t)}{M_{Hull} + M_{Hull,a}} \quad (6.213)$$

Este modelo é utilizado no fluxo de avaliação com dados reais para inferir variáveis internas não medidas diretamente. No trabalho, ele é aplicado no notebook <solarboat\_model/models/2020/boat/solar\_boat.ipynb>.

Na implementação, entradas faltantes e divisões por valores muito pequenos recebem tratamentos numéricos de robustez. No texto, mantém-se a forma teórica das relações.

## 7 PARAMETRIZAÇÃO

Para que possamos simular o modelo, é necessário que seus sinais de entrada  $D_{ESC}(t)$  e  $G_{PV}(t)$  sejam definidos, assim como todos os seus parâmetros.

Para definirmos os parâmetros do modelo, um conjunto de estratégias utilizando diferentes técnicas foi empregado. Alguns parâmetros podem ser definidos por medição direta, como, por exemplo, o diâmetro da hélice  $D_{Prop}$ , já outros são constantes físicas para condições estimadas, como o caso da densidade da água  $\rho_{water}$ .

Diversos parâmetros podem ser aproximados sem a necessidade de otimização, seja de forma direta, por meio de medições físicas, ou indireta, pelo emprego de equações físicas, ou por meio de ensaios realizados por terceiros. Informações de placa, geralmente disponíveis na folha de dados fornecida pelo fabricante, podem também ser utilizadas para delimitar o escopo de busca.

Neste trabalho, tanto o motor, os painéis fotovoltaicos, quanto os componentes eletrônicos possuem folhas de dados com informações de placa e ensaios laboratoriais dos quais se pode fazer uso para extrair alguns dos parâmetros (EMERY, 2009). Como exemplo de medição direta, pode-se, também, desmontar a transmissão da embarcação, e contar o número de dentes das engrenagens da transmissão para encontrar sua relação. Já outros parâmetros, como a eficiência do *ESC* e *MPPTs*, podem ser estimados a partir de testes de bancada realizados pelo autor em conjunto com a equipe em ocasiões passadas (REED *et al.*, 2025).

Quando as alternativas mencionadas não são suficientes, podemos variar os parâmetros e testar o modelo milhares de vezes, utilizando técnicas de otimização para encontrarmos o conjunto de valores dos parâmetros que resulta no modelo que melhor representa os dados.

É importante notar que as técnicas de otimização nem sempre convergem, e a quantidade de parâmetros expande o espaço de busca exponencialmente. Por isso, quando possível, damos preferência aos métodos descritos inicialmente.

De modo a auxiliar esta decisão, uma ferramenta chamada análise de sensibilidade pode ser utilizada como um indicativo do impacto que as incertezas de cada parâmetro causam em cada uma das saídas dos modelos (SALTELLI *et al.*, 2007).

Embora seja possível otimizar o modelo completo, o autor encontrou uma maior facilidade de convergência quando reduziu o escopo das otimizações, consolidando três etapas: a primeira, na qual se otimizam os parâmetros do sistema de geração, uma segunda, em que se otimizam os parâmetros da bateria, e a última, em que se otimizam os parâmetros do sistema propulsivo.

Tais subsistemas podem ser reduzidos ainda mais: considerando o caso da propulsão, o motor poderia ser otimizado em separado da transmissão com a hélice.

Isso não só é interessante do ponto de vista prático no processo de otimização, mas também desvincula a compensação dos erros entre os parâmetros de cada subsistema (por exemplo, a eficiência da transmissão compensando um erro no passo da hélice), permitindo-nos substituir partes do sistema, como a bateria, sem ter de ajustar os parâmetros da propulsão ou dos painéis fotovoltaicos. Tal separação proporciona também maior confiabilidade em análises em que extrapolamos os modelos, como, por exemplo, simulando a situação hipotética de trocar a relação de rotação da transmissão, ou a tensão da bateria.

Um ponto que facilita a definição dos parâmetros empíricos é que, por conta da natureza das equações físicas, parte dos parâmetros tem grande grau de interação, fazendo com que a imprecisão da definição de alguns parâmetros empíricos seja compensada pelos parâmetros otimizados. O contraponto, neste caso, vem do fato de que, ao permitirmos tais compensações, perdemos a confiabilidade na separabilidade dos modelos, como mencionado logo acima.

Tais interações podem ser compreendidas por uma análise matemática das equações dos modelos, que seria um processo complexo para nosso sistema de equações. Como alternativa, o estudo da análise de sensibilidade pode também ser empregado, quando, por exemplo, o valor de um índice de Sobol de primeira ordem não se equipara ao valor do índice total, parcialmente explicado pelos níveis dos índices de segunda ordem (SALTELLI *et al.*, 2007).

## 7.1 Implementação da otimização

Quando a definição por medição direta ou por empismo não foi suficiente para determinar os parâmetros, os ajustes foram implementados em *Python* com apoio da biblioteca `pymoo` (BLANK; DEB, 2020), de forma a padronizar a execução dos experimentos e registrar os hiperparâmetros utilizados. A estrutura comum foi concentrada em um utilitário de otimização no repositório do modelo (`<solarboat_model/utils/optimization.py>`) (CARDOSO, 2026b), utilizado por uma série de *notebooks* programados especificamente para cada subsistema.

Em todos os casos, o vetor de decisão  $x$  contém apenas o subconjunto de parâmetros selecionados para ajuste, cada um associado a um intervalo de busca fisicamente plausível. Para cada candidato, o simulador é executado com as mesmas entradas experimentais (séries temporais reamostradas) e o estado inicial é calculado a partir das condições iniciais e das entradas no instante  $t = 0$ . Para reduzir o efeito de escalas distintas entre variáveis, as séries medidas e simuladas são escalonadas por uma transformação robusta (`RobustScaler`) antes do cálculo do erro (PEDREGOSA *et al.*, 2012).

A função-objetivo é definida como o erro quadrático médio ponderado entre

as variáveis observadas, de modo que múltiplas saídas possam ser ajustadas simultaneamente sem que uma única grandeza domine o critério por escala. Restrições adicionais (por exemplo, desigualdades simples entre parâmetros) são tratadas na forma  $g(x) \leq 0$  e avaliadas juntamente com o processo de busca.

Nos ajustes de objetivo único, adotou-se o algoritmo de evolução diferencial (*Differential Evolution*, DE) disponibilizado no `pymoo`, com amostragem inicial por hipercubo latino e critérios de parada por número máximo de gerações/avaliações e tolerâncias de convergência. No estudo de caso do modelo completo, no qual o problema é formulado como multiobjetivo, utilizou-se o algoritmo *NSGA-II* (também via `pymoo`) para obtenção de uma aproximação da fronteira de Pareto. Para garantir reprodutibilidade, foi fixada uma semente aleatória e o histórico de evolução foi armazenado, permitindo inspeção do progresso e a exportação dos melhores parâmetros.

As otimizações de referência deste trabalho estão documentadas e executáveis nos *notebooks* do repositório na pasta `<solarboat_model/models/2020>`, incluindo (CARDOSO, 2026b):

- `<generation/generation_optimization.ipynb>`,
- `<battery/PNGV_1rc_optimization.ipynb>`,
- `<battery/PNGV_2rc_optimization.ipynb>`,
- `<esc/mam17_optimization.ipynb>`,
- `<motor/me0909_steady_state_optimization.ipynb>`,
- `<propulsion/propulsion_optimization.ipynb>` e
- `<boat/optimization_unified.ipynb>`.

As análises de sensibilidade associadas aos ajustes seguem a mesma organização (em `<solarboat_model/models/2020>`), por exemplo:

- `<generation/generation_sensitivity.ipynb>`,
- `<battery/PNGV_2rc_sensitivity.ipynb>` e
- `<motor/me0909_steady_state_sensitivity.ipynb>`.

Os parâmetros adotados em cada etapa são exportados em arquivos JSON versionados no repositório, como, por exemplo:

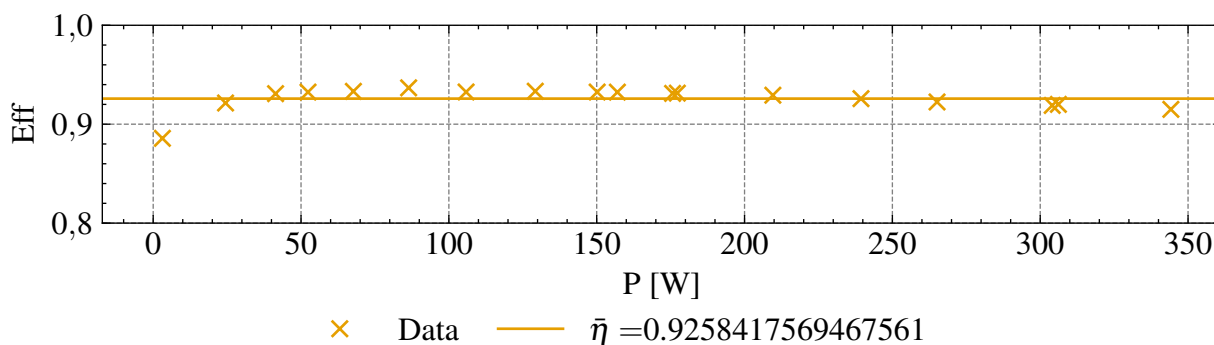
- `<generation/generation_params.json>` e
- `<battery/PNGV_2rc_params.json>`.

## 7.2 Parâmetros da geração energética

Como notado anteriormente, a embarcação de 2019/2020 utilizava quatro painéis do modelo JKM260P. A área de cada painel  $A_{PV}$  pode ser calculada por meio do produto de sua largura ( $992 \times 10^{-3}$  m) e altura (1,650 m). Seu *datasheet* (Jinko Solar, 2015) também apresenta a eficiência como 15,88 %.

A partir de um ensaio de eficiência dos conversores dos MPPTs, realizado pelo autor em conjunto com outros membros da equipe, a eficiência média para o intervalo de potência entre 1 e 350 W é calculada como aproximadamente 92,58 %, como mostrado na Figura 42. Os cálculos do ensaio e a consolidação dessa curva estão documentados no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/mppt/mcc18.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

Figura 42 – Curva de eficiência do MPPT



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Relação entre potência processada pelo MPPT (W) e eficiência. Os pontos representam os dados e a linha a média  $\bar{\eta}$ ; a tendência resume o desempenho do MPPT usado na parametrização do subsistema de geração.

Um modelo algébrico foi construído a partir das Equações 6.104 e 6.105 (potência gerada pelos PV), 6.183 e 6.96 (potência no MPPT), e 6.102 e 6.101 (corrente injetada no barramento). Utiliza-se o sinal de *duty-cycle*  $d_{MPPT}$  para obter  $i_{MPPT,in}$  e  $v_{MPPT,in}$ . As entradas do modelo são  $g_{PV}$ ,  $v_{Batt}$ , e  $d_{MPPT}$ , e as saídas são  $i_{MPPT,out}$ ,  $v_{MPPT,in}$  e  $i_{MPPT,in}$ . Os parâmetros do modelo são apenas  $A_{PV}$ ,  $\eta_{PV}$ , e  $\eta_{MPPTs}$ .

Segundo Emery (2009), as incertezas para os valores dos parâmetros  $A_{PV}$  e  $\eta_{PV}$  são  $630 \times 10^{-3} \%$  e 3,9 %, respectivamente, com cobertura de 95 %. Já para o ensaio realizado sobre a eficiência do MPPT, baseado nas especificações técnicas dos equipamentos utilizados para a medição de tensões e correntes (Fluke 115, com acurácia de  $500 \times 10^{-3} \%$ , e 1 % para tensão e corrente, respectivamente), o autor estima, utilizando a equação de propagação de incertezas para produto, cerca de 1,58 % para a eficiência medida.

Para compreender o impacto das incertezas em cada parâmetro neste modelo, uma análise de sensibilidade global baseada em variância foi realizada, amos-

trando os parâmetros  $A_{PV}$ ,  $\eta_{PV}$ , e  $\eta_{MPPTs}$  uniformemente utilizando  $2^{16}$  amostras, mantendo a tensão de 36 V nas baterias ( $v_{Batt}$ ) e  $1,000 \times 10^3 \text{ W/m}^2$  de irradiância ( $g_{PV}$ ).

Os experimentos de sensibilidade e de otimização desse subsistema estão registrados nos *notebooks* <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_sensitivity.ipynb> e <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b). Os parâmetros consolidados do modelo de geração foram exportados para <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_params.json>. Os valores exportados correspondem aos parâmetros resumidos na Tabela 3, utilizados nas etapas de otimização, e simulação que dependem desse subsistema (por exemplo, Tabela 11).

Como resultado, disponível na Tabela 1 para as saídas  $i_{MPPT,in}$ ,  $i_{MPPT,out}$  e  $v_{MPPT,in}$ , o parâmetro mais impactante é o  $\eta_{PV}$  (aproximadamente 84 % para os índices de primeira ordem e de ordem total), seguido pelo  $\eta_{MPPT}$  (aproximadamente 14 %) e então 2 % para  $A_{PV}$ . Esses resultados são ilustrados nas Figuras 43, 44 e 45. Para  $v_{MPPT,in}$ , obteve-se índice total e de primeira ordem de 1,00 para  $\eta_{MPPT}$ , com contribuição nula dos demais parâmetros; para todas as saídas, os índices de segunda ordem foram próximos de zero, e as estimativas apresentaram menos de 1 % de incerteza dentro de um intervalo de confiança de 95 %.

Além das incertezas na definição de tais estimativas para os parâmetros, durante a operação em condições reais, é de se esperar que os painéis fotovoltaicos e conversores, assim como outros equipamentos, apresentem valores diferentes dos valores obtidos por meio de testes em ambientes controlados. No caso dos conversores eletrônicos, a sua eficiência pode também ser diferente dependendo do ponto de operação do conversor (por exemplo, o *duty-cycle* aplicado, tensão, corrente, e temperatura ao qual é submetido), que será também diferente do teste executado em laboratório. Vale considerar também que para todo equipamento existe uma variação de parâmetros construtivos (como, por exemplo, a tolerância dos componentes eletrônicos), resultando em uma performance marginalmente diferente para cada unidade.

Por conta de os parâmetros serem todos multiplicativos, sem uma saída que sofra impacto significativo da área  $A_{PV}$  em comparação aos outros parâmetros, o efeito deste parâmetro torna-se indistinguível durante a otimização, resultando em um valor mal condicionado pelos dados (ou seja, a diferença entre os múltiplos mínimos locais é muito pequena). Dessa forma, o autor opta por otimizar apenas os dois parâmetros mais importantes:  $\eta_{PV}$  e  $\eta_{MPPTs}$ , mantendo o  $A_{PV}$  exatamente no valor em que o fabricante especifica em seu *datasheet*.

É interessante observar que pelo fato de o  $A_{PV}$  não ser discernível de  $\eta_{PV}$  (por estarem juntos e multiplicando nas equações), sua incerteza será compensada durante a otimização pelo valor obtido de  $\eta_{PV}$ .

**Tabela 1 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf
mppt_i_in	pv_eta	S1	0,84	0,01
		ST	0,84	0,01
	pv_S	S1	0,02	0,00
		ST	0,02	0,00
	mppt_eta	S1	0,14	0,00
		ST	0,14	0,00
	(pv_eta, mppt_eta)	S2	0,00	0,01
(pv_S, pv_eta)	S2	0,00	0,00	
(pv_S, mppt_eta)	S2	0,00	0,00	
mppt_i_out	pv_eta	S1	0,84	0,01
		ST	0,84	0,01
	pv_S	S1	0,02	0,00
		ST	0,02	0,00
	mppt_eta	S1	0,14	0,00
		ST	0,14	0,00
	(pv_eta, mppt_eta)	S2	0,00	0,01
(pv_S, pv_eta)	S2	0,00	0,00	
(pv_S, mppt_eta)	S2	0,00	0,00	
mppt_v_in	pv_eta	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	pv_S	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	mppt_eta	S1	1,00	0,01
		ST	1,00	0,01
	(pv_eta, mppt_eta)	S2	0,00	0,00
(pv_S, pv_eta)	S2	0,00	0,00	
(pv_S, mppt_eta)	S2	0,00	0,00	

Fonte: Elaboração Própria (2026).

O problema de otimização pode ser delineado como no conjunto de Equações 7.1, que se lê como: dada uma função do modelo ( $f(T, U, X_0, p)$ ), com dados de entrada ( $U$ ), condições iniciais ( $X_0$ ), e parâmetros do modelo ( $p$ ), busca-se minimizar o erro quadrático médio ponderado entre as previsões do modelo ( $\hat{Y}(t)$ ) e os dados reais ( $Y(t)$ ), sujeitos aos limites dos parâmetros.

$$\min_{\substack{\eta_{MPPTs}, \\ \eta_{PV}}} \text{MSE}_w(\tilde{Y}(t), \hat{Y}(t)) \tag{7.1a}$$

$$\text{s.t.} \quad \hat{Y}(t) = f(T, U, X_0, \eta_{MPPTs}, \eta_{PV}), \tag{7.1b}$$

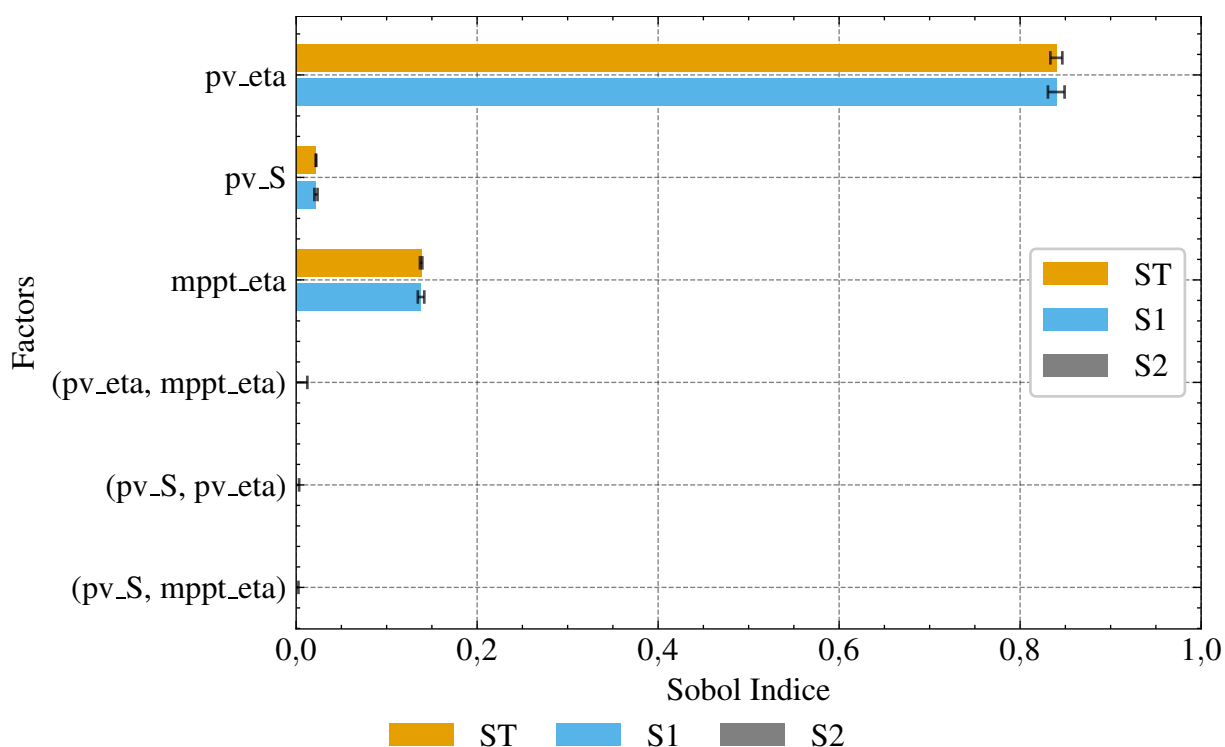
$$0,9259 - 25\% \leq \eta_{MPPTs} \leq 1,0, \tag{7.1c}$$

$$0,1588 - 25\% \leq \eta_{PV} \leq 0,1588 + 25\% \tag{7.1d}$$

onde:

- $\text{MSE}_w(\tilde{Y}, \hat{Y}) = \frac{1}{Nn_y} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} w_j \left( \tilde{y}_j(t_k) - \hat{y}_j(t_k) \right)^2$ ;
- $N$  é o número de amostras e  $n_y$  o número de saídas;

Figura 43 – Índices de Sobol para a saída mppt\_i\_out em regime permanente

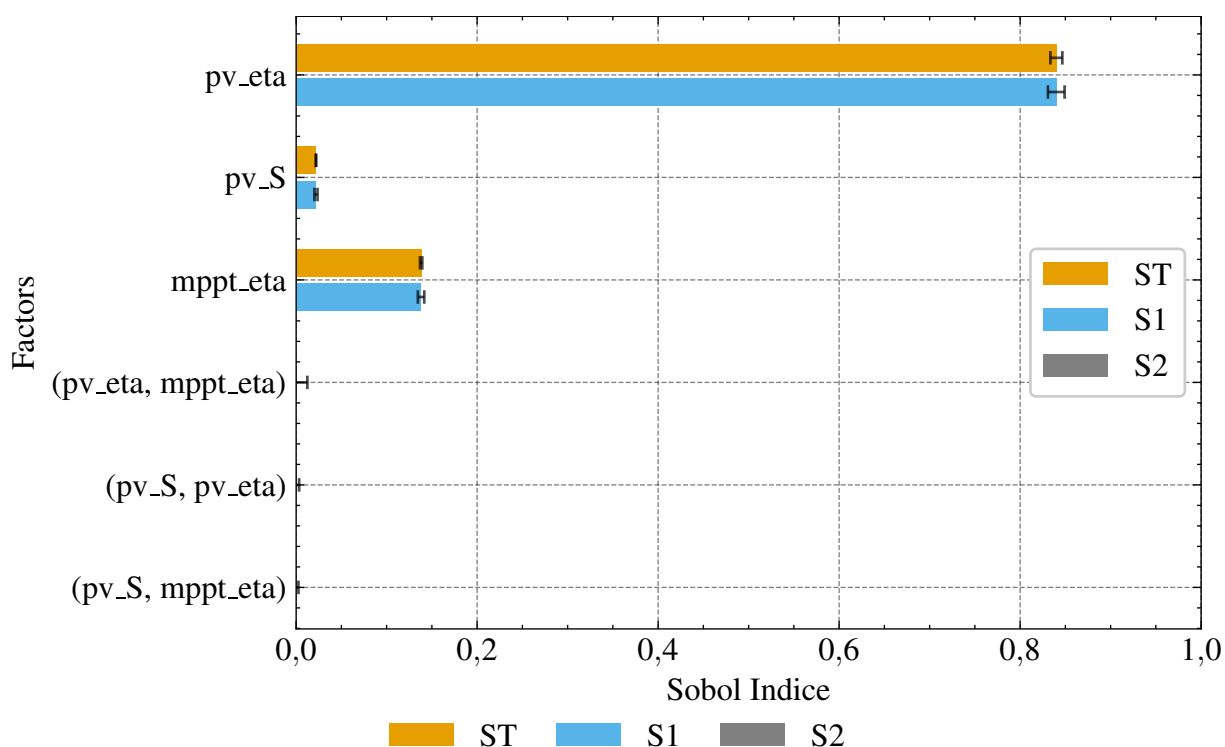


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (S1, S2 e ST) para a saída  $i_{MPPT,out}$  em regime permanente. O gráfico quantifica a contribuição de  $\eta_{PV}$ ,  $S_{PV}$  e  $\eta_{MPPT}$ , bem como suas interações, para a variabilidade da corrente de saída.

- $\tilde{y}$  e  $\hat{y}$  são os sinais escalonados no conjunto de treino (nesta etapa, com *RobustScaler*);
- $w_j$  é o peso do sinal  $j$  na função objetivo (aqui, pesos unitários);
- $Y = [i_{MPPT,in}, v_{MPPT,in}]$  é o vetor de sinais de treino;
- $\hat{Y} = [\hat{i}_{MPPT,in}, \hat{v}_{MPPT,in}]$  é o vetor de sinais preditos do modelo;
- $T$  é o vetor de tempo;
- $U = [g_{PV}, v_{Batt}, d_{MPPT}]$  é o vetor de sinais de entradas;
- $X_0 = [ ]$  é o vetor de condições iniciais dos estados (vazio).

Utilizando o método DE (*Differential Evolution*, do inglês, Evolução Diferencial) para otimizar o problema descrito acima, encontrou-se uma eficiência  $\eta_{MPPTs}$  de 93,23%, e  $\eta_{PV}$  de 14,31%. Esses valores permanecem dentro dos limites impostos no problema ( $\pm 25\%$  em torno dos valores nominais); a redução observada em  $\eta_{PV}$  em relação ao valor de *datasheet* pode ser interpretada como um efeito combinado de

Figura 44 – Índices de Sobol para a saída  $i_{MPPT,in}$  em regime permanente

Fonte: Elaboração Própria (2026).

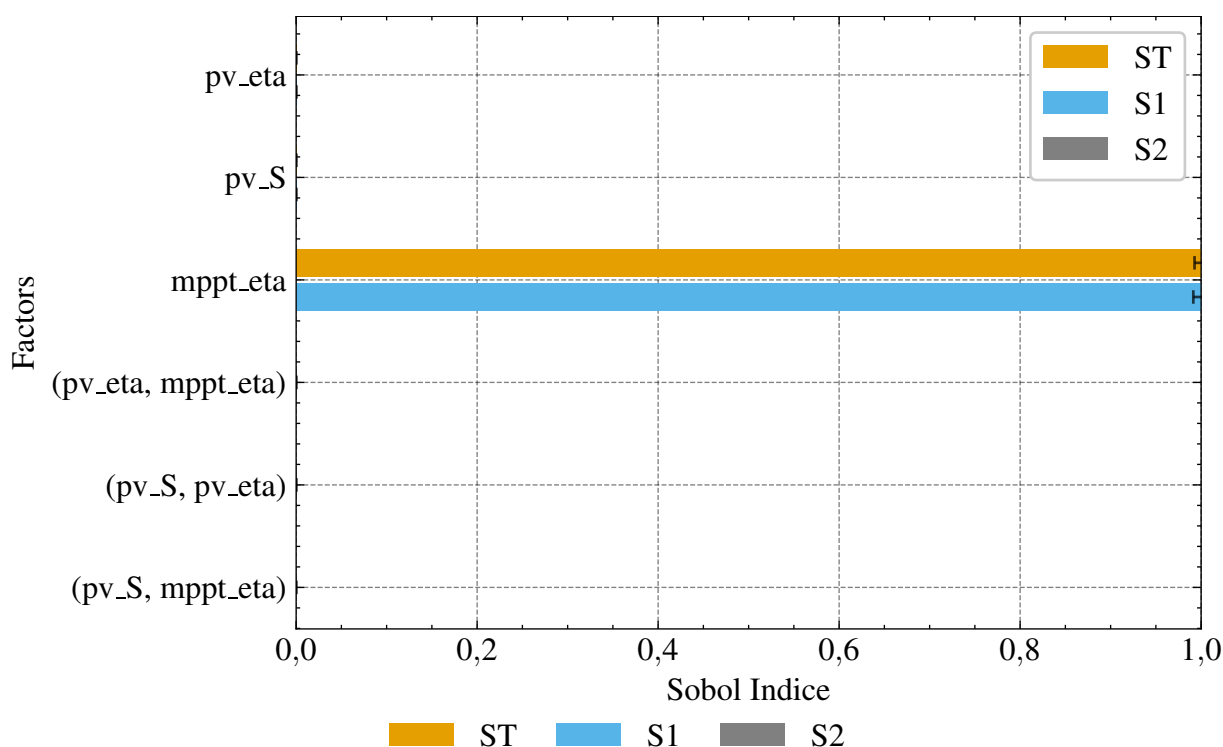
Legenda: Índices de Sobol (S1, S2 e ST) para a saída  $i_{MPPT,in}$  em regime permanente. As barras mostram a importância relativa de  $\eta_{PV}$ ,  $S_{PV}$  e  $\eta_{MPPT}$  e suas interações na variação da corrente de entrada.

condições reais de operação e da simplificação do modelo do PV (que não representa explicitamente a curva  $i \times v$  do painel).

Para cada otimização que utiliza os dados da competição, os dados foram divididos em múltiplas seção (e às vezes em subseções), conforme a necessidade tanto de distinguir fenômenos que ocorriam, quanto facilitar a logística de divisão entre treino e teste. Como um exemplo, as regiões onde a bateria apresentava comportamentos de descarga profunda ou gaseificação foram excluídas dos dados de treino, pois dificultavam a parametrização do modelo escolhido, que não é capaz de representar tais comportamentos.

A divisão entre treino e teste foi feita empiricamente de maneira a utilizar o mínimo possível de dados para treino sem prejudicar a parametrização, aumentando a velocidade das diversas iterações de otimização realizadas. Como os modelos seguem equações físicas com baixa liberdade em comparação com modelos caixa-preta, o percentual de dados utilizado para treino pode ser reduzido a uma faixa entre 5 a 30% sem perder significativamente a qualidade e generalização dos parâmetros otimizados. Os intervalos exatos e a duração de cada seção usada nesta etapa estão apresentados na Tabela 24.

Figura 45 – Índices de Sobol para a saída  $mppt\_v\_in$  em regime permanente



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (S1, S2 e ST) para a tensão de entrada  $v_{MPPT,in}$  em regime permanente. O gráfico evidencia a sensibilidade da tensão a parâmetros do PV e do MPPT e suas interações.

No que diz respeito à convergência da otimização, a Figura 46 mostra a evolução dos parâmetros ao longo das gerações, enquanto a Figura 47 mostra a evolução do erro, indicando convergência.

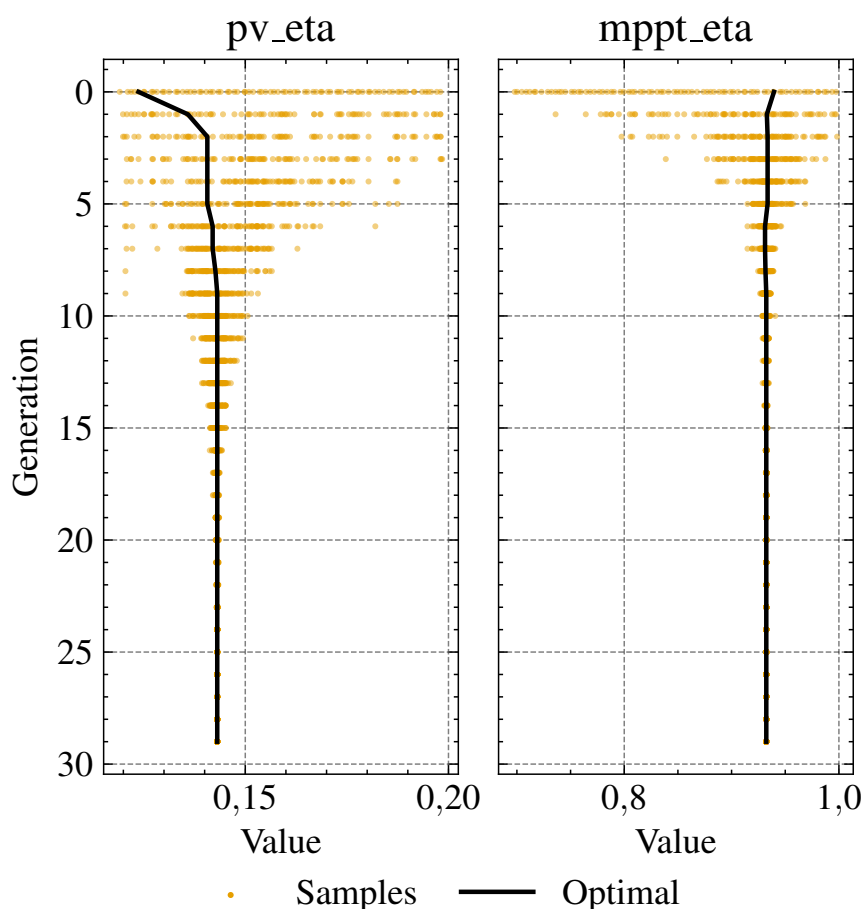
Nas Figuras 48 e 49, além do erro quadrático médio, é possível avaliar os resíduos no conjunto de treino ao comparar as saídas previstas pelo modelo com os sinais originais. Para  $i_{MPPT,in}$  observa-se boa aderência; para  $v_{MPPT,in}$  a dispersão é maior, coerente com a limitação do modelo simplificado (por assumir uma impedância equivalente ao invés de descrever a curva  $i \times v$  do painel).

Nota: erro quadrático médio (MSE); *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) — erro percentual médio absoluto; *Root Mean Squared Error* (RMSE) — raiz do erro quadrático médio; erro absoluto (AE); e  $R^2$  é o coeficiente de determinação.

Para melhor avaliação, a mesma metodologia é aplicada ao *dataset* inteiro (exceto nas partes em que não há dados suficientes, como na Seção A), resultando em uma divisão treino/teste de aproximadamente 27 (treino) e 73% (teste).

Como se pode observar na Tabela 2, o modelo apresenta desempenho consistente para a corrente  $i_{MPPT,in}$  na maior parte das seções, com perda de gene-

Figura 46 – Evolução dos parâmetros ótimos do modelo PVs+MPPTs a cada geração



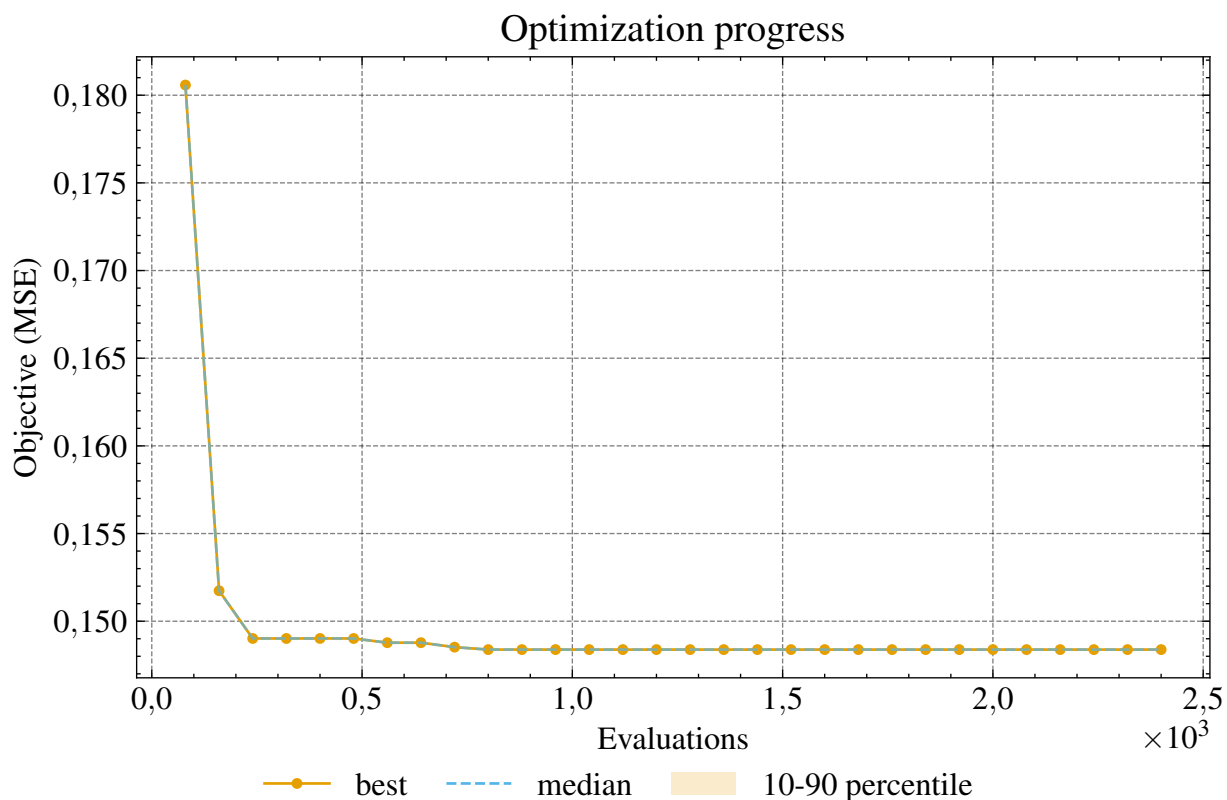
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Evolução dos parâmetros ótimos do modelo PV+MPPT ( $\eta_{PV}$  e  $\eta_{MPPT}$ ) ao longo das gerações. As amostras e o valor ótimo indicam convergência do processo de calibração.

realização na seção F. Para a saída  $v_{MPPT,in}$ , as maiores discrepâncias aparecem nas seções A, e F, onde o  $R^2$  torna-se negativo. Ao observar os sinais nas Figuras 97 e 105 (no Apêndice A), este comportamento pode ser associado à limitação do modelo simplificado por considerar uma impedância constante ao invés de descrever a curva tensão-corrente do painel fotovoltaico. Este problema pode ser mitigado com um modelo mais fiel, com possivelmente maior número de parâmetros e, portanto, maior custo computacional.

Com o resumo dos parâmetros apresentados na Tabela 3, a geração de energia está completamente parametrizada.

Figura 47 – Evolução do erro de otimização do modelo da Geração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Evolução do erro objetivo ( $MSE_w$ , em sinais escalonados) na otimização do modelo de geração, com curvas de melhor, mediana e percentis 10–90%.

Tabela 2 – Métricas de avaliação do modelo da Geração

section	data	MSE	MAE	RMSE	AE	R2
A	mppt_i_in	0,34	0,48	0,59	12,30	0,72
	mppt_v_in	2298,64	39,00	47,94	-1092,13	-44,71
B	mppt_i_in	0,90	0,72	0,95	-4,60	0,88
	mppt_v_in	0,64	0,67	0,80	-51,35	0,62
D	mppt_i_in	2,42	1,30	1,55	1,86	0,54
	mppt_v_in	0,24	0,38	0,49	1,25	0,82
E	mppt_i_in	1,51	0,89	1,23	9,05	0,77
	mppt_v_in	0,24	0,40	0,49	-2,70	0,43
F	mppt_i_in	0,58	0,65	0,76	9,26	-0,28
	mppt_v_in	1,54	1,02	1,24	-37,64	-6,25

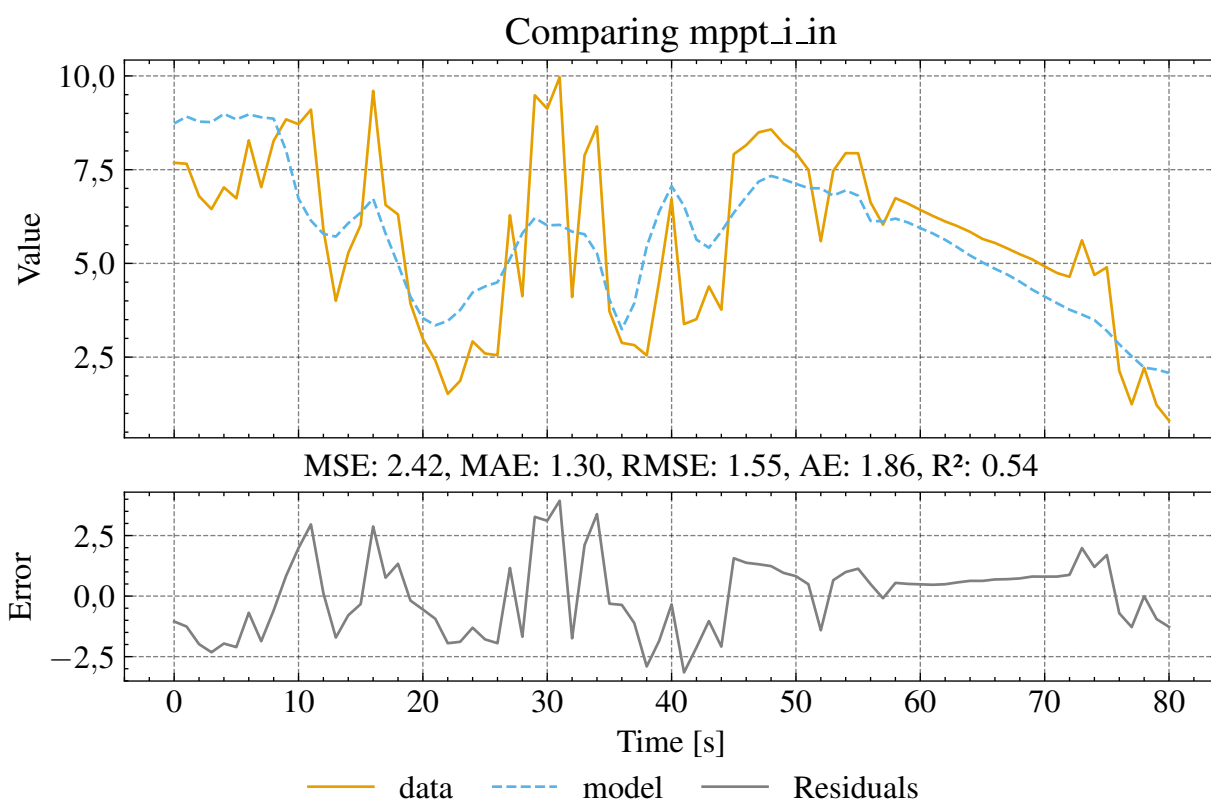
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Tabela 3 – Parâmetros PV e MPPT

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$A_{PV}$	1,6368	m <sup>2</sup>	Área de captação do painel fotovoltaico
$\eta_{PV}$	0,1431	-	Eficiência do painel fotovoltaico
$\eta_{MPPT}$	0,9323	-	Eficiência do MPPT
$n_{MPPTs}$	4	-	Quantidade de MPPTs (e painéis)

Fonte: Elaboração Própria (2026).

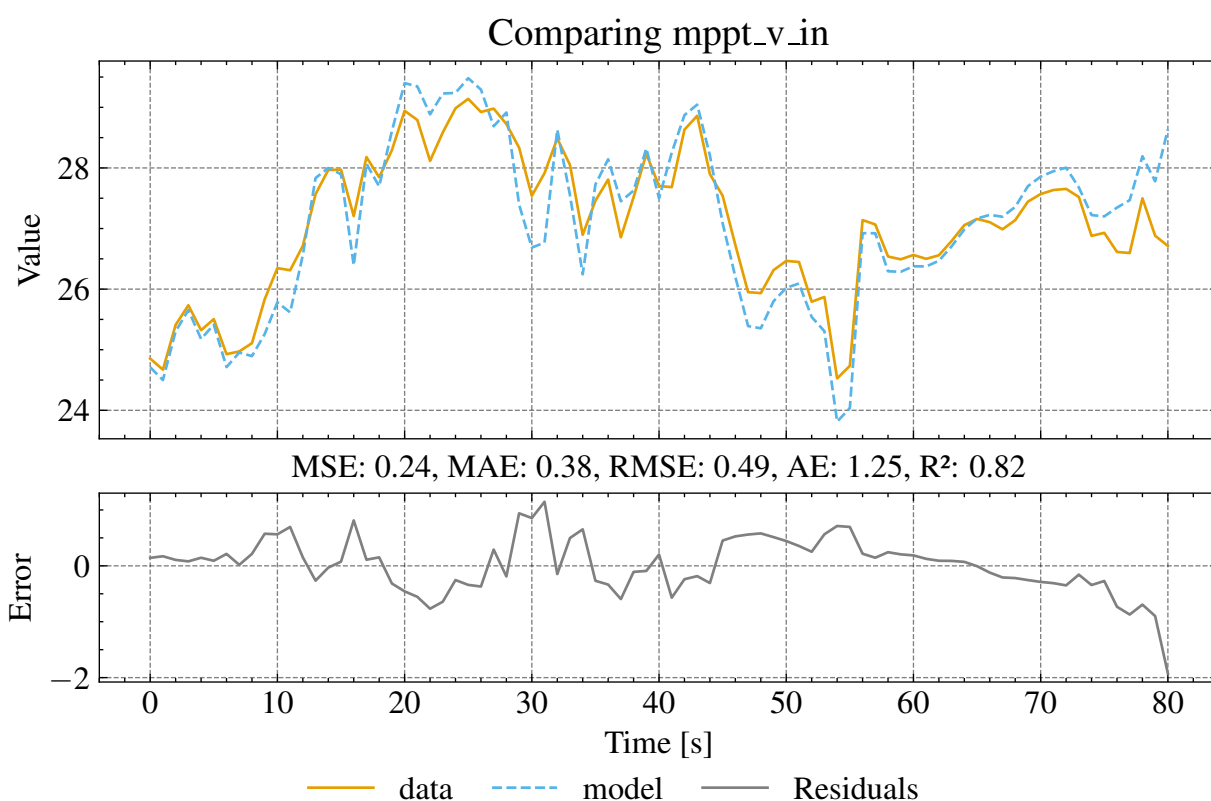
Figura 48 – Comparação do sinal mppt\_i\_in do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do MPPT ( $i_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado. O painel de resíduos e as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) quantificam a aderência no conjunto de treino.

Figura 49 – Comparação do sinal mppt\_v\_in do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão de entrada do MPPT ( $v_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado. O gráfico exibe séries temporais, resíduos e métricas de erro para avaliar a qualidade do ajuste.

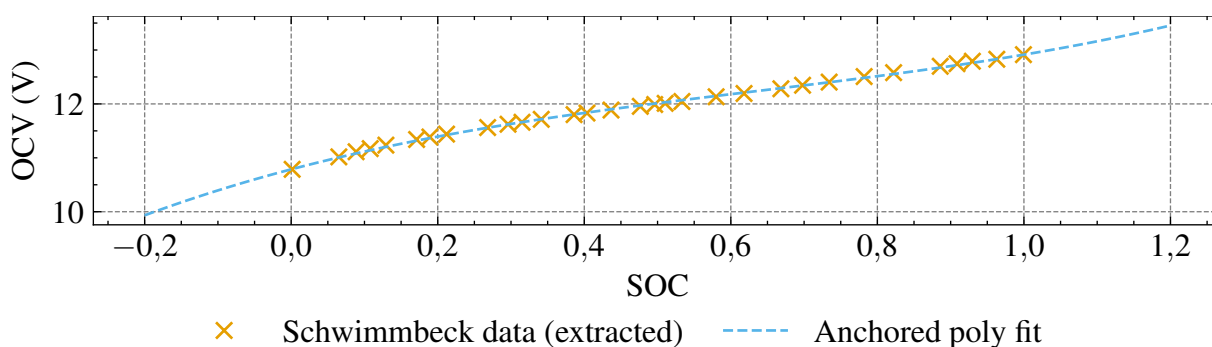
### 7.3 Parâmetros da bateria

A parametrização do modelo de circuito equivalente de segunda ordem descrito pelas equações 6.82 e 6.83 (dinâmica dos capacitores), 6.84 (estado de carga), 6.85 (tensão nos terminais) e 6.87 (tensão de circuito aberto), pode ser iniciada pela definição do polinômio (ou da LUT (*Look-up Table*)), seguida por um processo de otimização para os parâmetros referentes aos elementos do circuito. No presente trabalho, como não temos registros de estado de carga, e temos descontinuidades nos dados, antes de qualquer simulação, faz-se necessária a estimação do estado de carga inicial da bateria.

Embora seja possível otimizar um polinômio que represente a tensão de circuito aberto da bateria, por meio de restrições durante a otimização, o processo não se mostrou eficaz com os dados disponíveis. Conhecendo o tipo de célula, buscaram-se trabalhos semelhantes que expusessem os dados. Em (SCHWIMMBECK *et al.*, 2019), os autores testam e apresentam os dados para baterias semelhantes, os quais podem ser utilizados como base. Para tanto, extraíram-se pontos dos gráficos apresentados e realizou-se uma regressão linear para encontrar os coeficientes de um polinômio de terceiro grau. A Figura 50 mostra o resultado, enquanto os coeficientes são listados abaixo:

$$a_0 = 10.7864583333, \quad a_1 = 3.5863893517, \quad a_2 = -3.0753011401, \quad a_3 = 1.6163721814.$$

Figura 50 – Regressão polinomial



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Dados extraídos de Schwimmbeck *et al.* e ajuste polinomial ancorado de terceira ordem para a tensão de circuito aberto (OCV). O eixo horizontal mostra o estado de carga (SOC, adimensional) e o eixo vertical a OCV em volts; os pontos representam os dados digitalizados da referência e a curva representa o polinômio utilizado como LUT/coeficientes de entrada na otimização do modelo 2RC.

Para considerar as limitações do modelo em representar comportamentos não regulares, como os efeitos da descarga profunda, e da sobrecarga (como gaseificação), optou-se por seccionar os dados de maneira a evitar tais regiões de operação durante a otimização. Para os testes, porém, tais regiões foram mantidas.

A análise de sensibilidade e os ajustes por otimização foram executados e registrados nos *notebooks* <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_sensitivity.ipynb> e <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b). As seções semânticas adotadas, com seus intervalos de tempo, duração e papel (treino/teste), estão consolidadas na Tabela 25.

Em termos de reprodutibilidade, a otimização do modelo 2RC utiliza como entrada os coeficientes da tensão de circuito aberto, gerados em <solarboat\_model/models/2020/battery/agm\_typical\_ocv\_model\_optimization.ipynb> e carregados do arquivo <solarboat\_model/models/2020/battery/battery\_ocv\_params.json>. Como saída, o conjunto final de parâmetros do circuito equivalente é exportado para <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_params.json> (e recarregado no próprio *notebook* para verificação). Os valores carregados e exportados são os mesmos apresentados na Tabela 5, que consolida os parâmetros adotados no restante do trabalho.

A partir da análise de sensibilidade realizada (tabelas e figuras no Apêndice C), depreende-se que, quando as incertezas são iguais a 1% para todos os parâmetros, os parâmetros mais importantes são distintos para cada uma das saídas do modelo: para a saída  $v_{Batt}(t)$ , observa-se a dominância dos parâmetros do primeiro ramo RC ( $R_{Batt,1}$  e  $C_{Batt,1}$ ), tanto para um degrau de descarga (150 A) quanto para um degrau de carga (-30 A), enquanto para o estado de carga  $z_{Batt}(t)$ , e para a tensão de circuito aberto  $v_{Batt,oc}(t)$ , a variância divide-se praticamente entre  $Q_{Batt}$  e  $\eta_{Batt}$ , com índices de primeira ordem próximos de  $500 \times 10^{-3}$

Como o valor de  $z_{Batt}(t)$  não é conhecido para nenhuma das seções, seu valor inicial foi otimizado separadamente, resolvendo o problema descrito pelas Equações 7.2.

$$\min_{z_{Batt}(t_0)} \text{MSE}(v_{Batt}(t), \hat{v}_{Batt}(t)) \quad (7.2a)$$

$$\text{s.t.} \quad \hat{v}_{Batt}(t) = f(T, U, X_0, p), \quad (7.2b)$$

$$-0.5 \leq z_{Batt}(t_0) \leq 1.5 \quad (7.2c)$$

Nesta etapa, utiliza-se  $\text{MSE}(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_k - b_k)^2$  diretamente sobre  $v_{Batt}(t)$  (sem escalonamento), conforme implementado na busca de  $z_{Batt}(t_0)$ .

Para a otimização dos parâmetros dos elementos do circuito, o problema pode ser definido como no conjunto de Equações 7.3.

$$\min_{\substack{R_{Batt,0}, \\ R_{Batt,1}, C_{Batt,1}, \\ R_{Batt,2}, C_{Batt,2}}} \text{MSE}_w(\tilde{Y}(t), \hat{\tilde{Y}}(t)) \quad (7.3a)$$

$$\text{s.t.} \quad \hat{Y}(t) = f \left( T, U, X_0, \begin{matrix} R_{Batt,0}, \\ R_{Batt,1}, C_{Batt,1}, \\ R_{Batt,2}, C_{Batt,2} \end{matrix} \right), \quad (7.3b)$$

$$1 \times 10^{-3} \leq R_{Batt,0} \leq 10 \times 10^{-3}, \quad (7.3c)$$

$$1 \times 10^{-3} \leq R_{Batt,1} \leq 100 \times 10^{-3}, \quad (7.3d)$$

$$1 \times 10^{-3} \leq R_{Batt,2} \leq 100 \times 10^{-3}, \quad (7.3e)$$

$$1 \leq C_{Batt,1} \leq 1 \times 10^3, \quad (7.3f)$$

$$100 \leq C_{Batt,2} \leq 1 \times 10^6 \quad (7.3g)$$

onde:

- $\text{MSE}_w(\tilde{Y}, \hat{Y}) = \frac{1}{N n_y} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} w_j \left( \tilde{y}_j(t_k) - \hat{y}_j(t_k) \right)^2$ ;
- $N$  é o número de amostras e  $n_y$  o número de saídas;
- $\tilde{y}$  e  $\hat{y}$  são os sinais escalonados no conjunto de treino (nesta etapa, com *MinMaxScaler*);
- $w_j$  é o peso do sinal  $j$  na função objetivo (aqui, pesos unitários).

Além dos limites acima, foram impostas restrições simples de ordenamento:

$$R_{Batt,0} < R_{Batt,1}, R_{Batt,0} < R_{Batt,2} \text{ e } C_{Batt,1} < C_{Batt,2}.$$

Dessa maneira, ao realizar a otimização utilizando o método da Evolução Diferencial (*DE*), obtiveram-se os valores mostrados na Figura 51, que compara o sinal de tensão  $v_{Batt}(t)$  e a predição do modelo na seção "D23". As figuras correspondentes às demais seções, assim como os valores de  $z_{Batt}(t_0)$  otimizados em cada uma delas, são apresentados no Apêndice B.

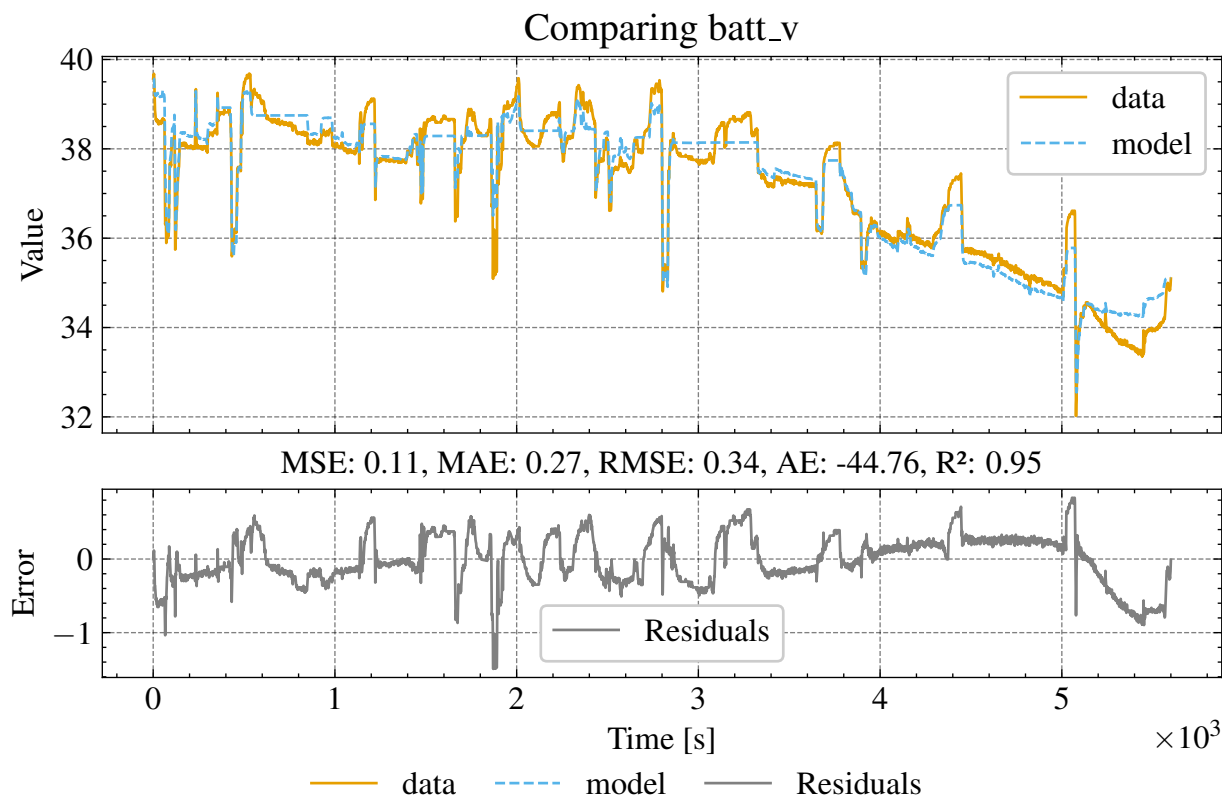
As métricas de erro exportadas para todas as seções encontram-se na Tabela 4. Como se pode observar, o modelo apresenta boa aderência na seção "D23", utilizada como recorte de treino, com  $R^2 = 0,95$  e  $RMSE = 340 \times 10^{-3} \text{ V}$ .

Ao aplicar a mesma metodologia às demais seções, observa-se desempenho variável, porém coerente com as limitações do modelo.

Em particular, a seção "D12", que corresponde a um trecho de carregamento pré-corrída, apresenta um coeficiente de determinação negativo ( $R^2 = -0,36$ ), e a seção "D56", que corresponde a um intervalo de sobrecarga pós-corrída, apresenta  $R^2 = 0,04$ . A seção "D34", que representa um trecho de descarga profunda durante a corrída, apresenta  $R^2 = 0,72$ .

Ao observar os sinais nas Figuras 107, 112 e 109 (no Apêndice B), é possível relacionar as maiores discrepâncias às seções que contêm esses regimes de operação.

Figura 51 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D23



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação temporal entre a tensão terminal medida da bateria ( $v_{Batt}$ ) e a predição do modelo 2RC otimizado na seção D23. O gráfico principal apresenta as séries medida e modelada em função do tempo (s), enquanto o painel de resíduos mostra o erro instantâneo (medida menos modelo); as métricas globais (MSE, MAE, RMSE, erro médio e  $R^2$ ) são reportadas no próprio gráfico para quantificar a aderência do ajuste.

Tabela 4 – Métricas de avaliação do modelo da Bateria PNGV2

section	data	MSE	MAE	RMSE	AE	R2
D	batt_v	6,60	1,98	2,57	-12188,42	0,62
D12	batt_v	3,45	1,26	1,86	447,32	-0,36
D24	batt_v	0,99	0,73	1,00	795,33	0,88
D23	batt_v	0,11	0,27	0,34	-44,76	0,95
D34	batt_v	1,36	0,89	1,17	155,09	0,72
D46	batt_v	2,30	1,09	1,52	1210,50	0,79
D45	batt_v	0,43	0,55	0,65	1909,84	0,88
D56	batt_v	5,66	2,07	2,38	10,09	0,04
E	batt_v	4,53	1,85	2,13	257,17	0,30
E12	batt_v	1,70	0,71	1,31	-13,28	0,51
E23	batt_v	1,70	0,71	1,31	-13,28	0,51
F1	batt_v	0,25	0,32	0,50	-9,63	0,11
F2	batt_v	0,60	0,61	0,77	0,42	0,86
F3	batt_v	0,51	0,54	0,71	15,65	0,84

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Tabela 5 – Parâmetros da bateria

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$Q_{Batt}$	172800	C	Capacidade nominal de carga
$\eta_{Batt}$	1	-	Eficiência coulômbica
$N_{Batt,S}$	3	-	Quantidade de baterias em série
$R_{Batt,0}$	0.004833021318920369	$\Omega$	Resistência série
$R_{Batt,1}$	0.005009783862137879	$\Omega$	Resistência do ramo RC#1
$C_{Batt,1}$	763.5350737712305	F	Capacitância do ramo RC#1
$R_{Batt,2}$	0.09739310817004393	$\Omega$	Resistência do ramo RC#2
$C_{Batt,2}$	212113.61911925237	F	Capacitância do ramo RC#2
$a_0$	10.7864583333	V	Coeficiente constante de $v_{Batt,oc}(z)$
$a_1$	3.5863893517	V	Coeficiente linear de $v_{Batt,oc}(z)$
$a_2$	-3.0753011401	V	Coeficiente quadrático de $v_{Batt,oc}(z)$
$a_3$	1.6163721814	V	Coeficiente cúbico de $v_{Batt,oc}(z)$

Fonte: Elaboração Própria (2026).

## 7.4 Parâmetros do ESC

Similarmente ao caso dos MPPTs, para otimizar os parâmetros do conversor, foram utilizados dados de ensaios realizados pela equipe para ajustar alguns dos parâmetros obtidos das folhas de dados do MOSFET e do diodo do conversor. O procedimento está documentado no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/esc/mam17\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b). A otimização utiliza como entrada parâmetros iniciais estimados (por folha de dados e condição de operação), definidos no próprio *notebook* e listados no Quadro 43. Como saída, o conjunto final adotado no modelo é exportado para <solarboat\_model/models/2020/esc/mam17\_params.json> (recarregado no próprio *notebook* para verificação) e está sintetizado na Tabela 6.

De acordo com as folhas de dados do MOSFET (Littelfuse, 2025) e do diodo (IXYS (Littelfuse), 2025), e com o conhecimento prévio do autor sobre o sistema (devido à sua atuação como projetista), os valores do Quadro 43 foram obtidos considerando uma temperatura de junção de 100 °C, tensão de 100 V e corrente de 150 A.

Quadro 43 – Parâmetros estimados pré-otimização

Parâmetro	Valor
$V_{ESC,F}$	1,87 V
$V_{ESC,ds,ov}$	1,222 222 222 222 222 3
$R_{ESC,ds,on}$	3,7 m $\Omega$
$R_{ESC,D}$	7,5 m $\Omega$
$F_{ESC,s}$	12,550 $\times 10^3$ Hz
$E_{ESC,on}$	70 $\mu$ J
$E_{ESC,off}$	110 $\mu$ J
$Q_{ESC,rr}$	190 nC

Fonte: Elaboração própria (2026).

O problema de otimização proposto pode ser definido conforme a Equação 7.4, no qual se otimiza apenas um subconjunto das variáveis devido à qualidade dos

dados disponíveis: a adição das outras variáveis resulta em uma otimização mal condicionada, ou seja, com múltiplas soluções aproximadamente equivalentes, levando à falha do processo.

$$\min_{\substack{R_{ESC,ds,on}, \\ V_{ESC,F}, \\ R_{ESC,D}}} \text{MSE}_w \left( \tilde{Y}(t), \hat{Y}(t) \right) \quad (7.4a)$$

$$\text{s.t.} \quad 10^{-4} \leq R_{ESC,ds,on} \leq 10^{-2}, \quad (7.4b)$$

$$10^{-1} \leq V_{ESC,F} \leq 5, \quad (7.4c)$$

$$10^{-3} \leq R_{ESC,D} \leq 10^{-2} \quad (7.4d)$$

onde:

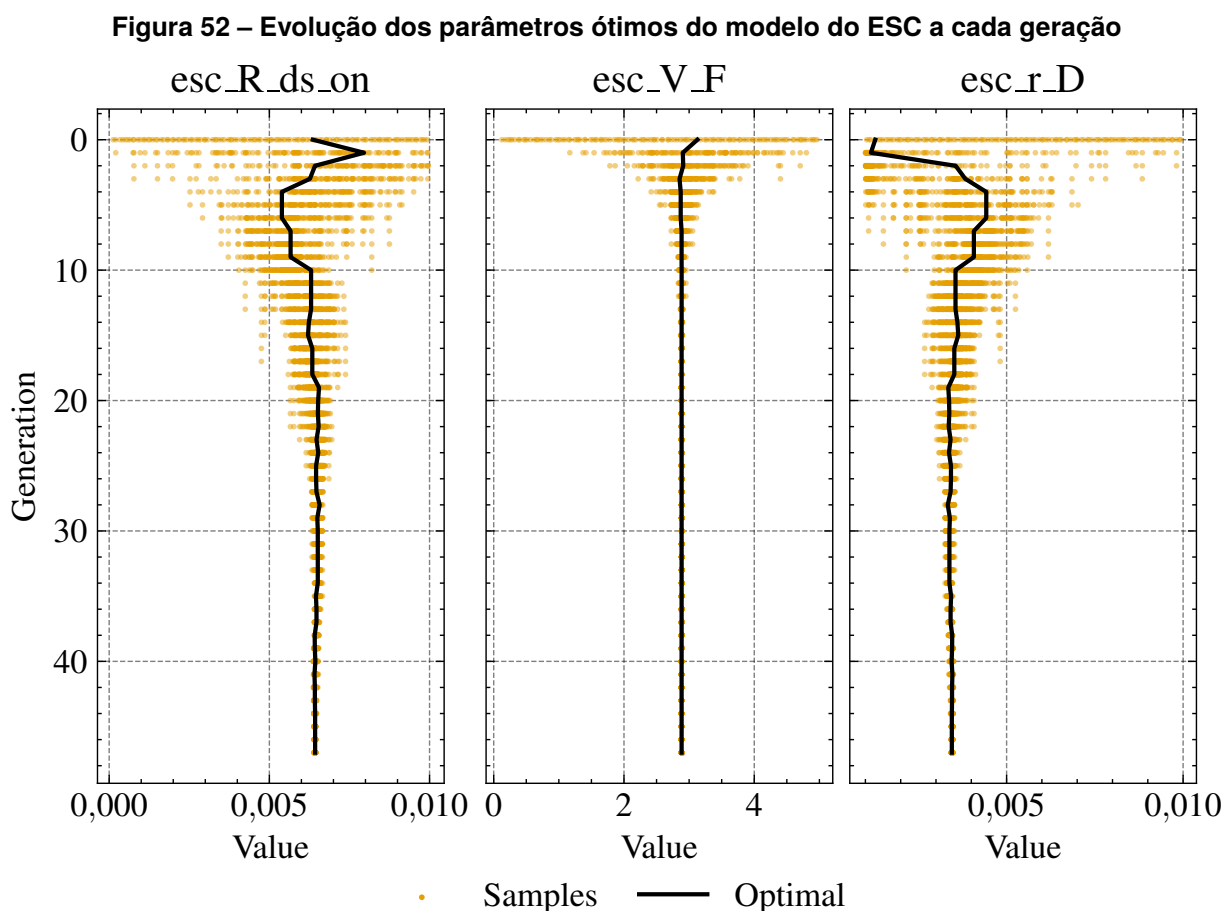
- $\text{MSE}_w(\tilde{Y}, \hat{Y}) = \frac{1}{Nn_y} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} w_j \left( \tilde{y}_j(t_k) - \hat{y}_j(t_k) \right)^2$ ;
- $N$  é o número de amostras e  $n_y$  o número de saídas;
- $\tilde{y}$  e  $\hat{y}$  são os sinais escalonados no conjunto de treino (nesta etapa, com *RobustScaler*);
- $Y = [v_{ESC,out}, i_{ESC,in}, \eta_{ESC}]$  é o vetor de sinais de treino;
- $\hat{Y} = [\hat{v}_{ESC,out}, \hat{i}_{ESC,in}, \hat{\eta}_{ESC}]$  é o vetor de sinais preditos do modelo;
- $w_j$  é o peso do sinal  $j$  na função objetivo (aqui, pesos unitários).

A Figura 52 apresenta o subconjunto escolhido convergindo para seus valores finais diante de seu espaço de busca, enquanto a Figura 53 exibe a diminuição do erro à medida que são encontrados valores melhores.

Como resultado, os resíduos para os sinais de interesse são apresentados nas Figuras 56 e 54, nas quais pode-se observar uma boa concordância, sendo esta inferior na Figura 55.

A partir dos parâmetros obtidos, construiu-se o mapa de eficiência apresentado na Figura 57, no qual é possível visualizar as curvas de isoeficiência para diversas condições de operação quando submetido a uma tensão de entrada de 36 V. Ressalta-se que esta é uma curva teórica, obtida a partir do modelo de perdas escolhido.

Os parâmetros do ESC são apresentados na Tabela 6.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

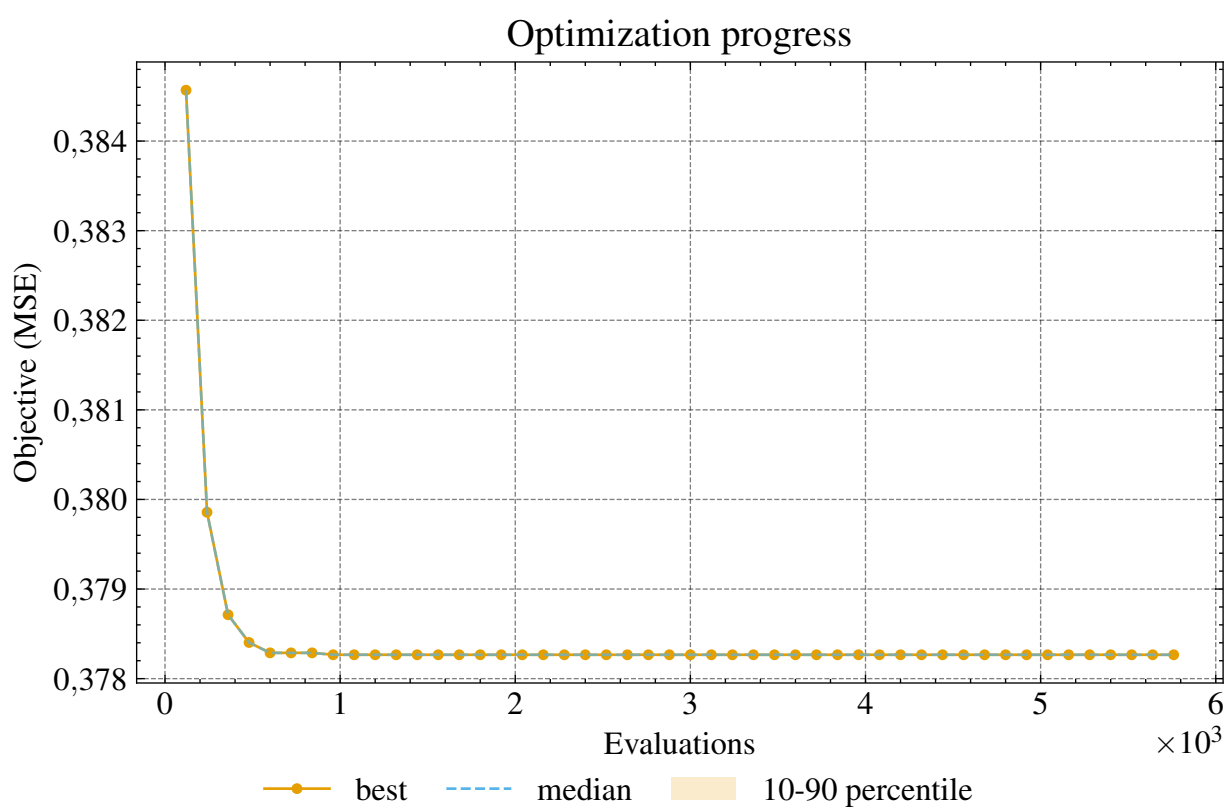
Legenda: Evolução dos parâmetros ótimos do modelo do ESC ( $R_{ds,on}$ ,  $V_F$  e  $r_D$ ) ao longo das gerações. As amostras e o valor ótimo indicam convergência e estabilidade do processo.

**Tabela 6 – Parâmetros do ESC**

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$V_{ESC,ds,ov}$	1,222 222 222 222 222 3	-	Fator de sobretensão
$F_{ESC,s}$	$12,550 \times 10^3$	Hz	Frequência de comutação
$R_{ESC,ds,on}$	$6,428 129 677 311 848 \times 10^{-3}$	$\Omega$	Resistência $R_{DS(on)}$
$V_{ESC,F}$	2,884 681 806 089 211	V	Queda direta do diodo
$R_{ESC,D}$	$3,448 696 395 697 723 \times 10^{-3}$	$\Omega$	Resistência série do diodo
$E_{ESC,on}$	70	$\mu J$	Energia por comutação (ligar)
$E_{ESC,off}$	110	$\mu J$	Energia por comutação (desligar)
$Q_{ESC,rr}$	190	nC	Carga de recuperação reversa

Fonte: Elaboração Própria (2026).

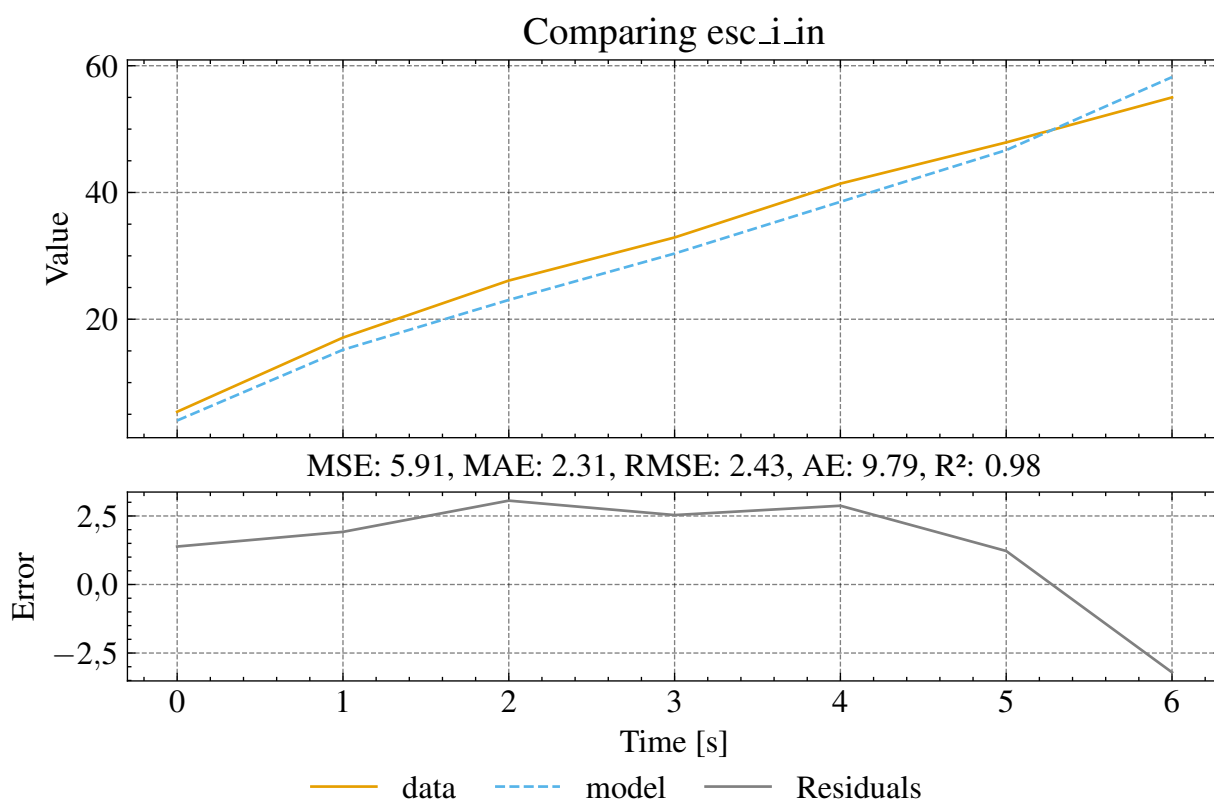
Figura 53 – Evolução do erro de otimização do modelo do ESC



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Evolução do erro objetivo ( $MSE_w$ , em sinais escalonados) na calibração do ESC, com curvas de melhor, mediana e percentis 10–90%.

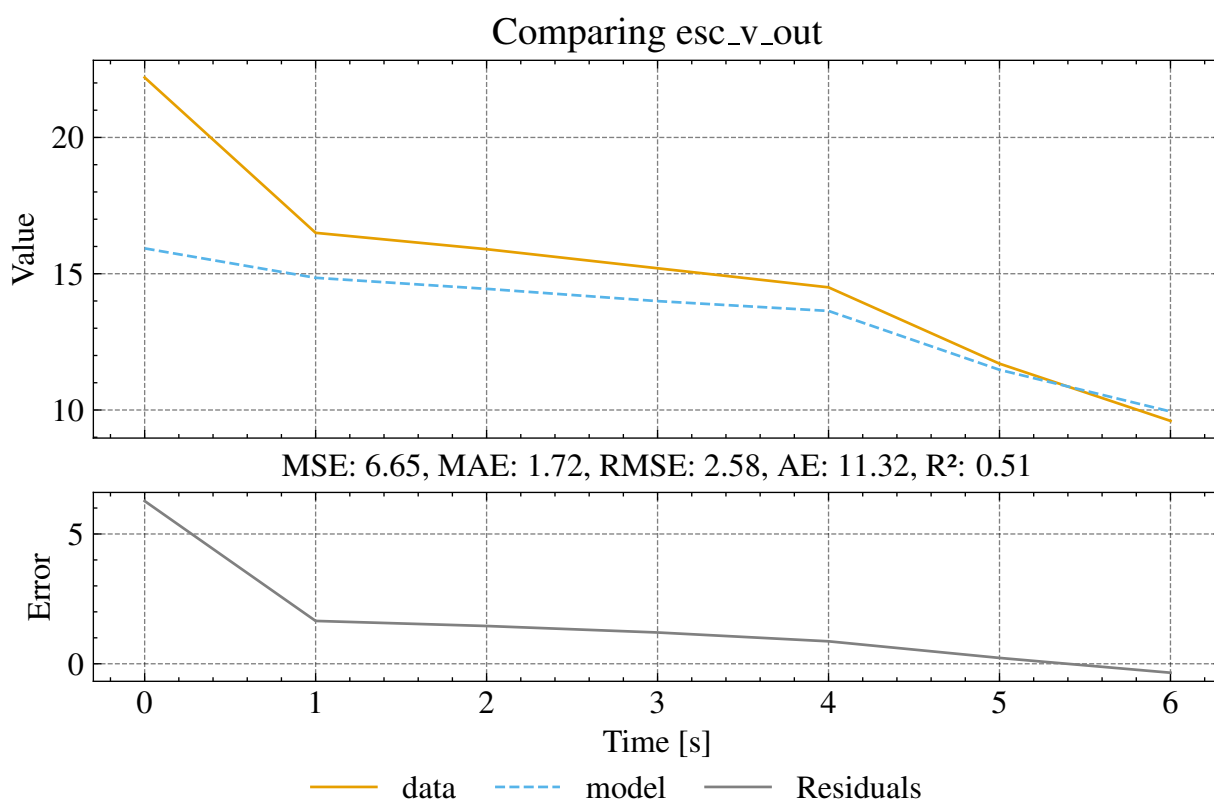
Figura 54 – Comparação do sinal  $i_{ESC,in}$  do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação da corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e predita pelo modelo otimizado. O painel de resíduos e as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) quantificam a aderência no conjunto de treino.

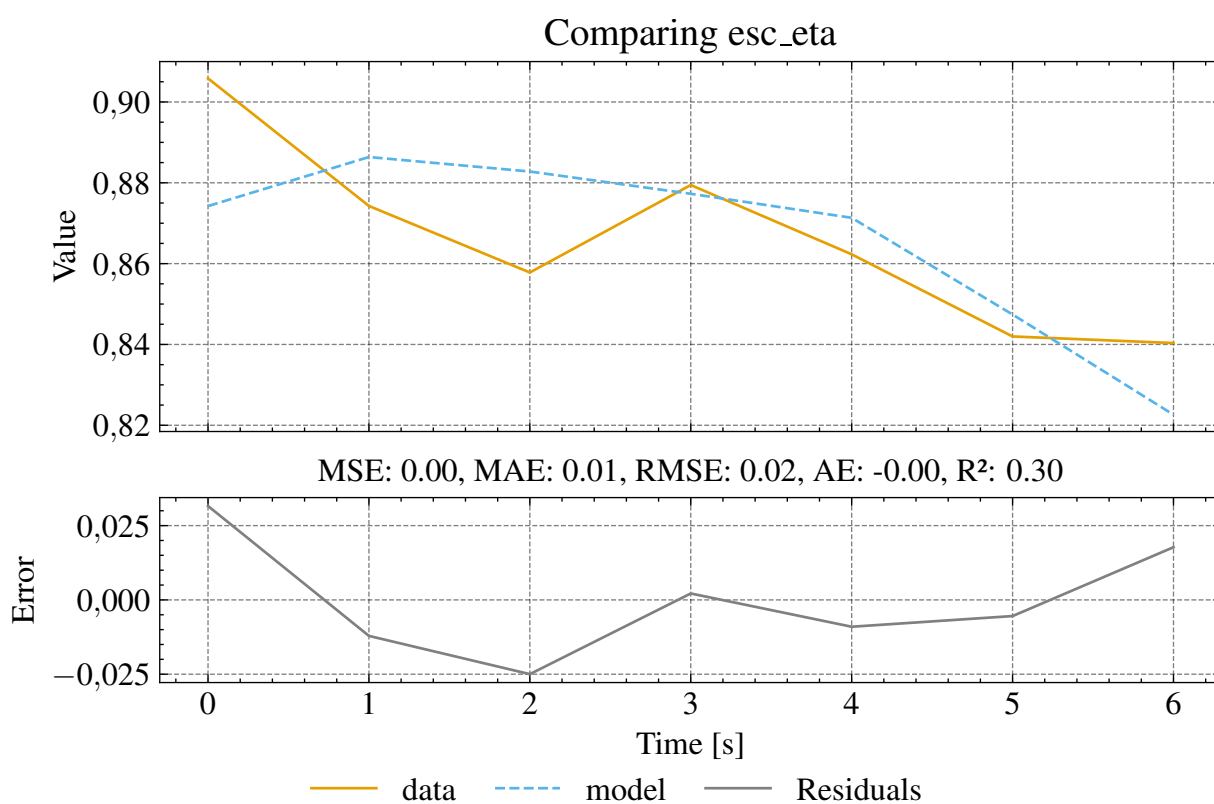
Figura 55 – Comparação do sinal esc\_v\_out do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

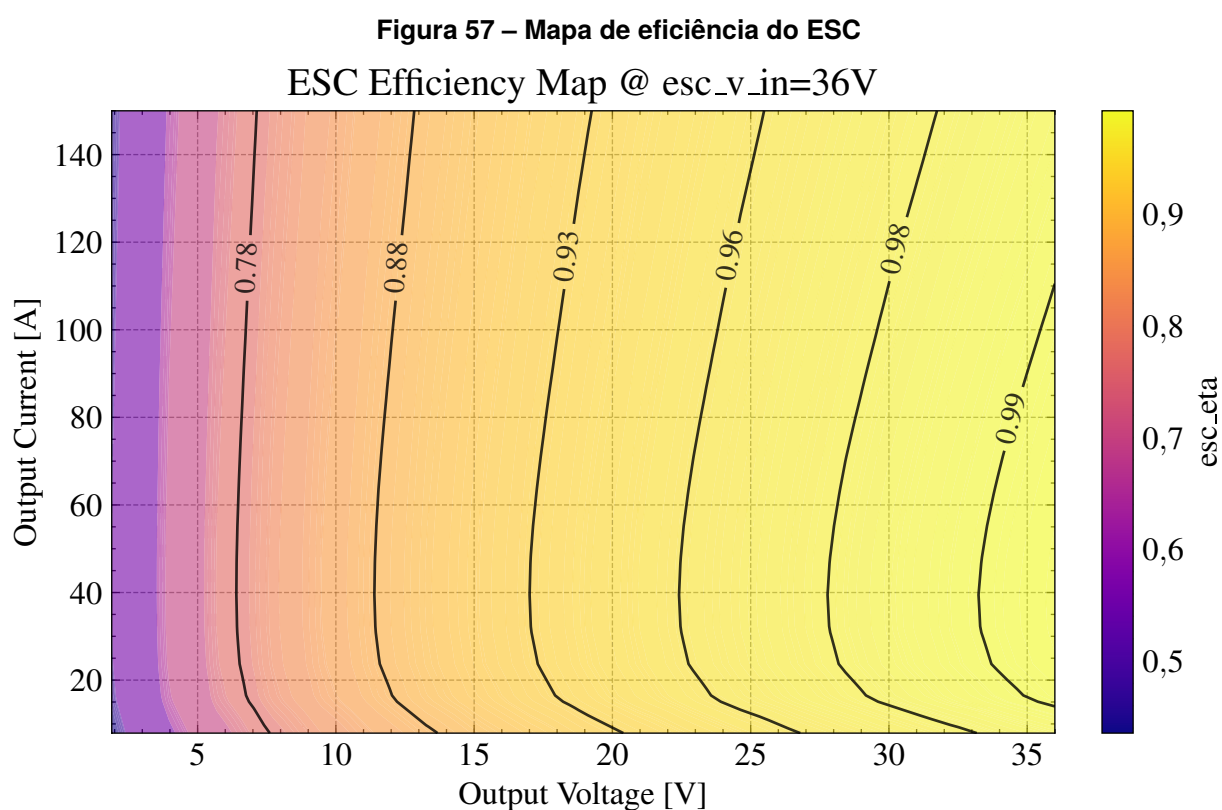
Legenda: Comparação da tensão de saída do ESC ( $v_{ESC,out}$ ) medida e predita pelo modelo otimizado. As séries temporais, resíduos e métricas de erro permitem avaliar o ajuste no intervalo de treino.

Figura 56 – Comparação do sinal esc\_eta do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação da eficiência do ESC ( $\eta_{ESC}$ ) medida e modelada após a otimização. O gráfico apresenta séries no tempo, resíduos e métricas, evidenciando o nível de aderência alcançado.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Mapa de eficiência do ESC em função da tensão e da corrente de saída, para  $v_{ESC,in} = 36$  V. A escala de cores indica  $\eta_{ESC}$ , destacando a faixa de maior rendimento operacional.

## 7.5 Parâmetros do motor

A partir da análise de sensibilidade realizada (veja as tabelas e figuras no Apêndice E), observa-se que não há um único parâmetro dominante em todos os ensaios. No ensaio em regime permanente, com incertezas iguais de 1 %, os parâmetros apresentam influência semelhante para 36 V e 0 N m, enquanto para 36 V e 10 N m os termos  $R_{Motor,A}$  e  $K_{Motor,Q}$  passam a ter maior peso. Já no ensaio de degrau com eixo livre, o parâmetro  $K_{Motor,V}$  domina a resposta em rotação e também domina a corrente em 36 V e 0 N m; para 36 V e 10 N m, a corrente passa a ser mais influenciada por  $K_{Motor,Q}$ , enquanto a rotação segue majoritariamente influenciada por  $K_{Motor,V}$ .

Aqui, o autor adotou uma estratégia de otimização em duas etapas – primeiro, calibrou os parâmetros estáticos no ensaio do fabricante; depois, no ensaio dinâmico de rotor livre, obteve melhor resultado ao fixar parte desses valores estáticos e ajustar apenas os parâmetros dinâmicos.

A análise de sensibilidade foi executada nos *notebooks* <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_steady\_state\_sensitivity.ipynb> e <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_free\_rotor\_step\_sensitivity.ipynb> (CARDOSO, 2026b). As otimizações correspondentes estão em <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_steady\_state\_optimization.ipynb> e <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_free\_rotor\_step\_optimization.ipynb>.

A otimização em regime permanente utiliza como entrada parâmetros iniciais definidos no *notebook* e exporta, como saída, o conjunto otimizado para <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_steady\_state\_params.json> (recarregado no próprio *notebook* para verificação). Na etapa do ensaio de degrau com eixo livre, os parâmetros de regime permanente são carregados desse arquivo como entrada, e o conjunto final do ensaio dinâmico é exportado para <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_free\_rotor\_step\_params.json> (também recarregado no *notebook*). Os parâmetros consolidados e utilizados no modelo do motor (ou seja, os exportados/carregados nessas etapas) são os apresentados na Tabela 7.

A partir de uma exploração, o autor identificou que todos os parâmetros do motor poderiam ser otimizados juntos utilizando dados do motor em operação na embarcação, porém, o parâmetro que representa a inércia da carga ( $I_{Motor,r,load}$ ) conectada ao eixo se confunde com o parâmetro que representa a inércia do próprio motor ( $I_{Motor,r}$ ) — pois elas se somam na equação do modelo do motor, resultando em uma baixa desassociação entre o modelo do motor e o modelo do que está conectado ao seu eixo (a transmissão e sua hélice), o que significa que o modelo teria sua utilidade reduzida, pois não poderíamos utilizar o mesmo modelo do motor quando a transmissão ou sua hélice fossem alteradas.

A fim de minimizar tal efeito, podemos usar dados de ensaios do motor operando fora da embarcação. No caso, temos dois: (1) o fabricante fornece dados de um ensaio estático para mostrar a eficiência do motor sob variação de carga (0 a 10 m) nas condições de 24, 36, e 48 V, e (2) o autor realizou um ensaio em laboratório aplicando um degrau ao motor com o eixo livre, monitorando a tensão, e a corrente, embora não tenha a rotação.

Podemos, então, utilizando estes dados, executar a seguinte estratégia de otimização: primeiro otimizam-se os parâmetros estáticos do motor  $R_{Motor,A}$ ,  $B_{Motor,M}$ ,  $K_{Motor,Q}$  e  $K_{Motor,V}$  com base nos sinais de corrente no motor ( $i_{Motor}(t)$ ) e rotação no eixo ( $\omega_{Motor}(t)$ ), além de grandezas derivadas (como potências e eficiência), utilizando os dados do ensaio do fabricante. Na etapa do ensaio de degrau com eixo livre, os parâmetros  $B_{Motor,M}$ ,  $K_{Motor,Q}$  e  $K_{Motor,V}$  permanecem fixos com os valores encontrados no ensaio estático, e ajustam-se os parâmetros  $R_{Motor,A}$ ,  $L_{Motor,A}$  e  $I_{Motor,r}$  com base na corrente  $i_{Motor}(t)$ , considerando  $I_{Motor,r,load} = 0$  (eixo livre). Na prática, os melhores resultados foram obtidos mantendo fixos  $B_{Motor,M}$ ,  $K_{Motor,Q}$  e  $K_{Motor,V}$  (vindos da etapa estática) e ajustando  $R_{Motor,A}$ ,  $L_{Motor,A}$  e  $I_{Motor,r}$ . Em seguida, é realizada uma otimização da propulsão completa utilizando os dados da embarcação para obter os parâmetros restantes da propulsão (dentre eles,  $I_{Motor,r,load}$ ).

O problema é descrito pelo conjunto de Equações 7.5, utilizando uma ampla região de busca.

$$\min_{\substack{B_{Motor,M}, \\ K_{Motor,V}, \\ K_{Motor,Q}, \\ R_{Motor,A}}} \text{MSE}_w \left( \tilde{Y}(t), \hat{Y}(t) \right) \quad (7.5a)$$

$$\text{s.t.} \quad \hat{Y}(t) = f \left( T, U, X_0, \begin{matrix} B_{Motor,M} \\ K_{Motor,V} \\ K_{Motor,Q} \\ R_{Motor,A} \end{matrix} \right), \quad (7.5b)$$

$$1 \times 10^{-6} \leq B_{Motor,M} \leq 1, \quad (7.5c)$$

$$1 \times 10^{-6} \leq K_{Motor,V} \leq 1, \quad (7.5d)$$

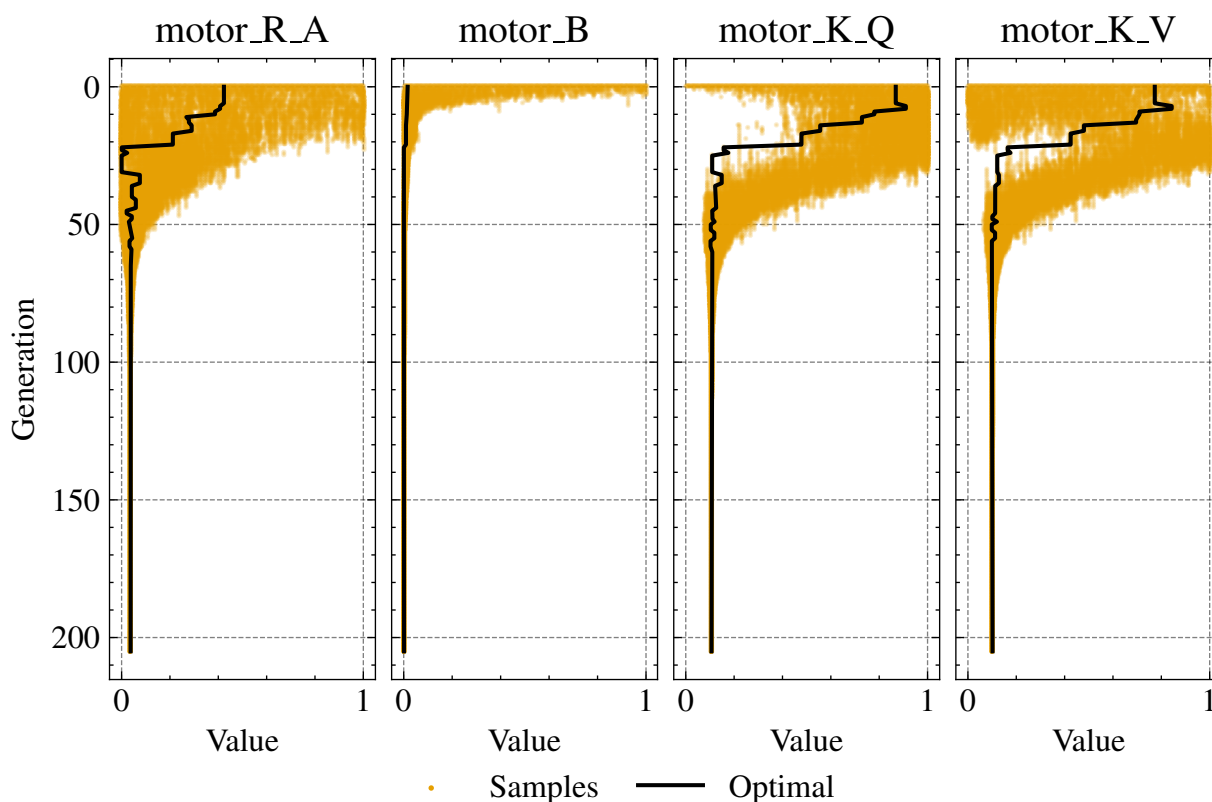
$$1 \times 10^{-6} \leq K_{Motor,Q} \leq 1, \quad (7.5e)$$

$$1 \times 10^{-6} \leq R_{Motor,A} \leq 1 \quad (7.5f)$$

Nesta etapa em regime permanente, a função objetivo segue  $\text{MSE}_w(\tilde{Y}, \hat{Y})$  com sinais escalonados no conjunto de treino (*RobustScaler*) e pesos unitários.

Do segundo conjunto de dados mencionado, temos um teste de bancada no qual o autor manteve o eixo do motor livre e aplicou um degrau de tensão de aproximadamente 12 V aos seus terminais, medindo tanto o sinal de tensão, quanto o de corrente. Embora não possua o sinal de velocidade angular do motor  $\omega_{Motor}(t)$ , o dado se mostrou suficiente para realizar a otimização dos três parâmetros dinâmicos

Figura 58 – Evolução dos parâmetros ótimos do motor a cada geração



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Evolução dos parâmetros ótimos do motor (por exemplo,  $R_A$ ,  $B$ ,  $K_Q$  e  $K_V$ ) ao longo das gerações da otimização em regime permanente. Cada painel mostra amostras e valor ótimo.

livres ( $R_{Motor,A}$ ,  $L_{Motor,A}$  e  $I_{Motor,r}$ ), mantendo fixos os parâmetros obtidos na etapa estática, com pequenas ressalvas discutidas a seguir.

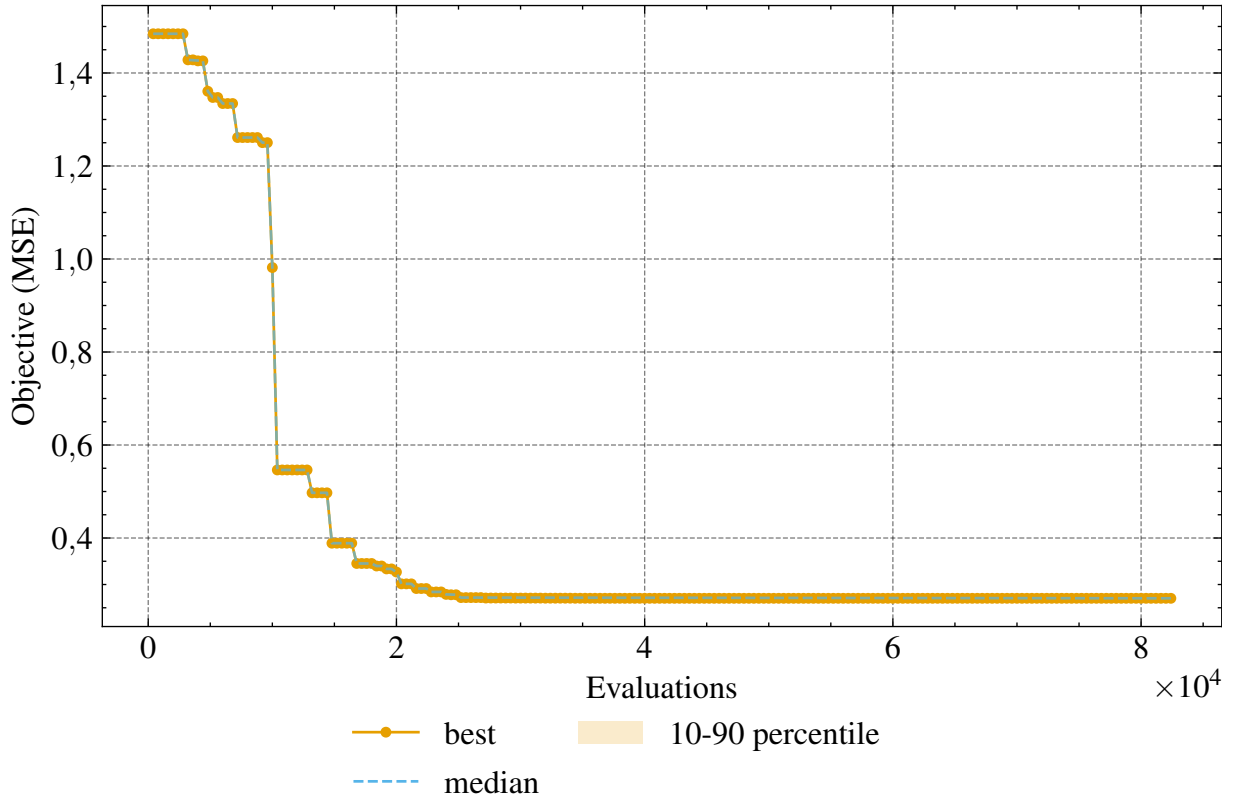
Como o dado foi amostrado a 1 MHz, fez-se necessário realizar um *down-sampling* para 1 kHz, para reduzir a quantidade de pontos e aumentar a qualidade dos sinais<sup>1</sup>, como mostrado na Figura 62.

Dada uma função do modelo ( $f(T, U, X_0, p)$ ), com dados de entrada ( $U$ ), condições iniciais ( $X_0$ ), e parâmetros do modelo ( $p$ ), queremos minimizar o erro quadrático médio entre as previsões do modelo e os dados reais, sujeitos aos limites dos parâmetros. O problema de otimização pode ser definido como no conjunto de Equações 7.6.

$$\min_{\substack{R_{Motor,A}, \\ L_{Motor,A}, \\ I_{Motor,r}}} \text{MSE}_w \left( \tilde{Y}(t), \hat{Y}(t) \right) \tag{7.6a}$$

<sup>1</sup> Como a dinâmica de interesse está bem abaixo de 1 kHz, os pontos extras a 1 MHz carregam sobretudo ruído e jitter; ao aplicar filtragem passa-baixas e decimar, reduz-se a variância do ruído, melhora-se a relação sinal-ruído e evita-se aliasing no sinal reamostrado.

Figura 59 – Evolução do erro de otimização do motor  
Optimization progress



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Evolução do erro objetivo ( $MSE_w$ , em sinais escalonados) durante a calibração do motor em regime permanente, com curvas de melhor, mediana e percentis 10–90%.

$$\text{s.t.} \quad \hat{Y}(t) = f \left( T, U, X_0, \begin{matrix} R_{Motor,A}, \\ L_{Motor,A}, \\ I_{Motor,r} \end{matrix} \right), \quad (7.6b)$$

$$(1 - k)R_{Motor,A}^{(0)} \leq R_{Motor,A} \leq (1 + k)R_{Motor,A}^{(0)}, \quad (7.6c)$$

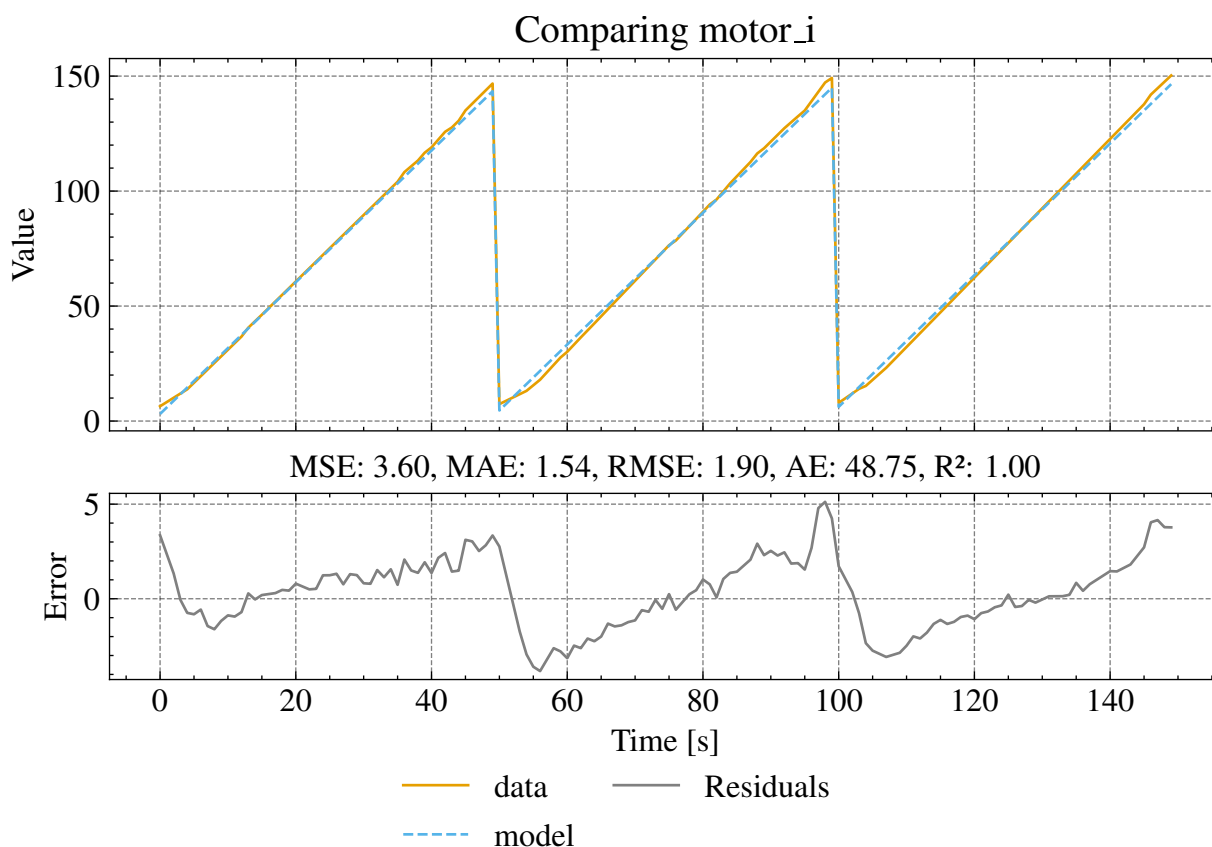
$$1 \times 10^{-6} \leq L_{Motor,A} \leq 1 \times 10^{-3}, \quad (7.6d)$$

$$1 \times 10^{-3} \leq I_{Motor,r} \leq 100 \times 10^{-3} \quad (7.6e)$$

onde:

- $MSE_w(\tilde{Y}, \hat{Y}) = \frac{1}{Nn_y} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} w_j \left( \tilde{y}_j(t_k) - \hat{y}_j(t_k) \right)^2$ ;
- $N$  é o número de amostras e  $n_y$  o número de saídas;
- $\tilde{y}$  e  $\hat{y}$  são os sinais escalonados no conjunto de treino (nesta etapa, com *RobustScaler*);
- $w_j$  é o peso do sinal  $j$  na função objetivo (aqui, pesos unitários);
- $Y = [i_{Motor}]$  é o vetor de sinais de treino;
- $\hat{Y} = [\hat{i}_{Motor}]$  é o vetor de sinais preditos do modelo;

Figura 60 – Comparação do sinal motor\_i do modelo otimizado com o dado



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente do motor ( $i_{Motor}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado. O gráfico exibe as séries temporais e o painel de resíduos, com métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) para quantificar a aderência.

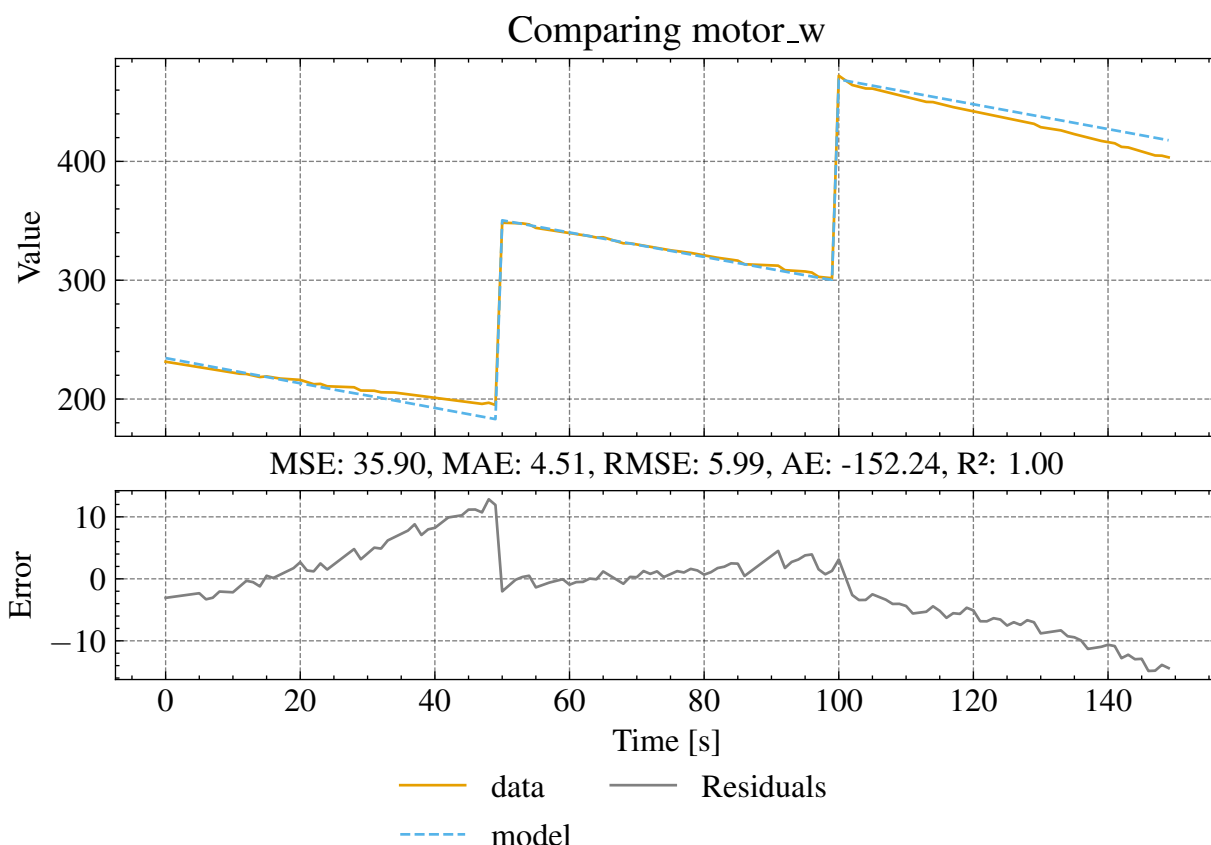
- $T$  é o vetor de tempo;
- $U = [v_{Motor}, q_{Motor,load}]$  é o vetor de sinais de entradas;
- $X_0 = [0, 0]$  é o vetor de condições iniciais dos estados;
- $k = 0.5$  define a variação relativa de busca em torno do valor inicial de  $R_{Motor,A}$ ;
- $R_{Motor,A}^{(0)}$  é o valor de  $R_{Motor,A}$  carregado da etapa de regime permanente;
- $B_{Motor,M}$ ,  $K_{Motor,Q}$  e  $K_{Motor,V}$  permanecem fixos nesta etapa.

Utilizando o método DE (*Differential Evolution*, do inglês, Evolução Diferencial) para otimizar o problema descrito acima, encontramos os parâmetros listados em Tabela 7.

A Figura 63 mostra a exploração do espaço e o caminho que cada parâmetro tomou durante o processo de otimização, até chegar ao seu ponto final.

A convergência da otimização pode ser verificada pelo erro sendo minimizado na Figura 64.

Figura 61 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com o dado



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado. O resíduo e as métricas indicam o ajuste obtido para o conjunto de dados utilizado na calibração.

Como uma forma de avaliação visual, podemos também, comparar os sinais preditos pelo modelo com os sinais originais, como mostrado na Figura 65.

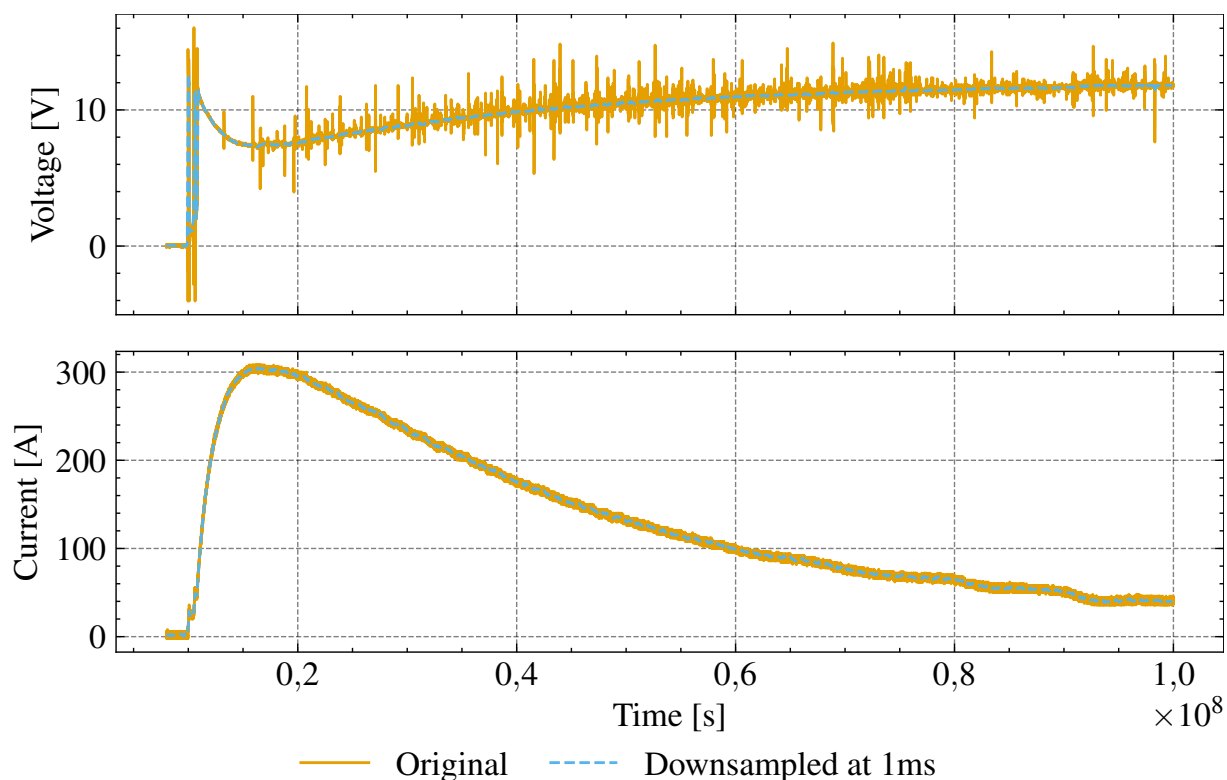
Tabela 7 – Parâmetros do motor

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$B_{Motor,M}$	0.001401819826389131	Nm/rad s <sup>-1</sup>	Coefficiente de fricção viscosa
$I_{Motor,r}$	0.011815137847671575	kgm <sup>2</sup>	Inércia do rotor
$I_{Motor,r,load}$	0	kgm <sup>2</sup>	Inércia da carga refletida no eixo
$K_{Motor,Q}$	0.10638460838741098	Nm/A	Constante de torque do motor
$K_{Motor,V}$	0.10178006369696158	Vs/rad	Constante de FEM do motor
$L_{Motor,A}$	6.24949639106588e-05	H	Indutância interna do motor
$R_{Motor,A}$	0.0195442230227981	$\Omega$	Resistência interna do motor

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Como pode ser observado, no ensaio com eixo livre os parâmetros  $B_{Motor,M}$ ,  $K_{Motor,Q}$  e  $K_{Motor,V}$  são herdados da etapa em regime permanente. Nesta etapa dinâmica, a otimização ajusta  $R_{Motor,A}$ ,  $L_{Motor,A}$  e  $I_{Motor,r}$ , mantendo  $I_{Motor,r,load} = 0$  para representar a condição de rotor livre.

Figura 62 – Teste de degrau de tensão no motor

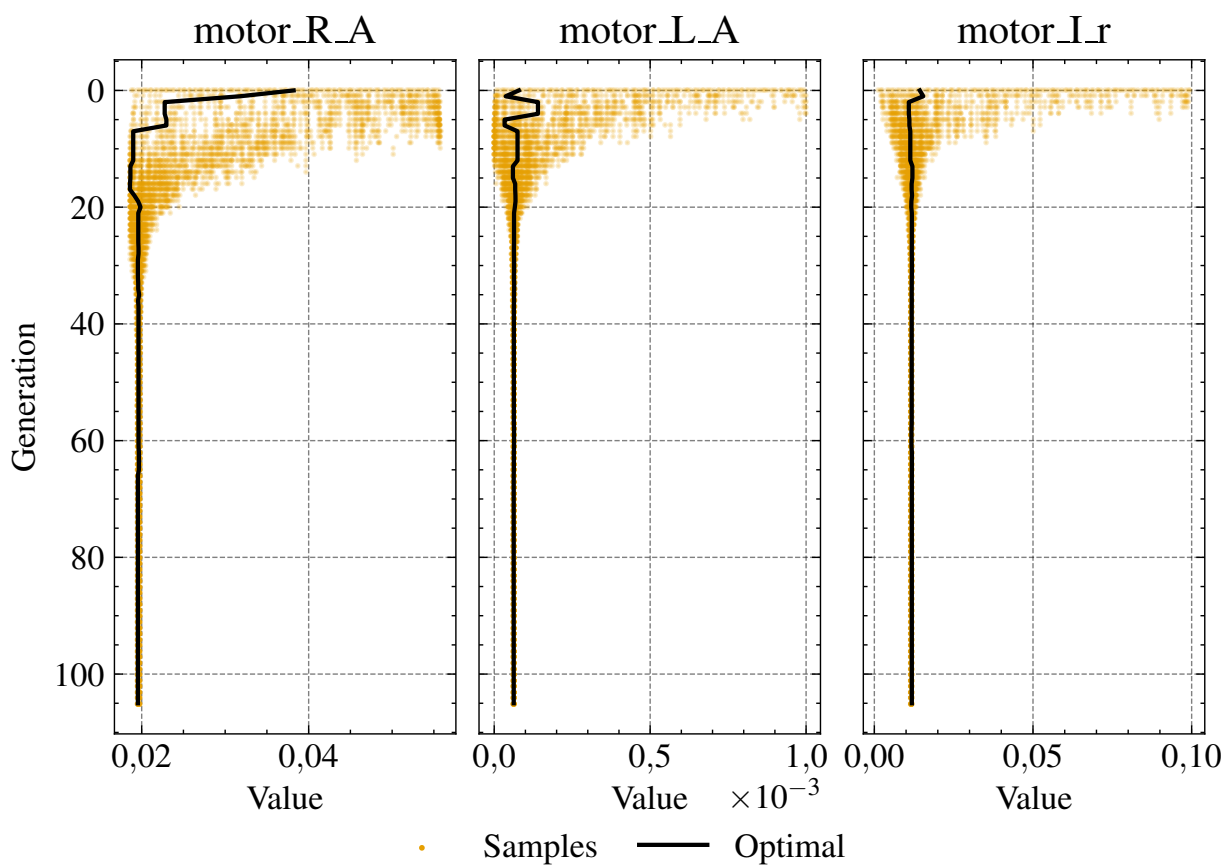


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Resposta do motor a um degrau de tensão: a figura apresenta a tensão aplicada (V) e a corrente resultante (A) em função do tempo (s). São mostradas as séries original e reamostrada, utilizadas na identificação dinâmica do motor.

Um mapa de eficiência pode ser construído com simulações do modelo construído, mostrado na Figura 66, no qual podemos ver as isoeficientes para uma diversidade de condições de operação. Seus formatos de retas expõem a limitação do modelo do motor escolhido: ele representa apenas perdas lineares, ignorando saturações, e outros fenômenos que caracterizariam um relevo de “montanha” no mapa, representado pelas linhas isoeficientes em formato circular.

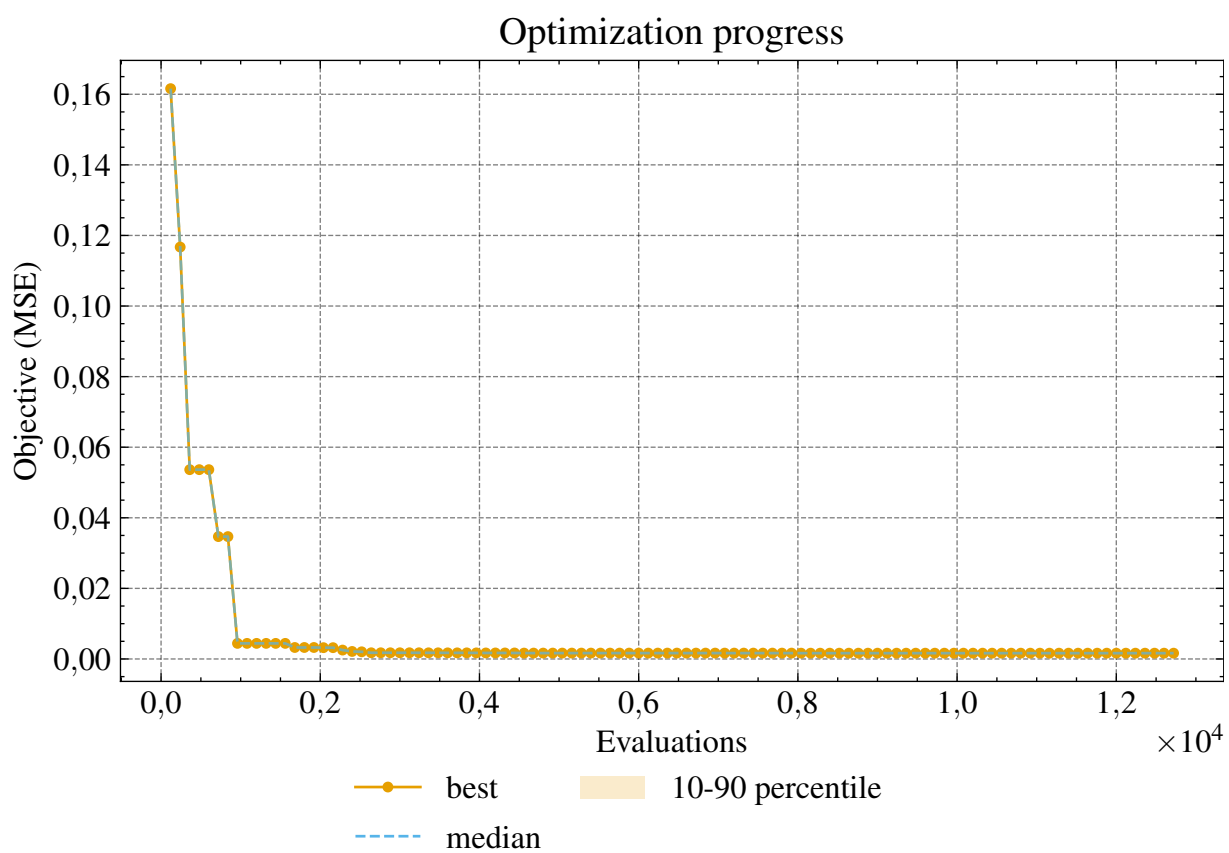
Figura 63 – Evolução dos parâmetros ótimos do motor a cada geração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Evolução dos parâmetros dinâmicos do motor ( $R_A$ ,  $L_A$  e  $I_r$ ) ao longo das gerações da otimização do ensaio de rotor livre. Os painéis apresentam amostras e valor ótimo.

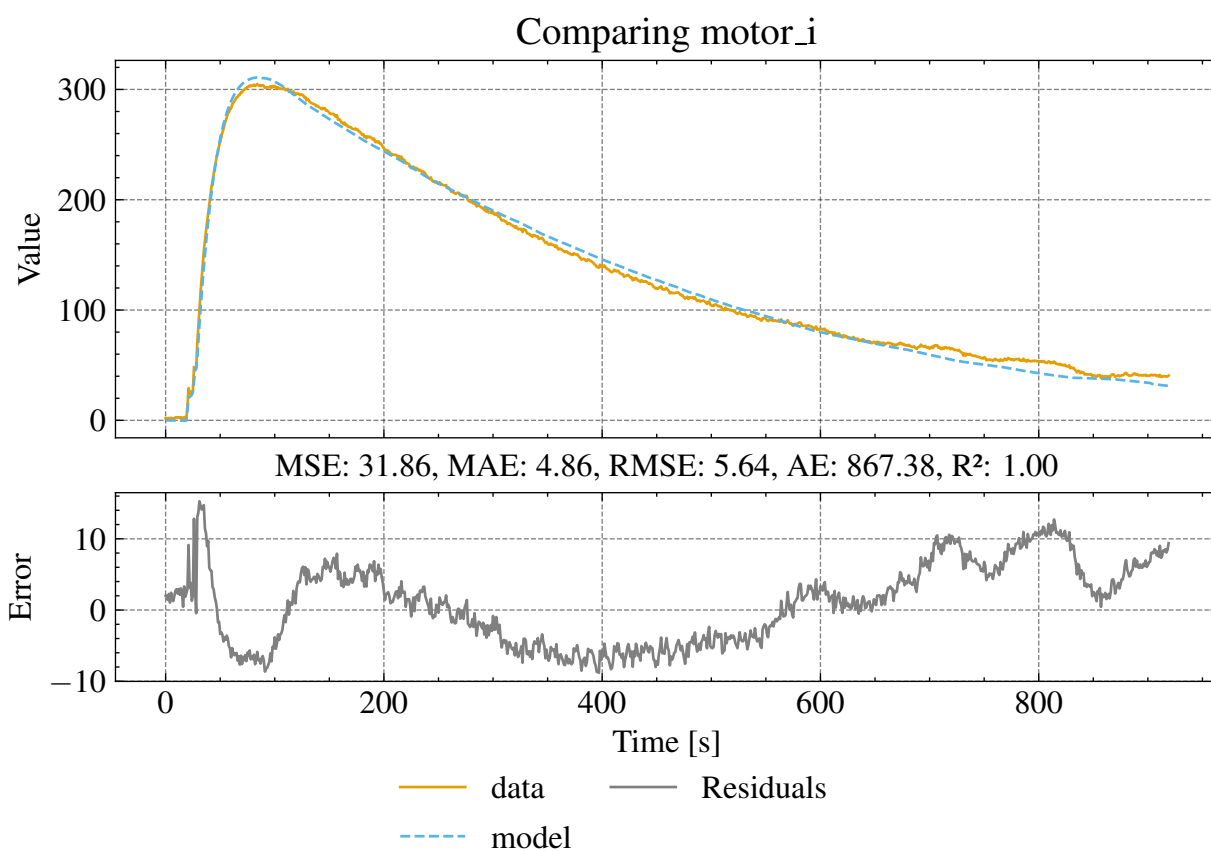
Figura 64 – Evolução do erro de otimização do motor



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Evolução do erro objetivo ( $MSE_w$ , em sinais escalonados) na otimização do motor em rotor livre, com curvas de melhor, mediana e percentis 10–90%.

Figura 65 – Comparação do sinal motor\_i do modelo otimizado com o dado

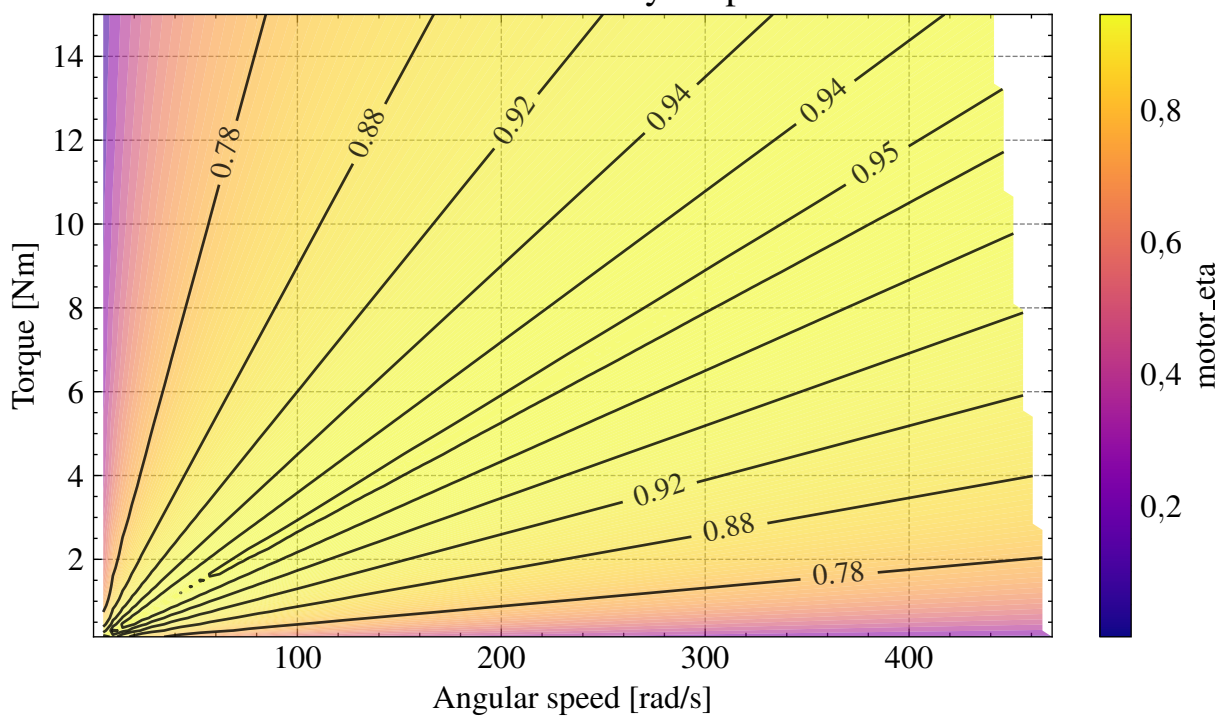


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação da corrente do motor ( $i_{Motor}$ ) medida e prevista no ensaio de rotor livre. O gráfico mostra séries no tempo, resíduos e métricas de erro, confirmando a aderência do modelo calibrado.

Figura 66 – Mapa de eficiência do Motor

Motor Efficiency Map



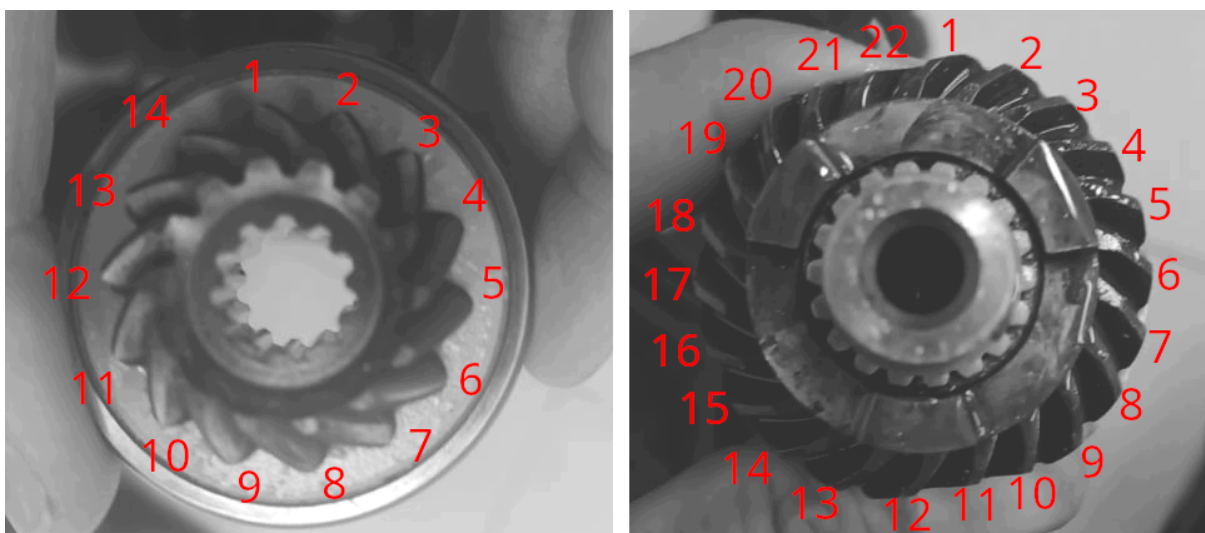
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Mapa de eficiência do motor em função da velocidade angular (rad/s) e do torque (N·m). A escala de cores corresponde ao rendimento  $\eta_{Motor}$ .

## 7.6 Parâmetros da transmissão

Para a relação de redução da transmissão  $k_{Trans}$ , podemos contar o número de dentes das engrenagens da entrada e da saída, como mostrado na Figura 67, resultando em uma relação de redução de 14:22.

Figura 67 – Contagem de dentes das engrenagens da transmissão



Fonte: Fotos fornecidas pela equipe, editada pelo autor (2026).

Legenda: Registro fotográfico da contagem de dentes das engrenagens da transmissão (pinhão e coroa) usada para definir a relação de redução.

Para a eficiência da transmissão  $\eta_{Trans}$ , podemos considerar valores de referência típicos da bibliografia. Birk (2019) e Molland, Turnock e Hudson (2017) concordam num valor típico de 95% para transmissões com engrenagens. Mesmo considerando que a condição da transmissão não era ótima, o autor escolheu o valor arbitrário de 95% de eficiência. Este valor também pode ser otimizado, porém, o autor encontrou um condicionamento baixo durante experimentos de otimização, o que significa que o parâmetro tem alta correlação com outros parâmetros que estavam sendo otimizados em conjunto, como  $k_{Prop,Q}$  e  $J_{Motor,Load}$ . O ideal para definir tal parâmetro seria um ensaio medindo a potência média da saída com a potência média da entrada da transmissão, mas até o momento, a equipe não possui meios para medir torque em eixo.

## 7.7 Parâmetros da hélice e casco

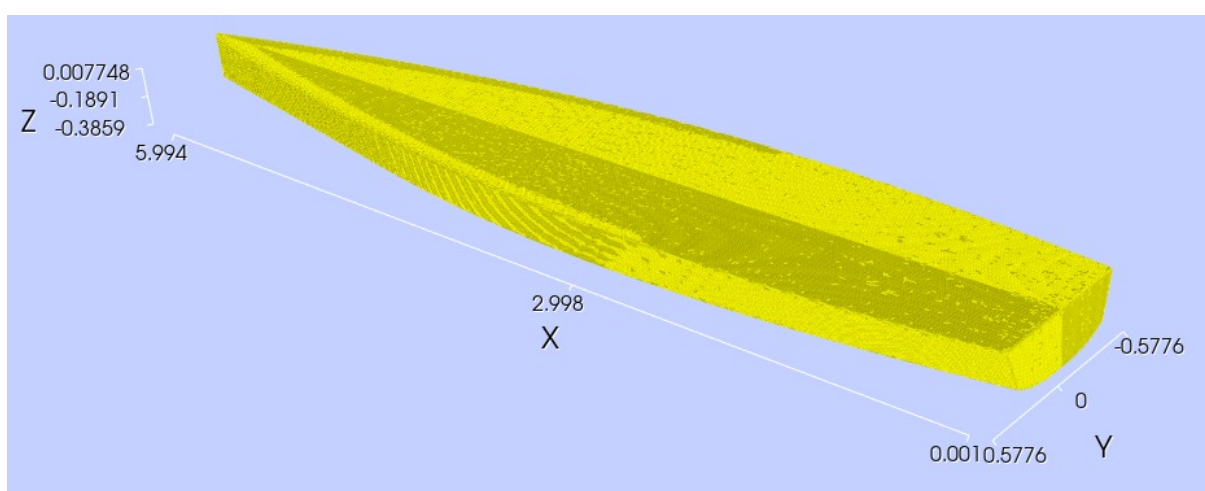
Esta seção apresenta, de forma resumida, a obtenção dos parâmetros referentes ao conjunto hélice e casco, utilizando o desenho computacional tridimensional da embarcação, e um conjunto de equações físicas, e empíricas, que requerem um ponto de operação da embarcação conhecido. Para tal, optou-se por utilizar a condição de

velocidade máxima, que ocorre durante a prova de velocidade, na qual a embarcação alcança seus  $18 \text{ km h}^{-1}$ .

### 7.7.1 Geometria do Casco

A partir do projeto CAD tridimensional da embarcação, o autor utilizou o *software* FreeCAD para transformá-lo em uma geometria fechada e exportá-lo no formato STL, e em seguida, utilizou o *software* Blender para reduzir a complexidade (e, portanto, o recurso necessário para processá-lo) utilizando a ferramenta de decimação. Uma visualização do casco decimado pode ser observada na Figura 68.

**Figura 68 – Renderização do casco em formato STL**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Renderização do casco a partir do modelo STL utilizado nas análises geométricas e hidrodinâmicas. A vista apresenta as dimensões gerais e a forma do casco.

Com base no arquivo STL decimado, a biblioteca MeshMagick ((RONGÈRE, 2021)) foi utilizada para realizar simulações hidrostáticas variando a massa e o centro de gravidade (COG) da embarcação, construindo um *dataset* hidrostático do casco da embarcação de dimensão 100x100, cobrindo uma massa entre 100 e 400 kg com o centro de gravidade entre 1 e 4 metros da popa. Para cada uma das combinações de peso e centro de gravidade, guardou-se, além da massa, e COG, os ângulos nas três coordenadas XYZ, centro de empuxo (COB), a área molhada, o comprimento da linha d'água (LWL), a boca na linha d'água (BWL), e a área do plano de flutuação (AWP).

Algumas outras simulações foram realizadas para calcular e verificar a área molhada e a área total da embarcação (aproximadamente  $8,24 \text{ m}^2$ ).

Para que não seja necessário resolver a hidrostática para cada ponto de interesse, foi criado um modelo caixa-preta/substituto (*surrogate*) como um interpolador linear do *dataset*, retornando uma estimativa das colunas para qualquer valor dentro do intervalo de COG e massa do *dataset*.

A informação de COG e massa provém de um procedimento realizado pela equipe, no qual a embarcação é completamente desmontada, todos os componentes são pesados individualmente (inclusive o casco), e remontados. Após a remontagem, a embarcação é novamente pesada. Tais dados são inseridos em uma planilha que calcula COG e a massa, com a adição da massa e posição do piloto. Um resumo da planilha da situação da embarcação na competição de 2019/2020 pode ser visto na Tabela 8. Nesta planilha, a posição XYZ é dada em relação ao centro geométrico da embarcação, portanto,  $-1.01$  referenciado ao centro longitudinal equivale a  $(6/2) - 1.01 = 1,99$  metros relativo à popa.

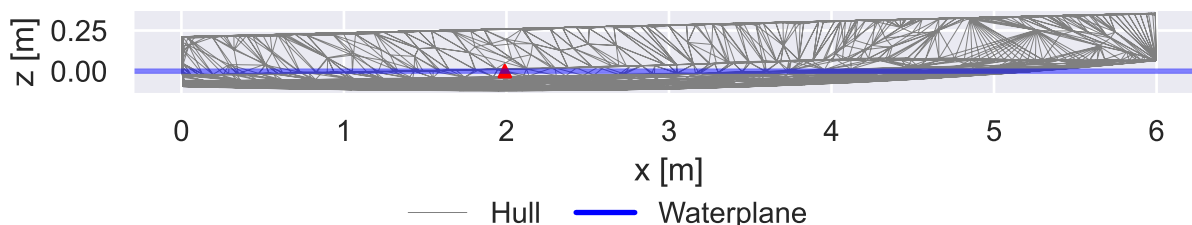
Tabela 8 – Distribuição de massas na embarcação

Item	Qty	Massa [kg]	X [m]	Y [m]	Z [m]
Bomba de porão 1	1	0,3	-0,80	0,00	0,03
Bomba de porão 2	1	0,3	-2,60	0,00	0,10
Proteção das baterias	1	0,4	-1,82	0,00	0,40
Hélice	1	0,5	-2,80	0,00	-0,20
Remo	1	0,6	1,40	-0,20	0,10
Proteção principal	1	0,6	-2,25	0,00	0,45
Antena	1	1,0	1,80	-0,20	0,80
Extintor de incêndio	1	1,8	1,45	-0,20	0,20
Rádio	1	1,8	1,70	0,20	0,25
Painel do cockpit	1	1,9	2,00	0,00	0,45
Transmissão	1	2,0	-2,77	0,00	-0,15
Volante	1	4,5	-2,85	0,00	0,12
Cabos	1	6,0	-1,50	0,00	0,10
Eletrônicos	1	6,8	-2,25	0,00	0,15
Bateria auxiliar	2	7,4	-2,79	-0,30	0,15
Motor	1	11,4	-2,77	0,00	0,28
PV 1	1	19,0	-2,50	0,00	0,45
PV 2	1	19,0	-1,51	0,00	0,45
PV 3	1	19,0	-0,52	0,00	0,45
PV 4	1	19,0	0,47	0,00	0,45
Casco com flutuadores	1	49,0	-2,80	0,00	0,15
Bateria	3	50,1	-2,00	0,00	0,20
Piloto	1	70,0	1,50	0,00	0,30
Outros	1	1,3	0,00	0,00	0,00
<b>Massa total [kg]</b>		<b>293,7</b>			
<b>CG</b>			<b>-1,0107</b>	<b>-0,0086</b>	<b>0,2779</b>

A Figura 69 mostra o casco em equilíbrio hidrostático quando submetido a uma massa de 293,7 kg, com um COG a 1,99 meter da popa. Para outros casos, ver o Apêndice G.

O mesmo arquivo STL foi convertido para OBJ utilizando Blender e foi carregado na plataforma Prelimina (RESISTANCE..., 2020), que nos retorna alguns parâmetros, dentre eles, uma estimativa para o coeficiente de bloco  $C_B$ . O coeficiente de bloco encontrado foi de  $385 \times 10^{-3}$ . As demais estimativas podem ser encontradas no Apêndice H.

Figura 69 – Casco em equilíbrio para 293.7 [kg] em 1.99 [m]



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 293,7 kg e calado de 1,99 m. O diagrama mostra o casco em relação à linha d'água, com eixos em metros, servindo de base para o cálculo de resistência e da área molhada na condição de operação adotada.

### 7.7.2 Geometria da hélice

A hélice utilizada na embarcação possui  $Z_{Prop} = 3$  pás, e de acordo com as marcações em seu corpo, possui passo 9", e diâmetro 10,5".

A razão de área expandida  $(A_E/A_0)_{Prop}$  e uma estimativa do comprimento de corda em  $0,7R$  foram obtidas por processamento de imagem da hélice (estimado no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/propeller/blade\_area\_from\_image.ipynb> (CARDOSO, 2026b) por meio de processamento de imagem), e utilizados para calcular os polinômios da série-B (ver a seguir). Os parâmetros geométricos extraídos e utilizados no modelo foram consolidados em <solarboat\_model/models/2020/propeller/propeller\_blade\_geometry.json>.

### 7.7.3 Fração de esteira e dedução de empuxo

Para estimar a fração de esteira do casco  $W_{Hull}$ , foi utilizada a regressão de Taylor apresentada por Molland, Turnock e Hudson (2017) em função do coeficiente de bloco  $C_B$ :

$$W_{Hull} = 0,5 C_B - 0,05. \quad (7.7)$$

Com  $W_{Hull}$ , a velocidade efetiva de avanço na hélice é obtida pela relação de acoplamento entre casco e hélice apresentada na Equação 6.21.

O coeficiente de dedução de empuxo  $T_{Hull,ded}$  foi obtido pela relação Molland, Turnock e Hudson (2017):

$$T_{Hull,ded} = k_R W_{Hull}, \quad (7.8)$$

na qual  $k_R$  depende do leme (variando tipicamente entre 0,5 e 0,7) Molland, Turnock e Hudson (2017). No modelo, adotou-se  $k_R = 0,6$  como um valor intermediário.

A eficiência de casco  $\eta_H$  foi calculada pela definição Molland, Turnock e Hudson (2017):

$$\eta_H = \frac{1 - T_{Hull,ded}}{1 - W_{Hull}}. \quad (7.9)$$

#### 7.7.4 Coeficientes em água livre (série-B de Wageningen)

Os coeficientes adimensionais de empuxo e torque em água livre,  $k_{Prop,t,ow}(t)$  e  $k_{Prop,q,ow}(t)$ , foram obtidos a partir das polinomiais de regressão da série-B de Wageningen Oosterveld e Oossanen (1975).

As definições da razão de avanço e das relações em água livre (empuxo, torque e eficiência) seguem o formalismo apresentado na modelagem matemática da hélice e do acoplamento casco-hélice; ver Equação 6.26, Equação 6.7, Equação 6.8, e Equação 6.4.

A série-B de Wageningen inclui uma correção para efeitos de Reynolds (Oosterveld e Oossanen (1975), Tab. 5–6). Para tal, foi calculado um número de Reynolds na seção radial próxima a  $0,7R$  da hélice, empregando a velocidade relativa do escoamento na seção e o comprimento de corda  $c_{0,7}$  estimado por processamento geométrico.

Em particular, a velocidade angular da hélice  $\omega_{Prop}$  (em  $\text{rad s}^{-1}$ ) é obtida a partir da rotação  $n_{Prop}$  (em rotação por segundo) conforme a relação definida na Equação 6.1, e adotou-se:

$$V_{rel,0,7} = \sqrt{u_{Prop}^2 + \left( \omega_{Prop} 0,7 \frac{D_{Prop}}{2} \right)^2}, \quad (7.10)$$

$$Re_{0,7} = \frac{\rho_{water} V_{rel,0,7} c_{0,7}}{\mu_{water}}. \quad (7.11)$$

A Tabela 9 sintetiza os parâmetros relevantes para o modelo propulsivo.

Tabela 9 – Parâmetros da hélice e do casco utilizados no modelo de propulsão

Parâmetro	Valor	Descrição
$W_{Hull}$	$151,443\ 039\ 723\ 073\ 6 \times 10^{-3}$	Fração de esteira (estimativa inicial)
$T_{Hull,ded}$	$90,865\ 823\ 833\ 844\ 16 \times 10^{-3}$	Dedução de empuxo
$C_{Hull,T}$	$10,878\ 369\ 245\ 660\ 298 \times 10^{-3}$	Coefficiente agregado de resistência
$M_{Hull}$	293,7 kg	Massa total
$M_{Hull,a}$	0 kg	Massa adicionada
$S_{Hull,water}$	$4,050\ 226\ 176\ 680\ 205\ m^2$	Área efetiva molhada
$S_{Hull,air}$	$4,188\ 174\ 709\ 710\ 495\ m^2$	Área efetiva ao ar
$D_{Prop}$	$228,6 \times 10^{-3}\ m$	Diâmetro da hélice
$I_{Prop,r}$	$5,545\ 487\ 788\ 185\ 924\ 10^{-4}\ kgm^2$	Inércia rotacional da hélice
$\eta_{Prop,R}$	1,0	Eficiência rotacional (arbitrária)
$k_{Prop,T_0}$	$372,178\ 299\ 872\ 780\ 9 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_1}$	$-108,368\ 729\ 487\ 224\ 5 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_2}$	$-167,382\ 395\ 790\ 930\ 9 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_3}$	$28,249\ 002\ 326\ 979\ 98 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_0}$	$54,732\ 648\ 689\ 307\ 98 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_1}$	$-17,556\ 216\ 457\ 405\ 804 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_2}$	$-533,399\ 210\ 204\ 246\ 3 \times 10^{-6}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_3}$	$-10,768\ 694\ 926\ 235\ 431 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$

Fonte: Elaboração própria (2026).

### 7.7.5 Análise de sensibilidade para priorização da otimização

Antes da calibração final, foi executada uma análise de sensibilidade global do modelo propulsivo no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_sensitivity.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

Nessa etapa, foram avaliados os mesmos seis parâmetros livres usados no problema de otimização da Equação 7.12:  $C_{Hull,T}$ ,  $M_{Hull,a}$ ,  $W_{Hull}$ ,  $T_{Hull,ded}$ ,  $I_{Prop,r}$  e  $\eta_{Prop,R}$ , com os mesmos limites de busca.

Para reduzir a complexidade de interpretação sem perder rastreabilidade física, os parâmetros foram agrupados em cinco fatores:

- hull\_drag ( $C_{Hull,T}$ );
- hull\_added\_mass ( $M_{Hull,a}$ );
- wake\_deduction ( $W_{Hull}$ ,  $T_{Hull,ded}$ );
- prop\_inertia ( $I_{Prop,r}$ );
- prop\_efficiency ( $\eta_{Prop,R}$ ).

Os índices de Sobol em regime permanente estão na Tabela 23 (detalhes no Apêndice I).

De forma consistente com a física do problema, as saídas hidrodinâmicas do casco (como  $u_{Hull}$  e o esforço resistivo) apresentam maior sensibilidade aos grupos

wake\_deduction e hull\_drag, enquanto saídas eletromecânicas associadas à rotação/corrente do conjunto motor-hélice são dominadas por prop\_efficiency no degrau avaliado. Esse resultado foi usado para orientar a priorização dos ajustes durante a parametrização.

### 7.7.6 Otimização dos parâmetros da hélice e casco

O procedimento, os hiperparâmetros utilizados, e os resultados completos estão registrados no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b). As seções semânticas utilizadas nesta parametrização, com seus intervalos, duração e papel (treino/teste), estão resumidas na Tabela 26.

A otimização da propulsão utiliza como entrada parâmetros carregados de arquivos JSON versionados, incluindo <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_params.json> (parâmetros descritos na Tabela 3), <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_free\_rotor\_step\_params.json> (parâmetros descritos na Tabela 7), <solarboat\_model/models/2020/esc/mam17\_params.json> (parâmetros descritos na Tabela 6) e a estimativa inicial <solarboat\_model/models/2020/propeller/data/propulsive\_initial\_params.json> (sintetizado na Tabela 9).

Como saída, o conjunto de parâmetros resultante é exportado para <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_params.json> (recarregado no próprio *notebook* para verificação) e corresponde aos valores unificados na Tabela 11.

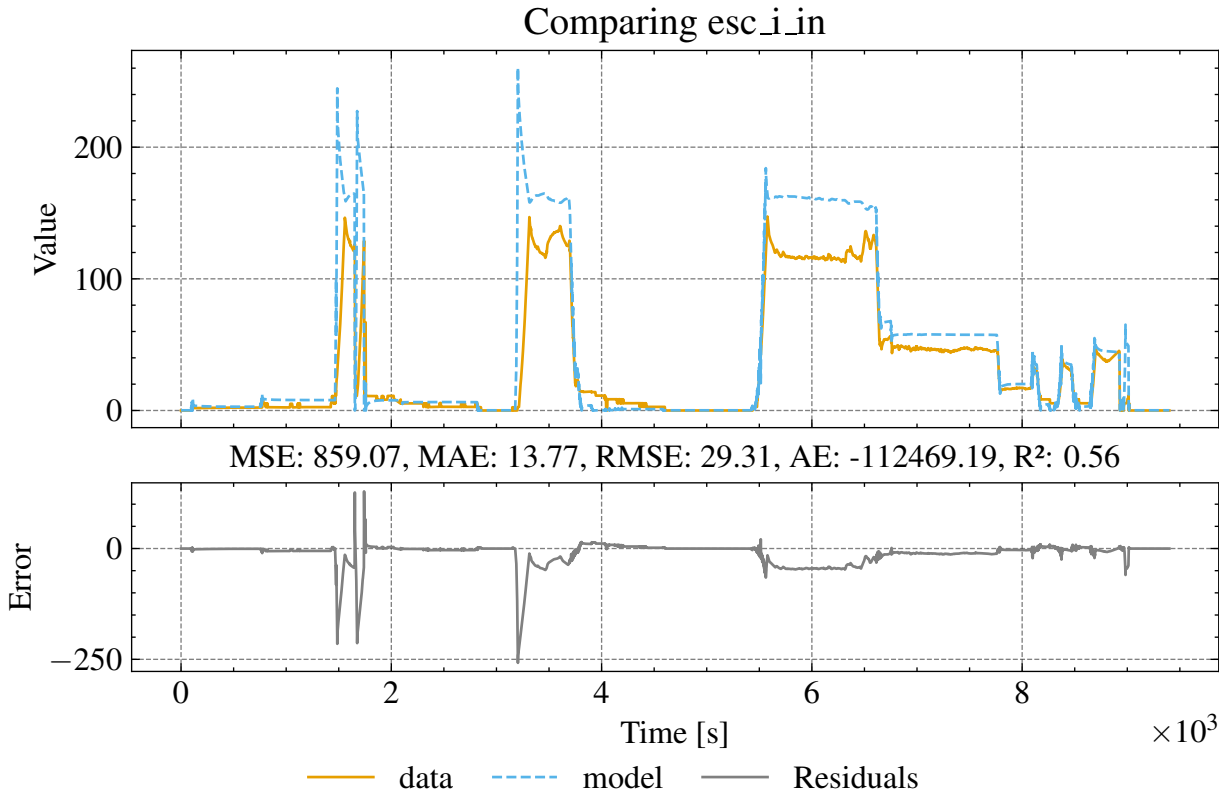
Alternativamente, podemos utilizar um processo de otimização para obter boa parte dos parâmetros de acordo com os dados, desde que seja dada a atenção de criar restrições ao otimizador, como, por exemplo, ao otimizar os coeficientes de torque e empuxo da hélice, crie-se um mecanismo para penalizar hélices que resultam em uma curva de eficiência muito fora do esperado, de acordo com uma hélice conhecida.

Antes de iniciar o processo de otimização, se utilizarmos os parâmetros da Tabela 9 e realizarmos uma simulação utilizando um trecho onde os dados são conhecidos, podemos comparar o desempenho destes valores iniciais. As figuras 70 71 e 72 mostram, em geral, que a estimativa inicial já possui uma boa aderência ao comportamento esperado pelos dados.

Para a hélice definida pelos parâmetros  $k_{Prop,T}$  e  $k_{Prop,Q}$  listados acima, a Figura 73 ilustra uma interpolação dos valores de regime permanente extraídos dos dados da simulação da propulsão.

Para o nosso caso, como temos apenas dados do barco em operação, e estaríamos, durante a otimização, definindo indiretamente o desempenho da hélice por meio do erro medido em sinais correlacionados à variação dos parâmetros realizada, ao permitir que a otimização trabalhe os coeficientes da hélice, não podemos garantir

Figura 70 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo estimado inicialmente com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo com estimativa inicial dos parâmetros. O gráfico principal apresenta as séries no tempo e o painel de resíduos quantifica o erro; métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) são mostradas para avaliar a aderência.

nenhuma relação delas com a série-B, que define hélices para águas abertas, ou seja, desacopladas de um casco, o que não é o que os nossos dados representam. Por esse motivo, apesar de, com poucas linhas, a otimização da hélice ser factível, o autor decidiu não trabalhar nesta linha, e otimizar os outros parâmetros, para que uma extrapolação de substituição de hélice por outra hélice da série-B seja um pouco mais coerente.

Desta maneira, o problema de otimização desejado pode ser definido como no conjunto de Equações 7.12.

$$\min_{\substack{W_{Hull}, T_{Hull,ded} \\ C_{Hull,T}, M_{Hull,a} \\ I_{Prop,r}, \eta_{Prop,R}}} \text{MSE}_w \left( \tilde{Y}(t), \hat{Y}(t) \right) \quad (7.12a)$$

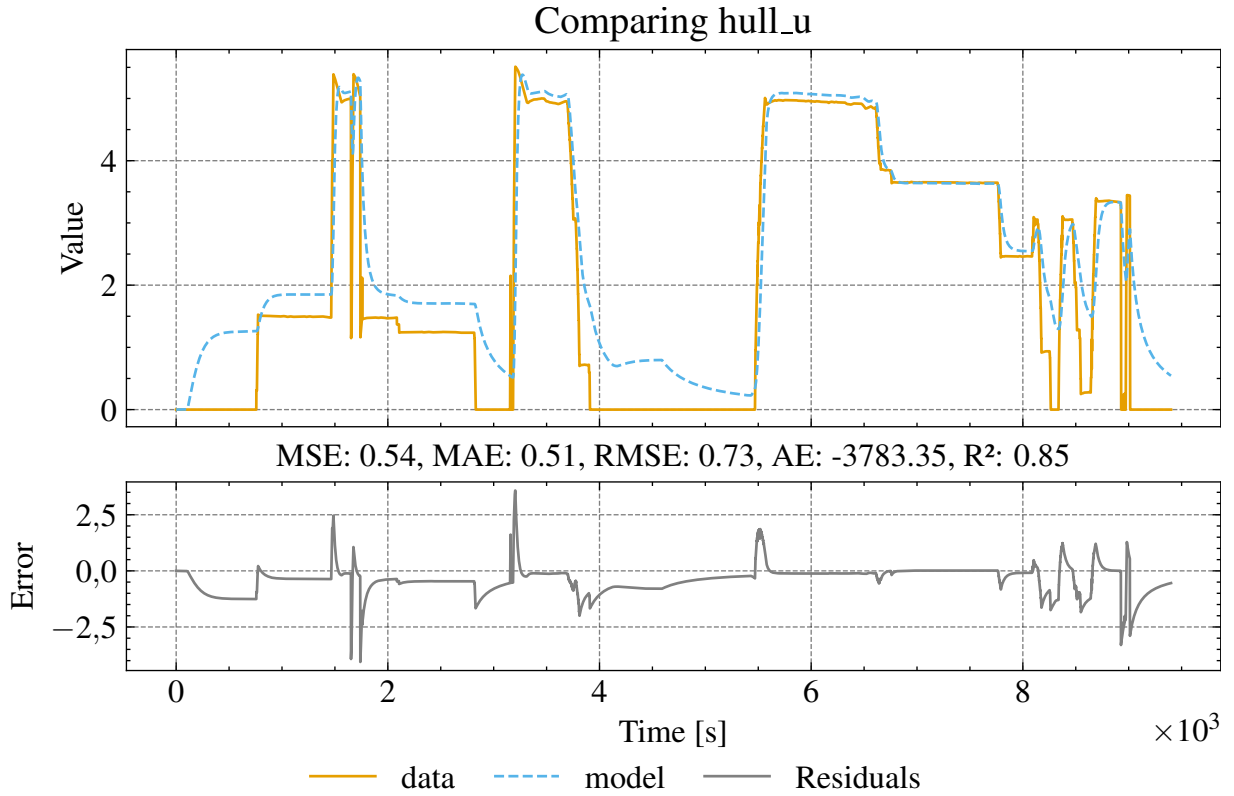
$$\text{s.t.} \quad \hat{Y}(t) = f \left( T, U, X_0, \begin{matrix} W_{Hull}, T_{Hull,ded} \\ C_{Hull,T}, M_{Hull,a} \\ I_{Prop,r}, \eta_{Prop,R} \end{matrix} \right), \quad (7.12b)$$

$$0 \leq W_{Hull} \leq 1,0, \quad (7.12c)$$

$$0 \leq T_{Hull,ded} \leq 1,0, \quad (7.12d)$$

$$0 \leq C_{Hull,T} \leq 100 \times 10^{-3}, \quad (7.12e)$$

Figura 71 – Comparação do sinal hull\_u do modelo estimado inicialmente com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação da velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e modelada com estimativa inicial. A série temporal e o painel de resíduos permitem visualizar discrepâncias locais, enquanto as métricas sumarizam o ajuste no intervalo de treino.

$$0 \leq M_{Hull,a} \leq 1,000 \times 10^3, \quad (7.12f)$$

$$1 \times 10^{-6} \leq I_{Prop,r} \leq 1,0, \quad (7.12g)$$

$$0 \leq \eta_{Prop,R} \leq 1,0, \quad (7.12h)$$

$$|W_{Hull} - 142,5 \times 10^{-3}| \leq 50 \times 10^{-3}, \quad (7.12i)$$

$$1 \times 10^{-6} \leq W_{Hull} \leq 400 \times 10^{-3}, \quad (7.12j)$$

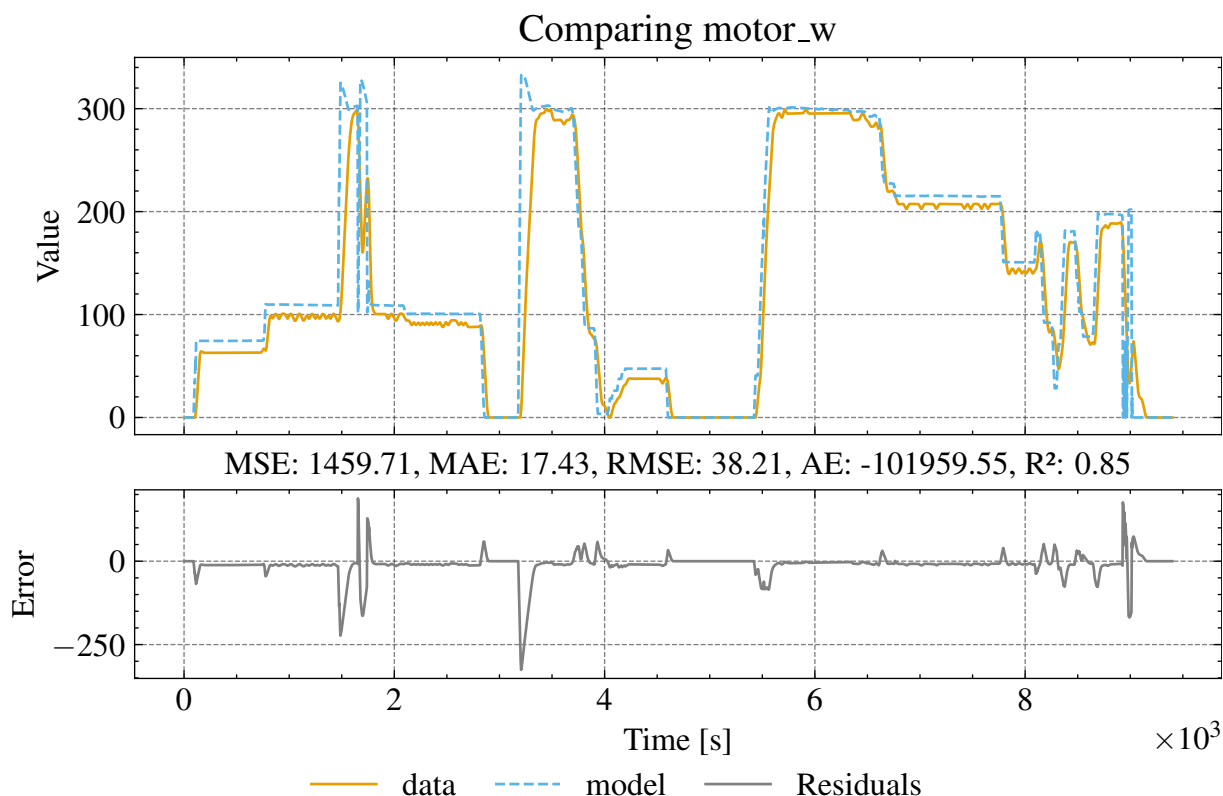
$$0 \leq T_{Hull,ded} \leq 200 \times 10^{-3}, \quad (7.12k)$$

$$500 \times 10^{-3} \leq \frac{T_{Hull,ded}}{W_{Hull}} \leq 700 \times 10^{-3} \quad (7.12l)$$

onde:

- $MSE_w(\tilde{Y}, \hat{Y}) = \frac{1}{Nn_y} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} w_j \left( \tilde{y}_j(t_k) - \hat{y}_j(t_k) \right)^2$ ;
- $N$  é o número de amostras e  $n_y$  é o número de sinais de saída;
- $\tilde{y}$  e  $\hat{y}$  são os sinais padronizados (*StandardScaler*) no conjunto de treino;
- $w_j$  é o peso do sinal  $j$  na função objetivo; neste trabalho, os pesos são unitários ( $w_j = 1$ );

Figura 72 – Comparação do sinal motor\_w do modelo estimado inicialmente com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

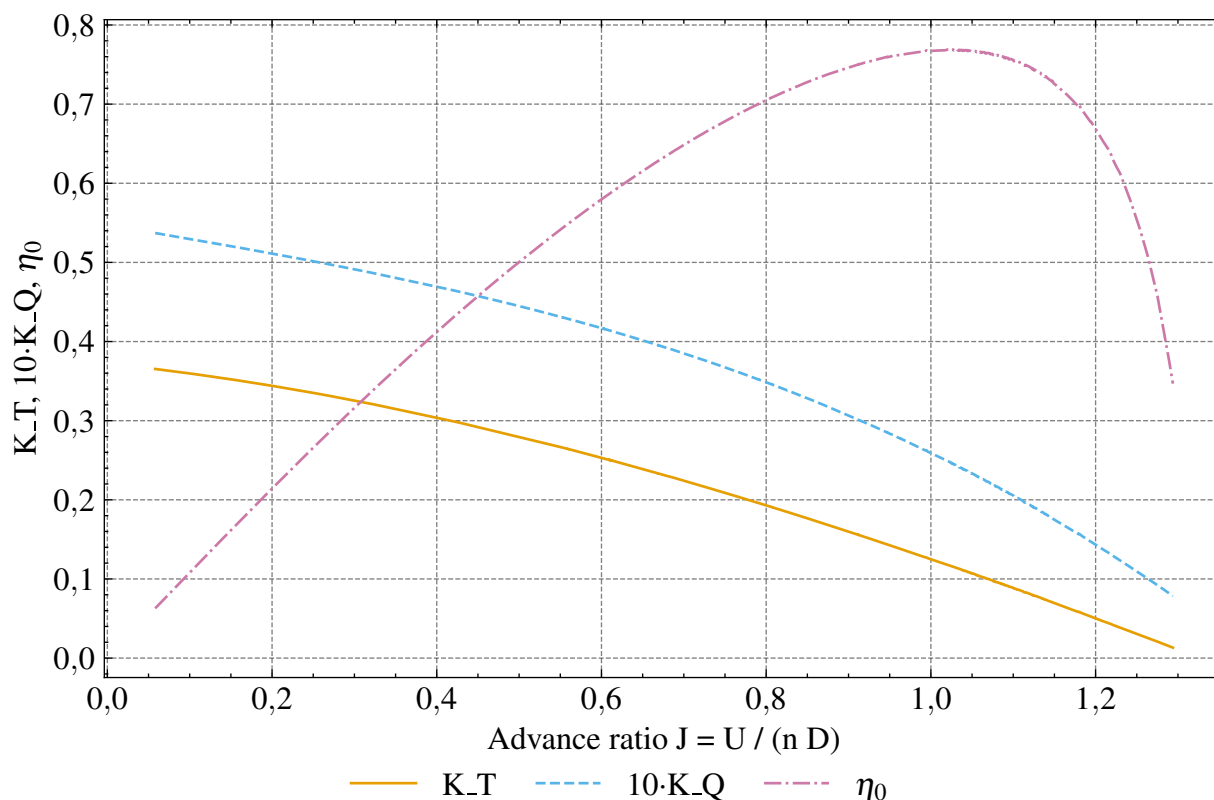
Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo com parâmetros iniciais. O gráfico traz a série temporal, o resíduo e métricas de erro, destacando a qualidade do ajuste antes da otimização.

- $Y = [\omega_{Motor}, i_{ESC,in}, u_{Hull}]$  é o vetor de sinais de treino;
- $\hat{Y} = [\hat{\omega}_{Motor}, \hat{i}_{ESC,in}, \hat{u}_{Hull}]$  é o vetor de sinais preditos do modelo;
- $T$  é o vetor de tempo;
- $U = [v_{Batt}, d_{ESC}]$  é o vetor de sinais de entradas;
- $X_0 = [0, 0, 0]$  é o vetor de condições iniciais dos estados;
- as quatro últimas restrições adicionais representam os critérios físicos usados no notebook para limitar  $W_{Hull}$  e  $T_{Hull,ded}$ .

A Figura 74 mostra o erro a cada iteração, sendo reduzido, enquanto a Figura 75 mostra o espaço de busca sendo comprimido em todos os sinais, mostrando um problema bem posto.

Como resultado, nas Figuras 76 e 77 podemos observar uma boa concordância entre o modelo e os dados para a velocidade angular do motor e a velocidade da embarcação.

Figura 73 – Desempenho da hélice para estimativa inicial



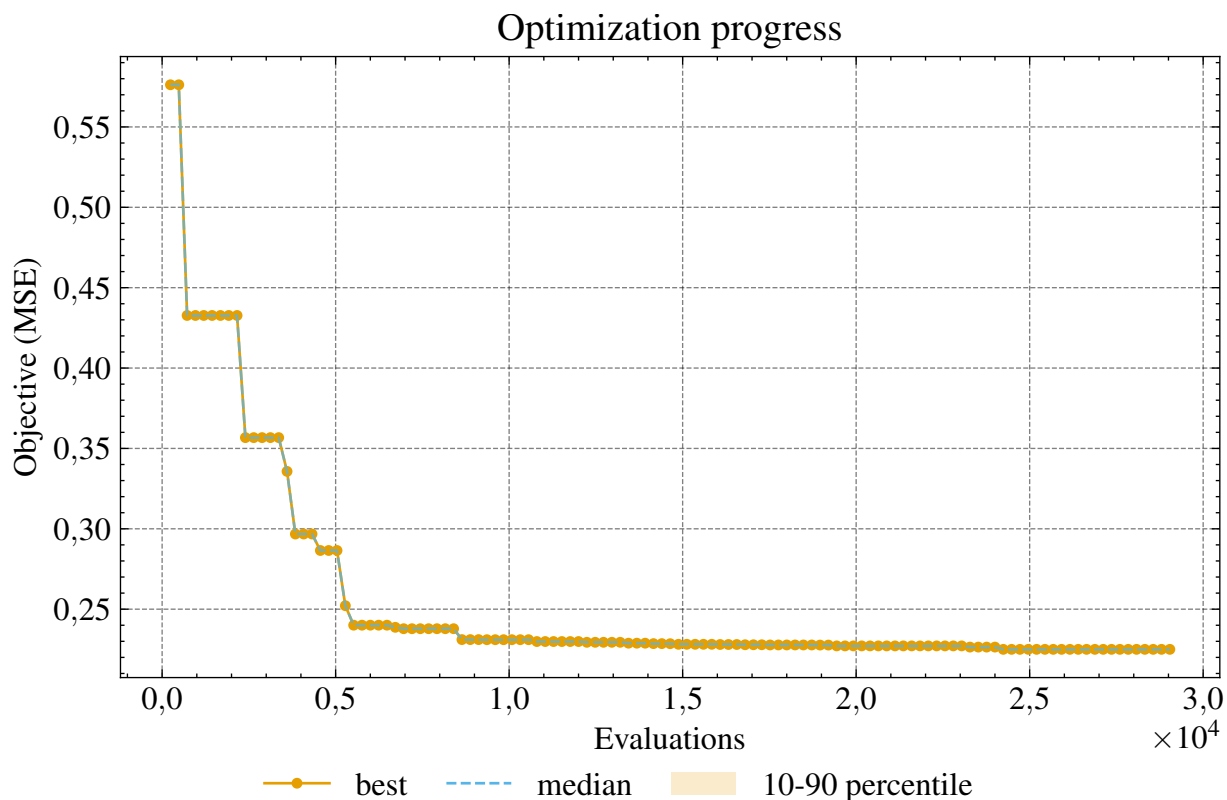
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Desempenho da hélice a partir da estimativa inicial: coeficientes  $K_T$ ,  $10K_Q$  e eficiência  $\eta_0$  em função da razão de avanço  $J = U/(nD)$ .

Porém, a 78 mostra uma concordância limitada para a corrente do ESC. Isso pode ser atribuído a um conjunto de fatores, mas principalmente ao fato de o sinal de corrente do ESC ser uma estimativa baseado em outros sinais, que também possuem problemas, como os sensores de corrente da bateria, em conjunto com a corrente dos MPPTs, que também está sendo estimada, como já foi discutido anteriormente.

No que diz respeito aos testes, a Tabela 10 mostra um comportamento dentro do esperado para todas as sessões. Os resíduos e comparação de cada um dos sinais utilizados na otimização podem ser visualizados com detalhe no Apêndice J.

Figura 74 – Evolução do erro de otimização do modelo da Propulsão



Fonte: Elaboração Própria (2026).

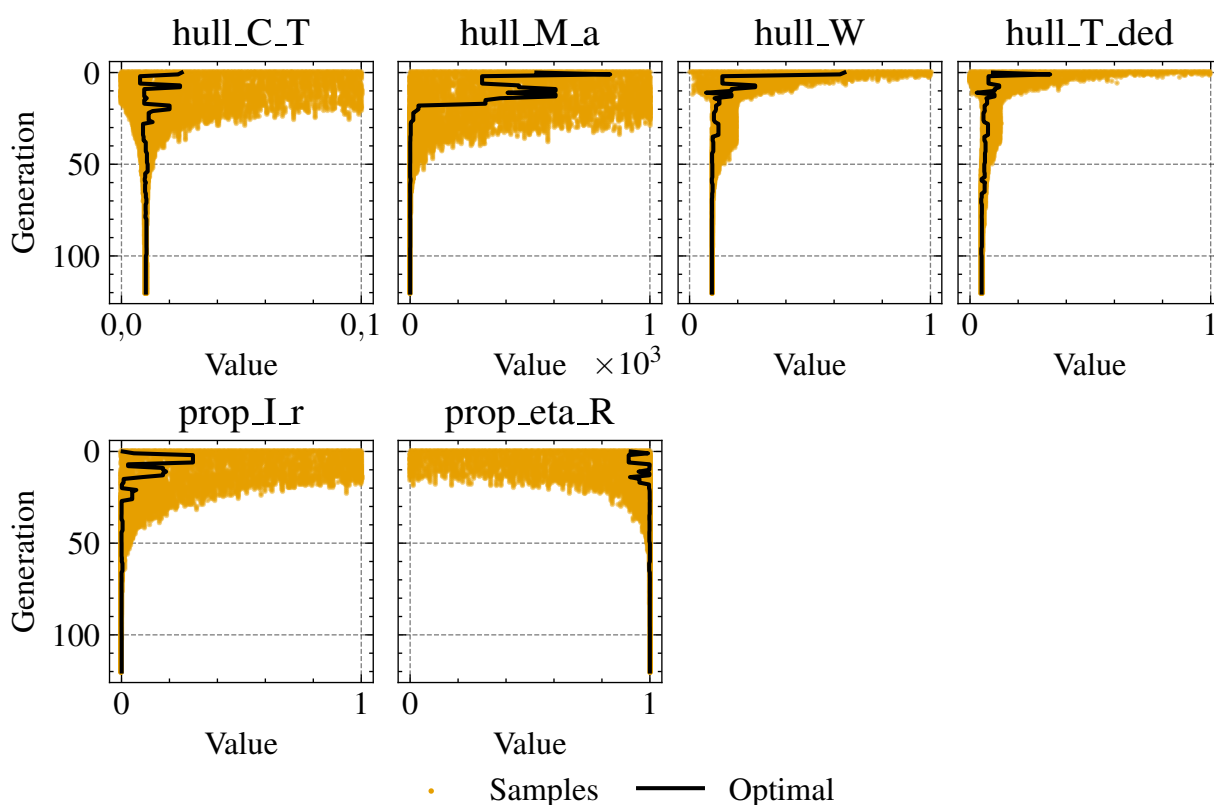
Legenda: Evolução do erro objetivo (MSE ponderado em sinais padronizados) ao longo das avaliações do processo de otimização da propulsão, com curvas de melhor, mediana e percentis (10-90%).

Tabela 10 – Métricas de avaliação do modelo da Propulsão

section	data	MSE	MAE	RMSE	AE	R2
D	motor_w	535,75	11,45	23,15	-1244114,06	0,90
	esc_i_in	109,32	6,62	10,46	-674197,61	0,82
	hull_u	0,19	0,23	0,43	-28812,51	0,90
E	motor_w	750,29	13,37	27,39	-274301,20	0,85
	esc_i_in	452,50	9,37	21,27	-166763,87	0,33
	hull_u	0,22	0,22	0,47	-4848,36	0,88
F1	motor_w	933,73	17,25	30,56	-51471,02	0,89
	esc_i_in	114,26	5,70	10,69	-31473,72	0,95
	hull_u	0,46	0,50	0,68	-2498,21	0,82
F2	motor_w	536,76	13,32	23,17	-63005,39	0,93
	esc_i_in	193,12	5,09	13,90	-22637,15	0,87
	hull_u	0,55	0,63	0,74	-5257,55	0,78
F3	motor_w	1473,83	17,76	38,39	-105566,17	0,85
	esc_i_in	745,96	12,21	27,31	-97068,88	0,62
	hull_u	0,58	0,57	0,76	-4399,23	0,84
F4	motor_w	403,52	12,03	20,09	-96076,56	0,96
	esc_i_in	150,35	5,83	12,26	-31785,84	0,88
	hull_u	0,35	0,45	0,59	-5523,99	0,88

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 75 – Evolução dos parâmetros ótimos do modelo da Propulsão a cada geração



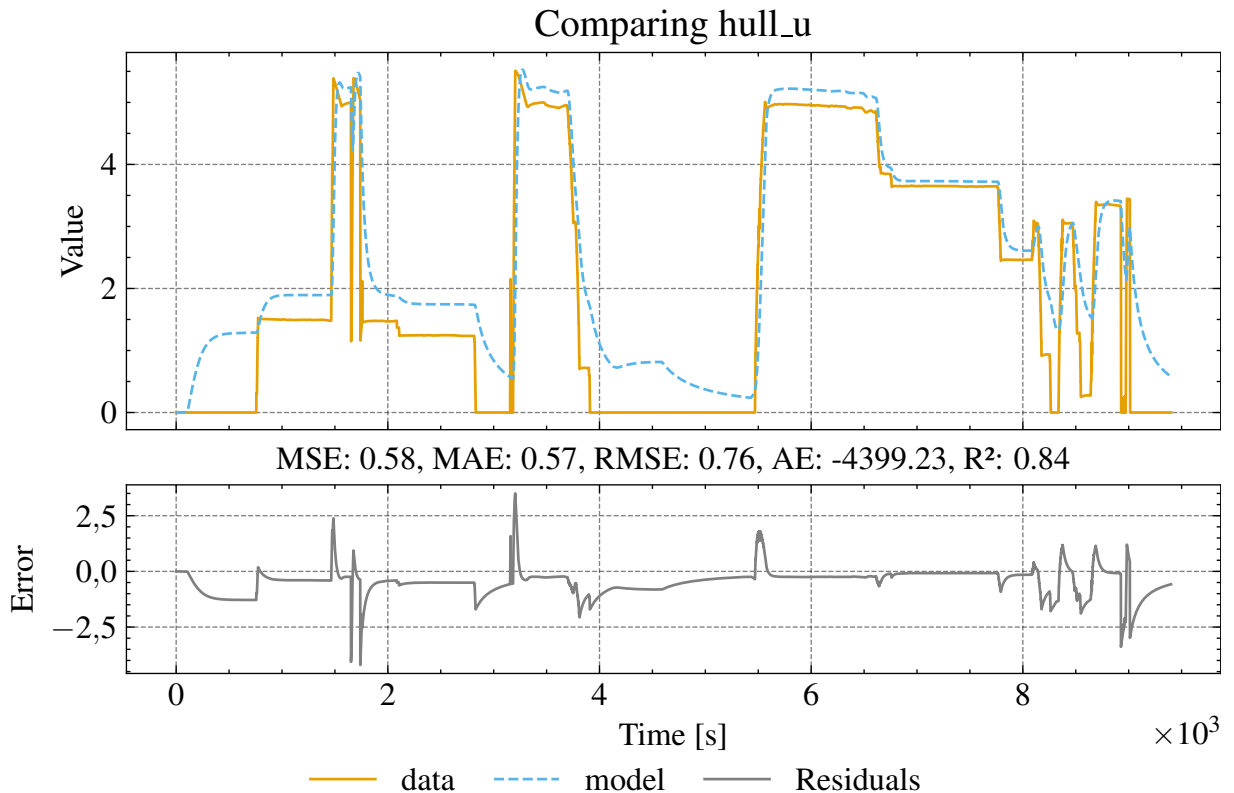
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Trajetória dos parâmetros ótimos ao longo das gerações da otimização (ex.:  $C_T$ ,  $M_a$ ,  $W$ ,  $T_{ded}$ ,  $I_r$  e  $\eta_R$ ). Cada painel mostra a evolução amostral e o valor ótimo, permitindo verificar convergência e variabilidade.

Como resultado da estratégia de parametrização adotada, a Tabela 11 unifica os valores finais dos parâmetros da propulsão: os seis parâmetros efetivamente otimizados ( $W_{Hull}$ ,  $T_{Hull,ded}$ ,  $C_{Hull,T}$ ,  $M_{Hull,a}$ ,  $I_{Prop,r}$  e  $\eta_{Prop,R}$ ) e os demais parâmetros mantidos fixos durante a otimização, incluindo os coeficientes polinomiais da hélice.

Com os resultados da simulação, podemos encontrar regiões de regime permanente e agregá-los de forma a criar um *dataset* com o ponto de operação do modelo para cada região de *duty-cycle* ( $d_{ESC}$ ), e calcular as eficiências (segundo a definição clássica de potência de saída sobre a entrada) para cada parte da propulsão, resultando na Figura 79. Nesta decomposição, não é utilizado um termo de eficiência isolado do casco; o casco entra no resultado pelo seu ponto de operação ( $u_{Hull}$  e  $r_{Hull,t}$ ), sem curva própria de eficiência.

Figura 76 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

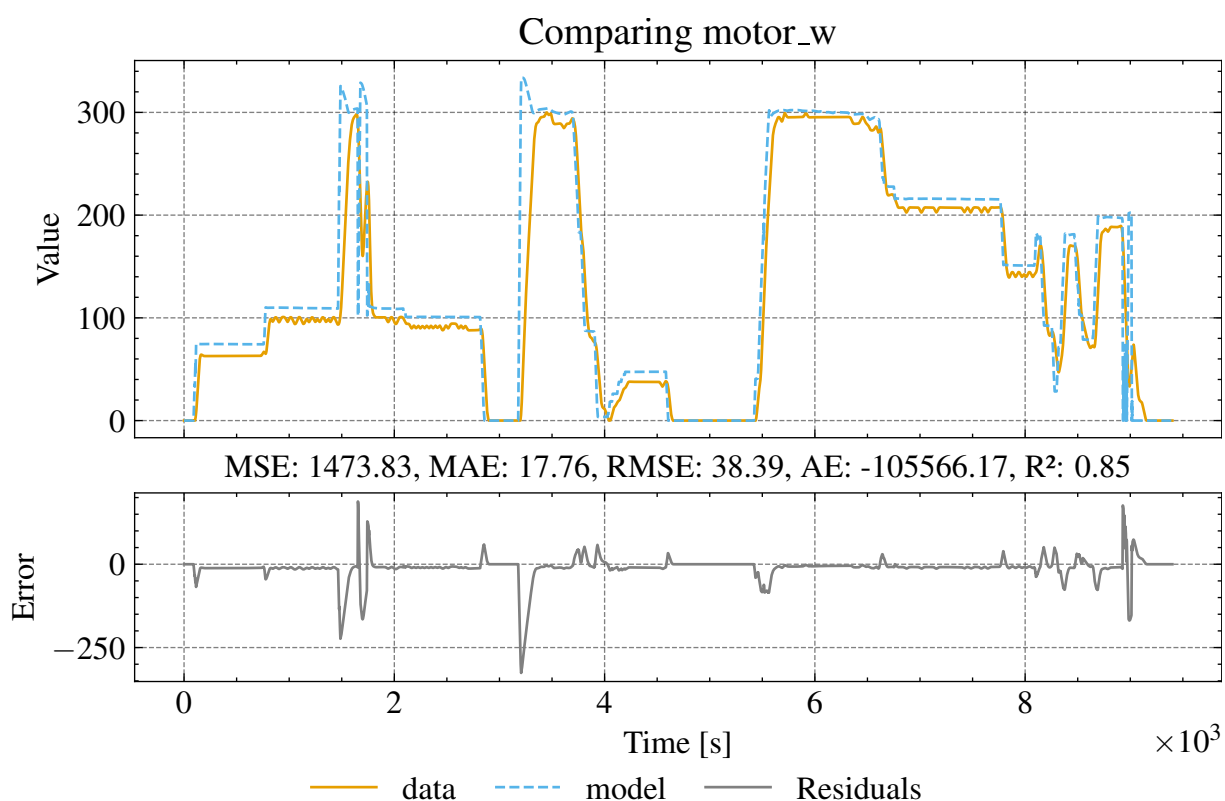
Legenda: Comparação da velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e modelada após a otimização. O gráfico principal e o painel de resíduos exibem o desempenho do modelo calibrado, com métricas de erro para quantificar a melhoria em relação à estimativa inicial.

Tabela 11 – Parâmetros da hélice e do casco utilizados no modelo de propulsão

Parâmetro	Valor	Descrição
$W_{Hull}$	$92,746\ 438\ 803\ 850\ 36 \times 10^{-3}$	Fração de esteira
$T_{Hull,ded}$	$48,239\ 289\ 362\ 583\ 315 \times 10^{-3}$	Dedução de empuxo
$C_{Hull,T}$	$10,164\ 657\ 977\ 504\ 103 \times 10^{-3}$	Coefficiente agregado de resistência
$M_{Hull}$	293,7 kg	Massa total
$M_{Hull,a}$	$139,303\ 755\ 067\ 248\ 46 \times 10^{-3}$ kg	Massa adicionada
$S_{Hull,water}$	4,050 226 176 680 205 m <sup>2</sup>	Área efetiva molhada
$S_{Hull,air}$	4,188 174 709 710 495 m <sup>2</sup>	Área efetiva ao ar
$D_{Prop}$	$228,6 \times 10^{-3}$ m	Diâmetro da hélice
$I_{Prop,r}$	$6,206\ 230\ 843\ 189\ 697\ 10^{-4}$ kgm <sup>2</sup>	Inércia rotacional da hélice
$\eta_{Prop,R}$	$999,949\ 963\ 417\ 630\ 4 \times 10^{-3}$	Eficiência rotacional (arbitrária)
$k_{Prop,T_0}$	$372,178\ 299\ 872\ 780\ 9 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_1}$	$-108,368\ 729\ 487\ 224\ 5 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_2}$	$-167,382\ 395\ 790\ 930\ 9 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_3}$	$28,249\ 002\ 326\ 979\ 98 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_0}$	$54,732\ 648\ 689\ 307\ 98 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_1}$	$-17,556\ 216\ 457\ 405\ 804 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_2}$	$-533,399\ 210\ 204\ 246\ 3 \times 10^{-6}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_3}$	$-10,768\ 694\ 926\ 235\ 431 \times 10^{-3}$	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$

Fonte: Elaboração própria (2026).

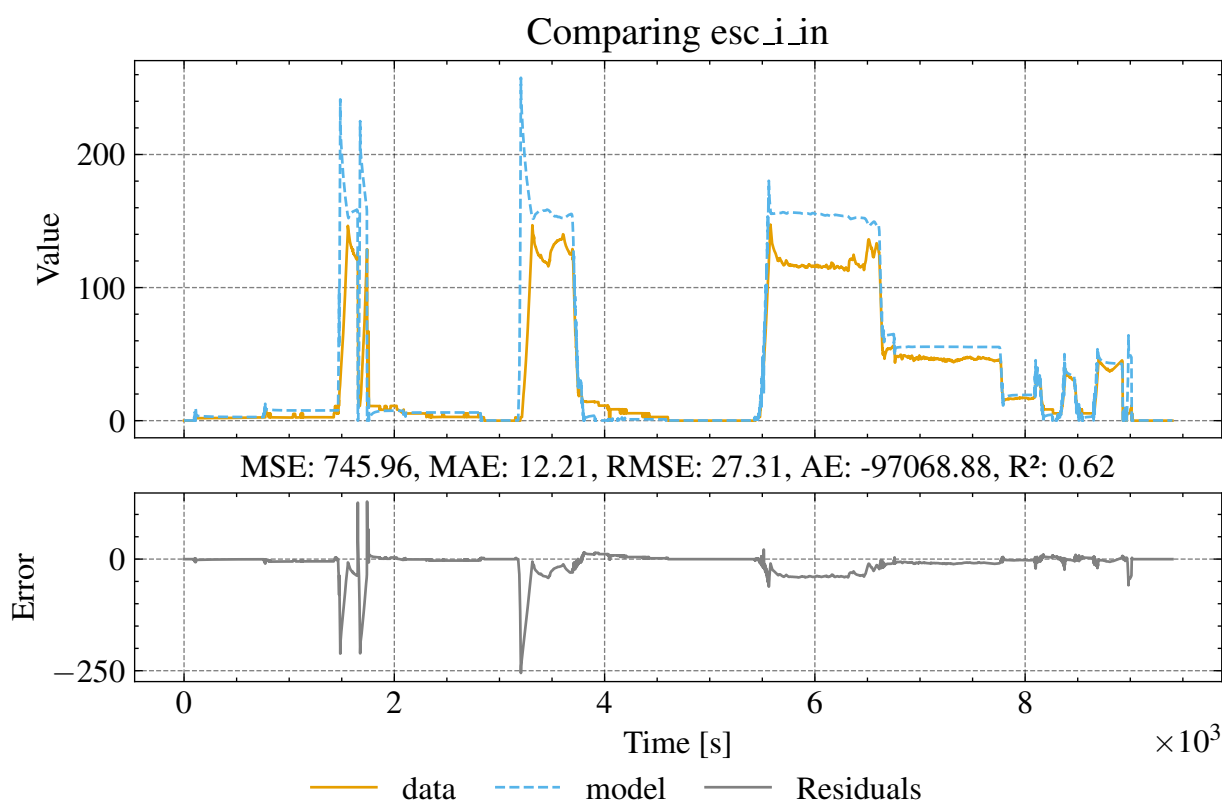
Figura 77 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação da velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e prevista pelo modelo otimizado. A série temporal, os resíduos e as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) evidenciam a aderência do ajuste no conjunto de treino.

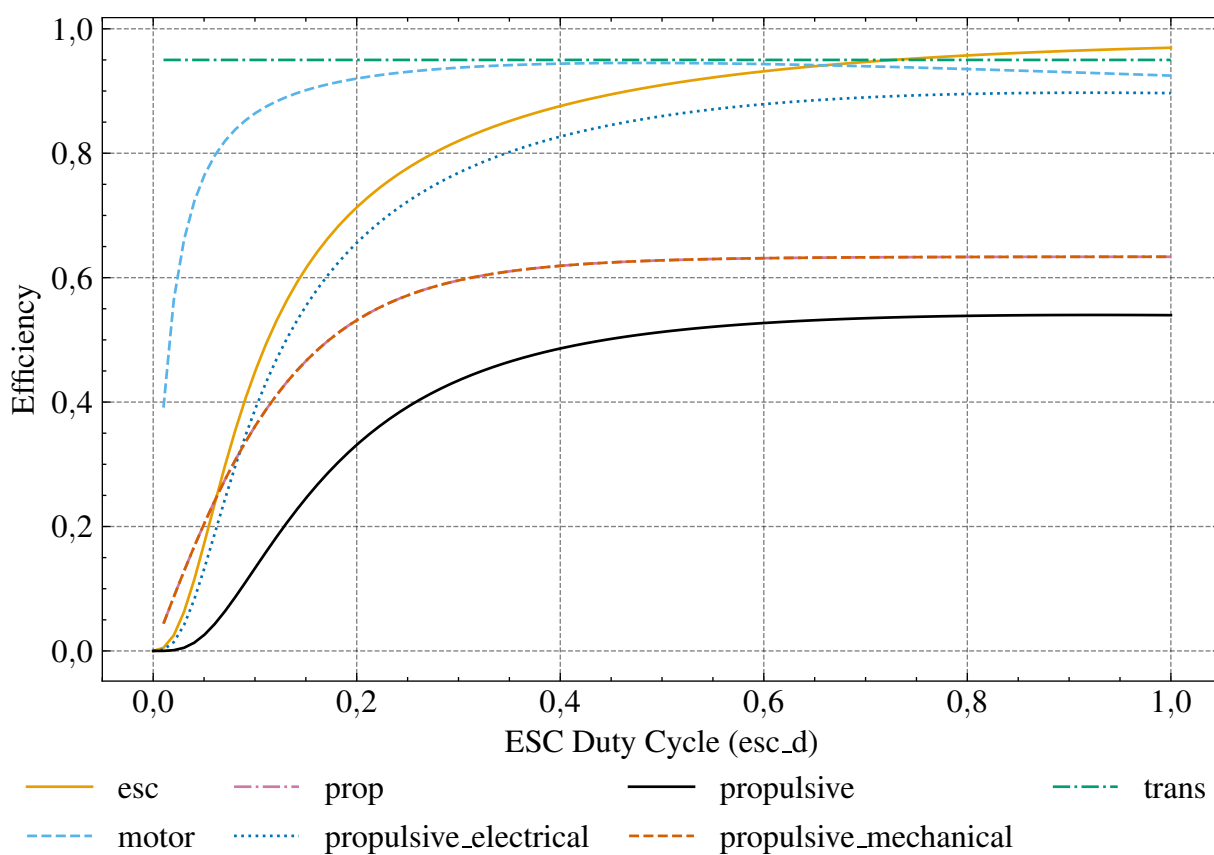
Figura 78 – Comparação do sinal  $i_{ESC\_in}$  do modelo otimizado com os dados de treino



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Comparação da corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida com a predita pelo modelo otimizado. O painel de resíduos e as métricas resumem o desempenho do ajuste e a redução de erro em relação à condição inicial.

Figura 79 – Eficiência do sistema propulsivo decomposta



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Eficiências decompostas do sistema propulsivo em função do ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do ESC. São mostradas as eficiências elétrica e mecânica propulsivas e as contribuições de ESC, motor, transmissão e hélice, permitindo identificar o gargalo dominante.

## 7.8 Demais parâmetros

### 7.8.1 Outras cargas

A potência consumida pelas outras cargas  $P_{OTH,in}$  foi medida em laboratório pelo autor sendo de 1,5 A a 18 V, resultando em 27 W.

### 7.8.2 Densidade da água

A densidade padrão da água do mar  $\rho_{water}$  é considerada  $1,025 \times 10^3 \text{ kgm}^3$ , mas a estimativa pode ser melhorada usando o sistema *My Ocean Pro*, provido por European Union-Copernicus Marine Service (2020), como mostrado na seção 5.4.

## 7.9 Todos os parâmetros

Para consolidar os parâmetros necessários para a utilização do modelo, todos estão listados abaixo:

**Tabela 12 – Resumo de todos os parâmetros**

(continua)

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$B_{Motor,M}$	$1,401\ 819\ 826\ 389\ 131 \times 10^{-3}$	Nm/rads <sup>-1</sup>	Coefficiente de fricção viscosa
$J_{Motor,M}$	$11,815\ 137\ 847\ 671\ 575 \times 10^{-3}$	kgm <sup>2</sup>	Inércia do motor
$K_{Motor,Q}$	$106,384\ 608\ 387\ 410\ 98 \times 10^{-3}$	Nm/A	Constante de torque do motor
$K_{Motor,V}$	$101,780\ 063\ 696\ 961\ 58 \times 10^{-3}$	Vs/rad	Constante de FEM do motor
$L_{Motor,A}$	$62,494\ 963\ 910\ 658\ 8 \times 10^{-6}$	H	Indutância interna do motor
$R_{Motor,A}$	$19,544\ 223\ 022\ 798\ 1 \times 10^{-3}$	Ω	Resistência interna do motor
$I_{Motor,r,load}$	0	kgm <sup>2</sup>	Inércia refletida da carga no eixo do motor
$k_{Trans}$	$636,363\ 636\ 363\ 636\ 4 \times 10^{-3}$	-	Relação de engrenagens da transmissão, definida como velocidade de saída sobre velocidade de entrada
$\eta_{Trans}$	$950 \times 10^{-3}$	-	Eficiência da transmissão
$I_{Trans,r,in}$	0	kgm <sup>2</sup>	Inércia do conjunto de entrada
$I_{Trans,r,out}$	0	kgm <sup>2</sup>	Inércia do conjunto de saída
$Q_{Batt}$	$172,800 \times 10^3$	C	Capacidade nominal de carga
$\eta_{Batt}$	1	-	Eficiência coulômbica
$N_{Batt,S}$	3	-	Quantidade de baterias em série
$R_{Batt,0}$	$4,833\ 021\ 318\ 920\ 369 \times 10^{-3}$	Ω	Resistência série
$R_{Batt,1}$	$5,009\ 783\ 862\ 137\ 879 \times 10^{-3}$	Ω	Resistência do ramo RC#1
$C_{Batt,1}$	763,535 073 771 230 5	F	Capacitância do ramo RC#1
$R_{Batt,2}$	$97,393\ 108\ 170\ 043\ 93 \times 10^{-3}$	Ω	Resistência do ramo RC#2
$C_{Batt,2}$	$212,113\ 619\ 119\ 252\ 37 \times 10^3$	F	Capacitância do ramo RC#2
$a_0$	10,786 458 333 3	V	Coefficiente constante de $v_{Batt,oc}(z)$

Tabela 12 – Resumo de todos os parâmetros

(continua)

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$a_1$	3,586 389 351 7	V	Coefficiente linear de $v_{Batt,oc}(z)$
$a_2$	-3,075 301 140 1	V	Coefficiente quadrático de $v_{Batt,oc}(z)$
$a_3$	1,616 372 181 4	V	Coefficiente cúbico de $v_{Batt,oc}(z)$
$A_{PV}$	1,6368	m <sup>2</sup>	Área de captação do painel fotovoltaico
$\eta_{PV}$	143,099 072 926 849 62 × 10 <sup>-3</sup>	-	Eficiência do painel fotovoltaico
$\eta_{MPPT}$	932,345 947 418 226 3 × 10 <sup>-3</sup>	-	Eficiência do MPPT
$n_{MPPTs}$	4	-	Quantidade de MPPTs (e painéis)
$V_{ESC,ds,ov}$	1,222 222 222 222 222 3	-	Fator de sobretensão
$F_{ESC,s}$	12,550 × 10 <sup>3</sup>	Hz	Frequência de comutação
$R_{ESC,ds,on}$	6,428 129 677 311 848 × 10 <sup>-3</sup>	Ω	Resistência $R_{DS(on)}$
$V_{ESC,F}$	2,884 681 806 089 211	V	Queda direta do diodo
$R_{ESC,D}$	3,448 696 395 697 723 × 10 <sup>-3</sup>	Ω	Resistência série do diodo
$E_{ESC,on}$	70	μJ	Energia por comutação (ligar)
$E_{ESC,off}$	110	μJ	Energia por comutação (desligar)
$Q_{ESC,rr}$	190	nC	Carga de recuperação reversa
$W_{Hull}$	92,746 438 803 850 36 × 10 <sup>-3</sup>	-	Fração de esteira
$T_{Hull,ded}$	48,239 289 362 583 315 × 10 <sup>-3</sup>	-	Dedução de empuxo
$C_{Hull,T}$	10,164 657 977 504 103 × 10 <sup>-3</sup>	$\frac{N}{kgms^{-2}}$	Coefficiente agregado de resistência
$M_{Hull}$	293,7	kg	Massa total
$M_{Hull,a}$	139,303 755 067 248 46 × 10 <sup>-3</sup>	kg	Massa adicionada
$S_{Hull,water}$	4,050 226 176 680 205	m <sup>2</sup>	Área efetiva molhada
$S_{Hull,air}$	4,188 174 709 710 495	m <sup>2</sup>	Área efetiva ao ar
$D_{Prop}$	228,6 × 10 <sup>-3</sup>	m	Diâmetro da hélice
$I_{Prop,r}$	620,623 084 318 969 7 × 10 <sup>-6</sup>	kgm <sup>2</sup>	Inércia rotacional da hélice
$\eta_{Prop,R}$	999,949 963 417 630 4 × 10 <sup>-3</sup>	-	Eficiência rotacional
$k_{Prop,T_0}$	372,178 299 872 780 9 × 10 <sup>-3</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_1}$	-108,368 729 487 224 5 × 10 <sup>-3</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_2}$	-167,382 395 790 930 9 × 10 <sup>-3</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,T_3}$	28,249 002 326 979 98 × 10 <sup>-3</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,t,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_0}$	54,732 648 689 307 98 × 10 <sup>-3</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_1}$	-17,556 216 457 405 804 × 10 <sup>-3</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$k_{Prop,Q_2}$	-533,399 210 204 246 3 × 10 <sup>-6</sup>	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$

Tabela 12 – Resumo de todos os parâmetros

(continua)

Parâmetro	Valor	Un.	Descrição
$k_{Prop,Q3}$	$-10,768\ 694\ 926\ 235\ 431 \times 10^{-3}$	-	Coefficiente do polinômio de $k_{Prop,q,ow}(t)$
$\rho_{air}$	1,1839	kg/m <sup>3</sup>	Densidade do ar
$\rho_{water}$	$1,023 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>	Densidade da água
$P_{OTH,in}$	27,0	W	Potência das outras cargas

Fonte: Elaboração própria (2026).

## 8 RESULTADOS

Este capítulo consolida os resultados obtidos com o modelo unificado da embarcação solar, construído a partir de dados operacionais, com foco em atender à pergunta de pesquisa formulada na Introdução: se é possível extrair informações suficientes para a criação de um modelo simulável e atualizável (passível de reparametrização e de alterações nos modelos com novos dados) que represente o comportamento da embarcação.

A seguir, cada parte dos resultados é introduzida, e interpretada considerando (i) as expectativas físicas para o comportamento do sistema e (ii) as implicações para uso do modelo como ferramenta de estudo, pesquisa, e tomada de decisão estratégica, em consonância com o objetivo geral do trabalho.

A seção 8.1 consolida a avaliação quantitativa dos submodelos de geração, bateria e propulsão, e discute a consistência do modelo integrado por meio da decomposição de eficiências, da verificação por balanço de potência e de curvas de desempenho relevantes para estratégia (potência vs velocidade e Wh/km vs velocidade).

A seção 8.2 apresenta um estudo de caso (hipotético) no qual o modelo é utilizado para comparar e selecionar configurações de hélice e transmissão, explicitando o compromisso entre velocidade máxima e consumo específico, conforme requerido em cenários de diferentes estilos de provas das competições *sprint* (tiro curto de velocidade) e *endurance* (provas longas, de eficiência).

### 8.1 Avaliação dos modelos

Com a finalidade de verificar o funcionamento do modelo desenvolvido, o modelo completo é carregado e executado utilizando como entrada uma seção de dados conhecida. A seção selecionada caracteriza-se por uma descarga da bateria associada a uma prova com duração aproximada de 2,5 h.

As entradas utilizadas são o comando do piloto no ESC ( $D_{ESC}$ ) e a irradiância fotovoltaica ( $G_{PV}$ ). A partir dessas entradas, o simulador produz os sinais de saída do modelo (variáveis observáveis da embarcação) e também estados internos associados aos subsistemas (casco, hélice, e motor), os quais permitem inspecionar o acoplamento energético e mecânico ao longo do regime avaliado.

Além das verificações de consistência física apresentadas nesta seção, a aderência do modelo aos dados foi quantificada por métricas de avaliação calculadas durante a parametrização dos subsistemas. Nas seções com melhor ajuste, obteve-se  $R^2 = 0,95$  para a tensão da bateria e  $R^2 = 0,96$  para a velocidade angular do motor, conforme as Tabela 4 e Tabela 10.

### 8.1.1 Avaliação dos submodelos parametrizados

Antes da análise integrada do modelo completo, é importante explicitar o desempenho dos submodelos calibrados individualmente em dados de teste. A Tabela 13 consolida as faixas de  $R^2$  obtidas para as principais saídas observáveis de cada bloco.

**Tabela 13 – Resumo da aderência dos submodelos em dados de teste**

Submodelo	Sinal avaliado	Faixa de $R^2$
Geração	$i_{MPPT,in}$	-0,28 a 0,88
Geração	$v_{MPPT,in}$	-44,71 a 0,82
Bateria (PNGV 2RC)	$v_{Batt}$	-0,36 a 0,95
Propulsão	$w_{Motor}$	0,85 a 0,96
Propulsão	$i_{ESC,in}$	0,33 a 0,95
Propulsão	$u_{Hull}$	0,78 a 0,90

Fonte: Elaboração Própria (2026).

No submodelo da geração, as métricas da Tabela 2 mostram bom comportamento para  $i_{MPPT,in}$  na maior parte das seções, com degradação pontual na seção F. Para  $v_{MPPT,in}$ , há boa aderência em parte das seções, mas com perdas relevantes em A e F, coerentes com a simplificação adotada para o painel fotovoltaico, que não modela sua curva tensão-corrente. Os resíduos por seção podem ser consultados no Apêndice A.

No submodelo da bateria, a Tabela 4 mostra melhor desempenho em trechos representativos, isto é, trechos com regime semelhante ao usado na calibração e sem ocorrência dominante de descarga profunda ou gaseificação (como a seção D23, com  $R^2 = 0,95$ ). Já os trechos não representativos são aqueles em que há ocorrência desses fenômenos (por exemplo, D34 e D56), os quais não são explicitamente modelados na estrutura 2RC adotada; por isso, a aderência tende a cair nesses intervalos. Os gráficos detalhados de resíduos e séries temporais estão no Apêndice B.

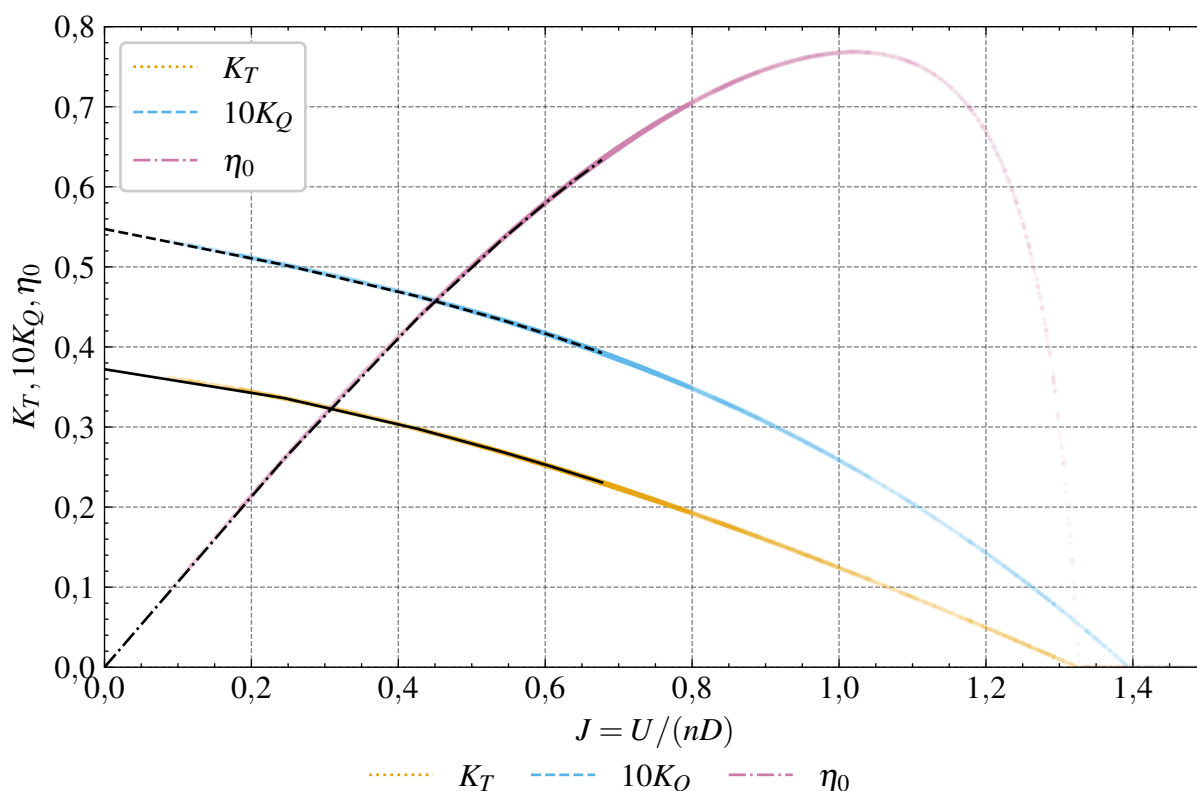
No submodelo de propulsão, a Tabela 10 indica aderência sólida para  $w_{Motor}$  e  $u_{Hull}$  ao longo das seções avaliadas, com maior variação no sinal  $i_{ESC,in}$ . Esse comportamento é coerente com a natureza desse sinal no conjunto de dados, que depende de estimativas indiretas em parte do pipeline. As comparações seção a seção estão documentadas no Apêndice J.

### 8.1.2 Consistência física e energética do modelo integrado

A Figura 80 apresenta as curvas *open-water* da hélice, descritas por coeficientes adimensionais de empuxo ( $K_T$ ), torque ( $K_Q$ ), e eficiência ( $\eta_0$ ) em função do coeficiente de avanço ( $J$ ). Observa-se a existência de uma faixa intermediária de maior  $\eta_0$ , seguida de queda em valores de  $J$  mais baixos, e mais altos, padrão compatível com

curvas clássicas de desempenho de hélices submersas e necessário para que o acoplamento motor-hélice resulte em um regime de operação fisicamente coerente. Aqui, as amostras da simulação dinâmica são representadas por pontos semi-transparentes e coloridos, enquanto os sinais de regime estáticos são os três diferentes traçados. Pode-se notar que a concentração de pontos na região intermediária nos fornece a informação da região do regime de operação da hélice. Além disso, a simulação dinâmica fornece uma visão mais completa da operação em contraste com a informação que o regime permanente fornece.

**Figura 80 – Curva clássica de desempenho da hélice em água livre (*open-water*)**



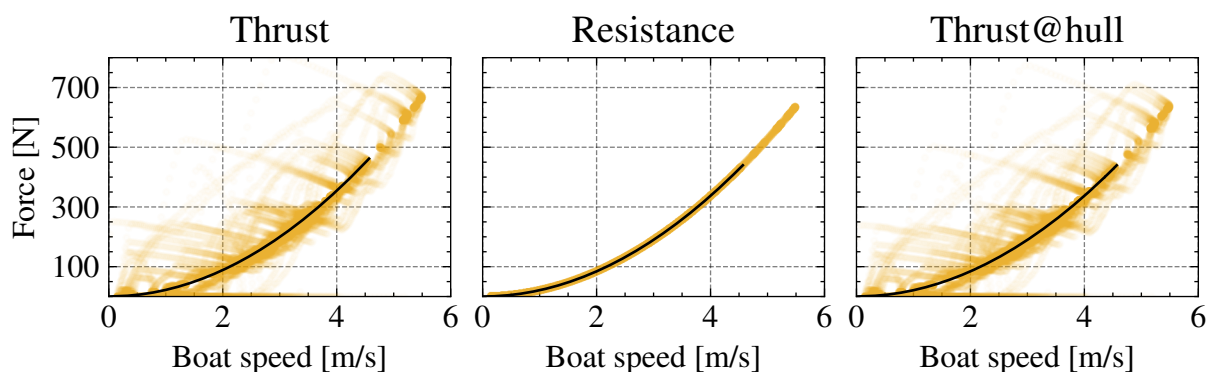
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Curvas em água livre (*open-water*) da hélice: coeficiente de empuxo ( $K_T$ ), coeficiente de torque ( $10K_Q$ ) e eficiência  $\eta_0$  em função da razão de avanço  $J = U/(nD)$ . O eixo horizontal mostra  $J$  e o vertical os coeficientes adimensionais, permitindo identificar a faixa de maior eficiência e o regime de operação esperado.

O casco, por sua vez, tem seu comportamento evidenciado pelas forças relacionadas em função da velocidade do casco, como mostrado na Figura 81. A comparação entre empuxo e resistência ao avanço permite identificar o regime operacional da embarcação. Aqui, novamente o regime permanente foi marcado com as linhas, e as amostras da simulação dinâmica foram representadas por pontos coloridos semi-transparentes. É possível notar que a grande maior parte do regime de operação se restringe a uma pequena variação em torno do regime permanente, porém, existe uma seção de velocidades mais altas, que não são representadas pelo regime permanente, possivelmente pelo simples motivo da dinâmica imposta pela missão representada

pelos dados: não existem grandes períodos de permanência em altas velocidades em uma prova média (2,5h). Além disso, fica evidente que a variação dinâmica da embarcação tem menor impacto na resistência do casco em função da velocidade do que no empuxo, o que pode ser explicado pela limitação da modelagem escolhida, que considera a embarcação como um corpo estático, desconsiderando ondas ou variação na área molhada, e também desconsidera correntezas, e o vento.

**Figura 81 – Empuxo e resistência em função da velocidade**



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Curvas de empuxo da hélice e resistência do casco em função da velocidade da embarcação. O eixo horizontal mostra a velocidade (m/s) e o vertical a força (N).

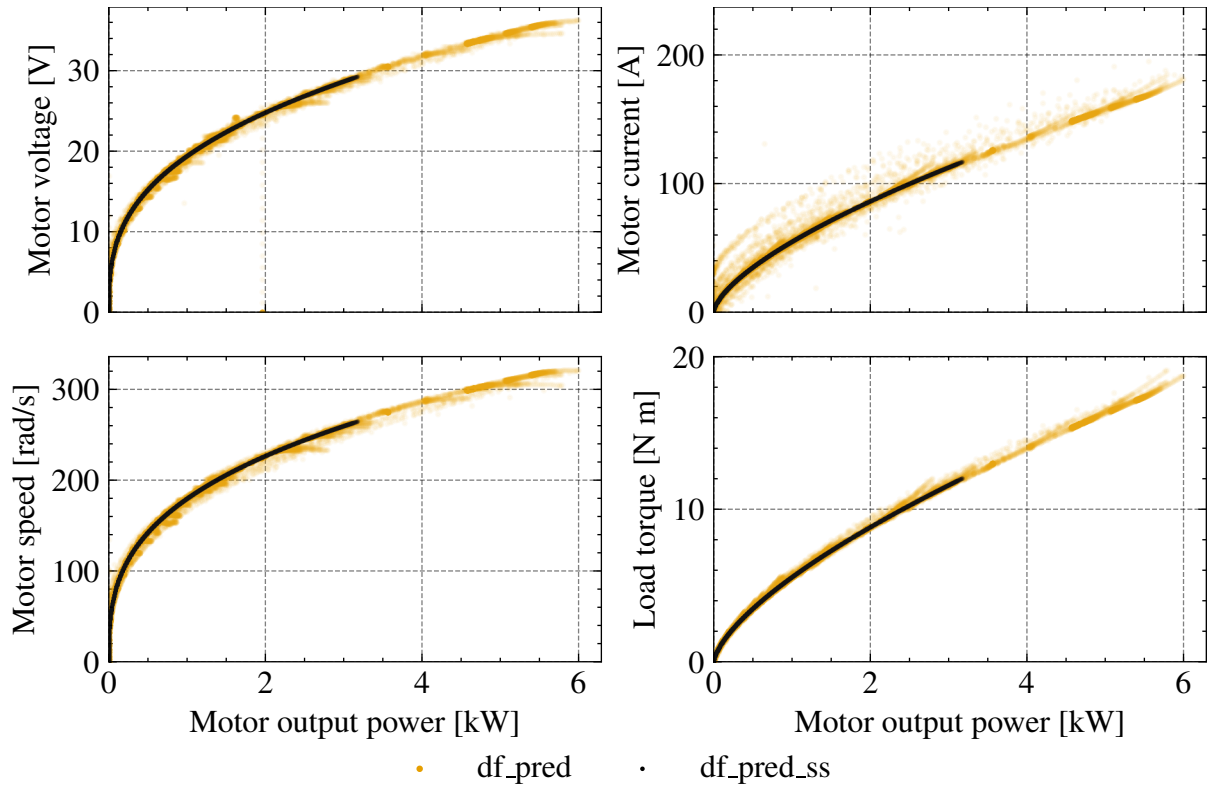
O ponto de operação do motor pode ser analisado diretamente na Figura 82, na qual a tensão, a corrente, a rotação, e o torque de carga são organizados em função da potência de saída. A presença de uma curva de referência (regime permanente) e de uma nuvem de pontos (simulação dinâmica) evidencia o efeito de transientes: mesmo para faixas próximas de potência, o par  $\{w, \tau\}$  pode variar devido a acelerações e variações de carga impostas pelo casco e pela hélice.

Alternativamente, o ponto de operação pode ser observado no mapa de eficiência apresentado na Figura 83. A nuvem de marcadores, que representam as amostras da simulação dinâmica, se concentra nas regiões de maior eficiência do mapa (próximas ao topo da escala), indicando bom aproveitamento energético do motor no regime avaliado.

O comportamento da hélice em termos de eficiência também pode ser interpretado pelo mapa *open-water* (Figura 84) e pela trajetória de operação em função de RPM (Figura 85). Em conjunto, esses resultados permitem discutir se o acoplamento entre velocidade do casco, rotação da hélice e potência no eixo tende a se manter em regiões de maior eficiência hidrodinâmica, aspecto que motiva o estudo de caso de seleção de hélice, e transmissão apresentado na seção 8.2.

Em termos de eficiência global, a Figura 86 mostra o sistema decomposto em eficiências de subsistemas sob o ponto de vista da velocidade da embarcação. Observe-se a dispersão dos pontos dinâmicos em relação à curva de regime permanente, o que é coerente com o fato de que a operação em ambiente real envolve acelerações e

Figura 82 – Variáveis do ponto de operação do motor em função da potência



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Ponto de operação do motor em função da potência de saída (kW). São mostradas corrente e tensão elétricas, velocidade angular (rad/s) e torque de carga (N·m), comparando a curva de regime permanente com amostras dinâmicas.

perturbações que não são representadas por um mapeamento estritamente estacionário. Ainda assim, a concordância de forma entre os pontos e a curva de referência sustenta o uso do regime permanente como base para planejamento e comparação de alternativas.

Para uma validação energética simples do sistema, calcula-se o erro de fechamento no nó do barramento CC (conexão na bateria) a partir de um balanço de correntes (Lei de Kirchhoff). Definindo o sentido positivo como corrente que entra no barramento, tem-se:

$$\dot{i}_{bus,in} = \dot{i}_{MPPT,out} + \dot{i}_{Batt}, \quad (8.1)$$

$$\dot{i}_{bus,out} = \dot{i}_{ESC,in} + \dot{i}_{Oth,in}, \quad (8.2)$$

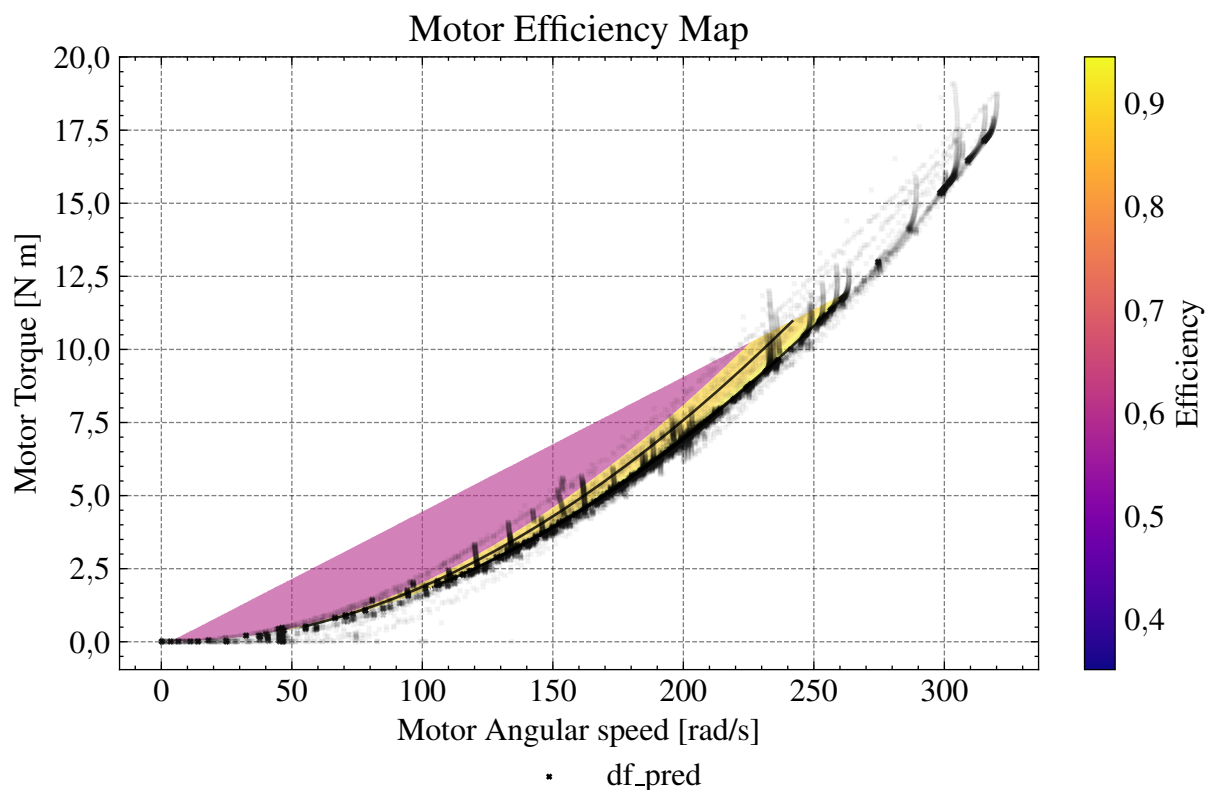
$$\dot{i}_{bus,err} = \dot{i}_{bus,in} - \dot{i}_{bus,out}. \quad (8.3)$$

Multiplicando as correntes pela tensão do barramento (tensão da bateria,  $v_{Batt}$ ), obtém-se o erro em potência, e sua forma relativa:

$$p_{bus,in} = v_{Batt} \dot{i}_{bus,in}, \quad (8.4)$$

$$p_{bus,out} = v_{Batt} \dot{i}_{bus,out}, \quad (8.5)$$

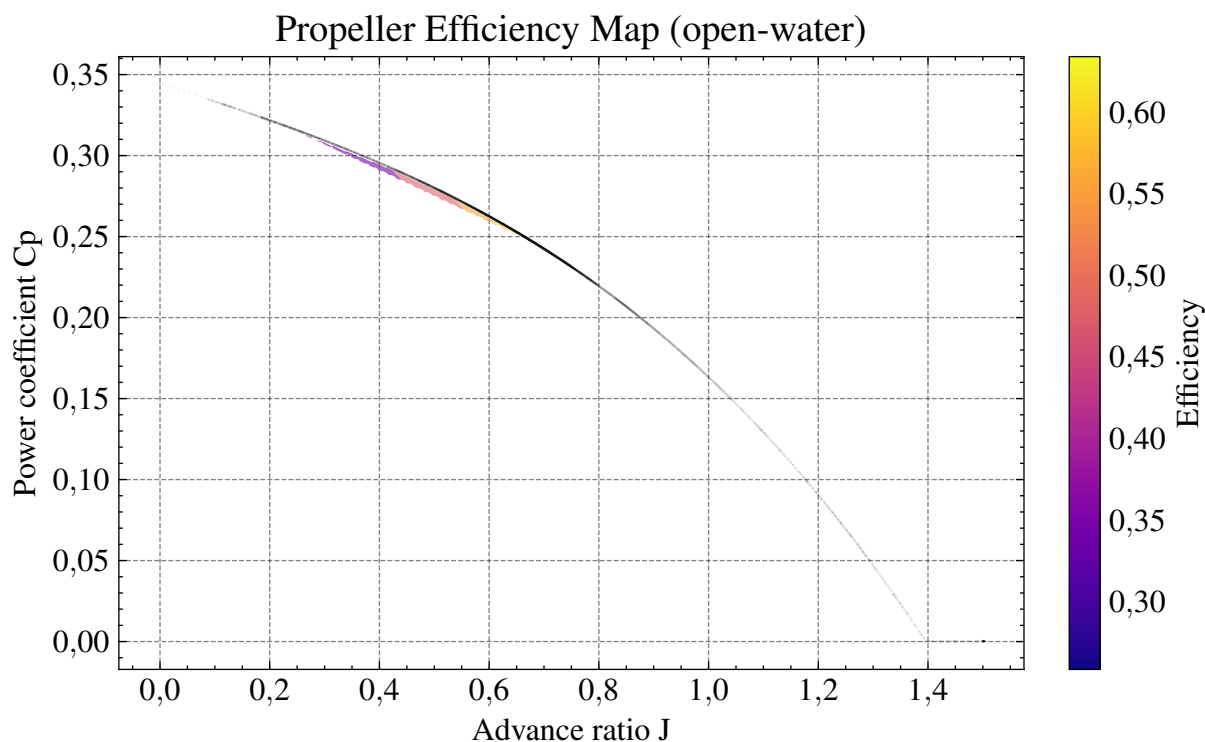
Figura 83 – Mapa de eficiência do motor



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Mapa de eficiência do motor em função da velocidade angular (rad/s) e do torque (N·m). O fundo colorido representa a eficiência e a nuvem de pontos mostra as amostras da simulação dinâmica.

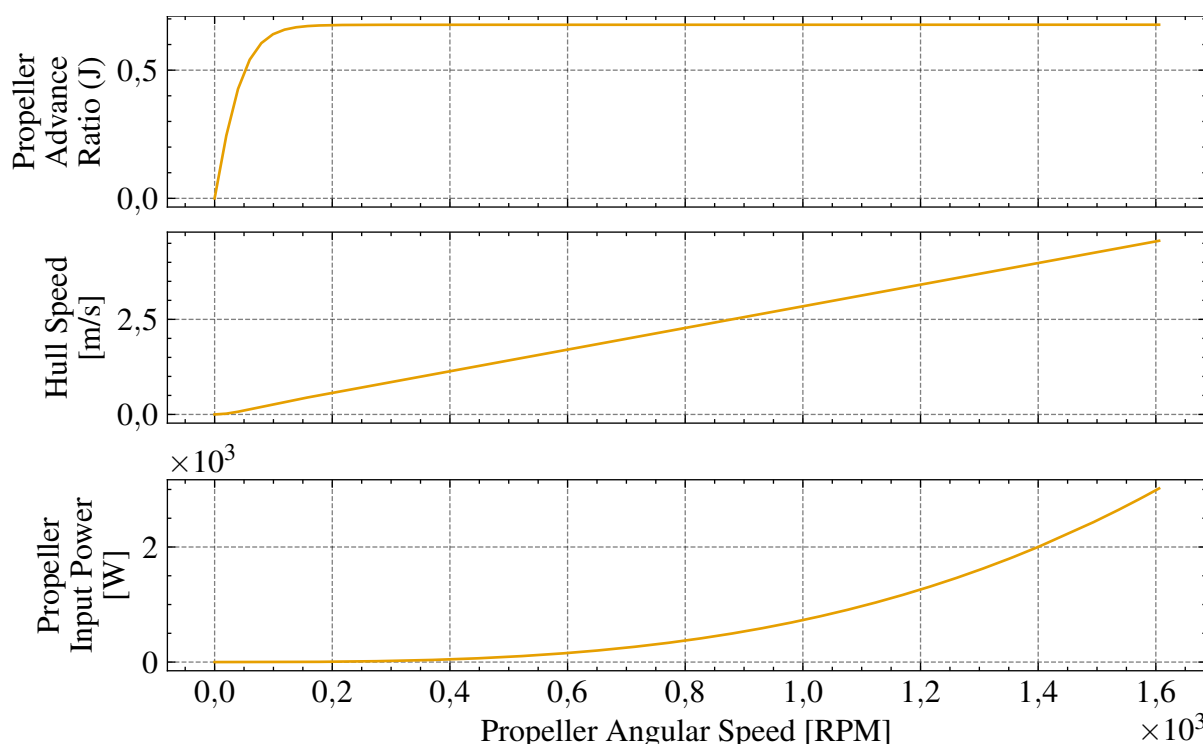
Figura 84 – Mapa de eficiência da hélice em água livre (*open-water*)



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Mapa de eficiência da hélice em água livre (*open-water*) em função da razão de avanço  $J$  e do coeficiente de potência  $C_p$ . A escala de cores representa  $\eta_0$ , permitindo localizar regiões de maior eficiência para seleção do ponto de operação.

Figura 85 – Pontos de operação em função do RPM da hélice



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Pontos de operação da hélice em função da rotação (RPM). São apresentados a razão de avanço  $J$ , a potência de entrada na hélice (W) e a velocidade do casco (m/s).

$$p_{bus,err} = v_{Batt} \dot{v}_{bus,err}, \quad (8.6)$$

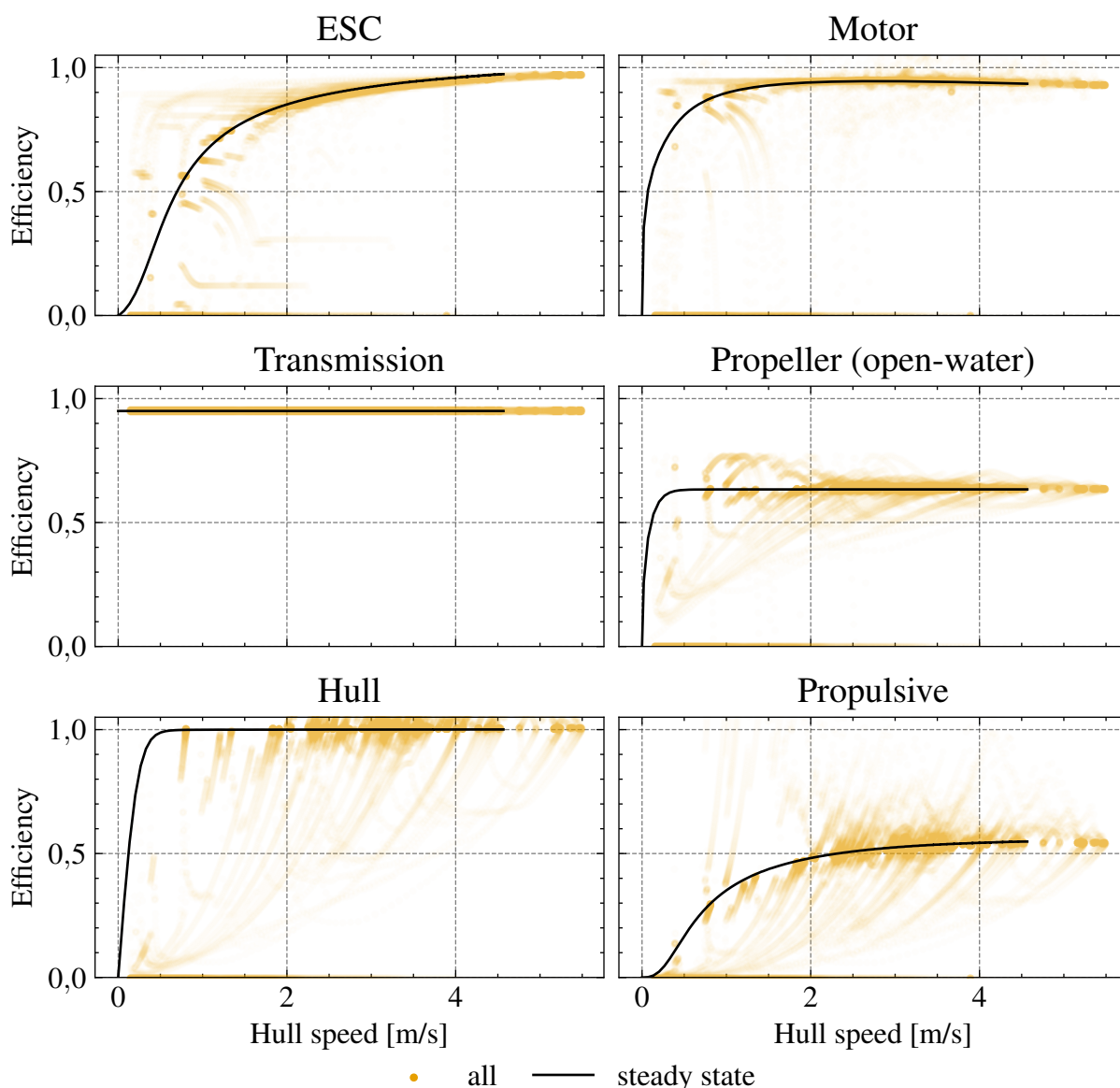
$$p_{bus,err,rel} = \frac{p_{bus,err}}{\max(|p_{bus,out}|, 1)}. \quad (8.7)$$

O erro relativo resultante, em nível de erro numérico, é apresentado na Figura 87, reforçando a consistência interna do modelo *end-to-end* no que diz respeito ao fechamento dos fluxos de potência.

Em termos de desempenho, a potência elétrica demandada em função da velocidade é apresentada na Figura 88. A Figura 89 apresenta o custo energético por distância (Wh/km) em função da velocidade, evidenciando que a definição de uma velocidade de cruzeiro envolve um compromisso entre tempo de prova e gasto energético por distância. No cenário simulado, operar em velocidades mais elevadas tende a aumentar o Wh/km, de modo que o aumento de velocidade, isoladamente, não implica maior autonomia (distância percorrida para uma mesma energia disponível).

A tabela de indicadores a seguir consolida resultados numéricos de interesse estratégico. Destaca-se que, no cenário simulado, a faixa de menor consumo específico ocorre em torno de  $U = 1,36 \text{ m s}^{-1}$  e o consumo mínimo estimado é de  $13,32 \text{ W h km}^{-1}$ , enquanto o envelope máximo reportado atinge  $U = 5,18 \text{ m s}^{-1}$  com potência elétrica aproximada de  $5,87672 \times 10^3 \text{ W}$ .

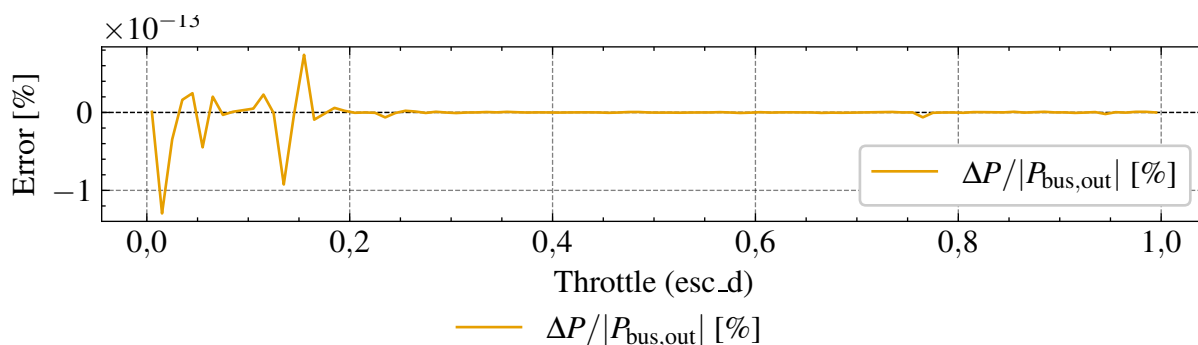
Figura 86 – Eficiência do sistema em função da velocidade



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Eficiência global e eficiência de subsistemas em função da velocidade do casco (m/s). A curva de regime permanente é contrastada com amostras dinâmicas.

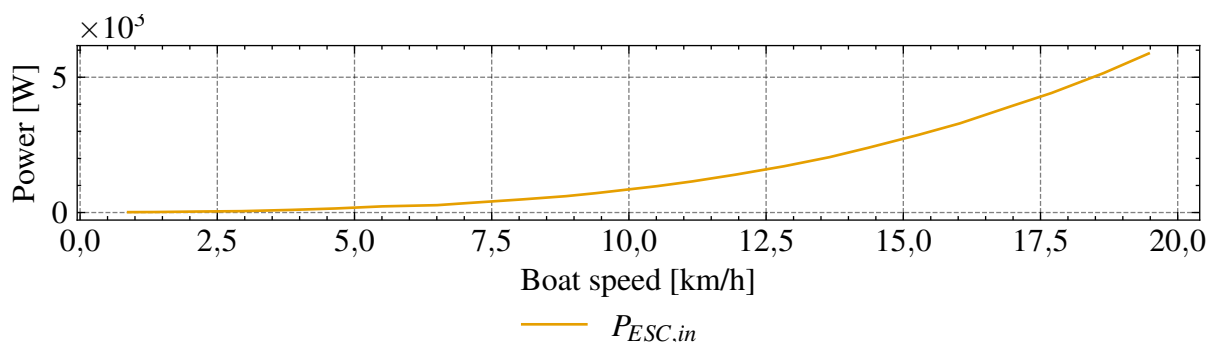
Figura 87 – Erro de fechamento do balanço de potência em função do comando de aceleração (throttle)



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Erro relativo de fechamento do balanço de potência no barramento CC em função do comando de aceleração (throttle,  $D_{ESC}$ ). O eixo vertical mostra  $\Delta P / |P_{bus,out}|$  em porcentagem, com valores próximos de zero indicando consistência numérica do modelo.

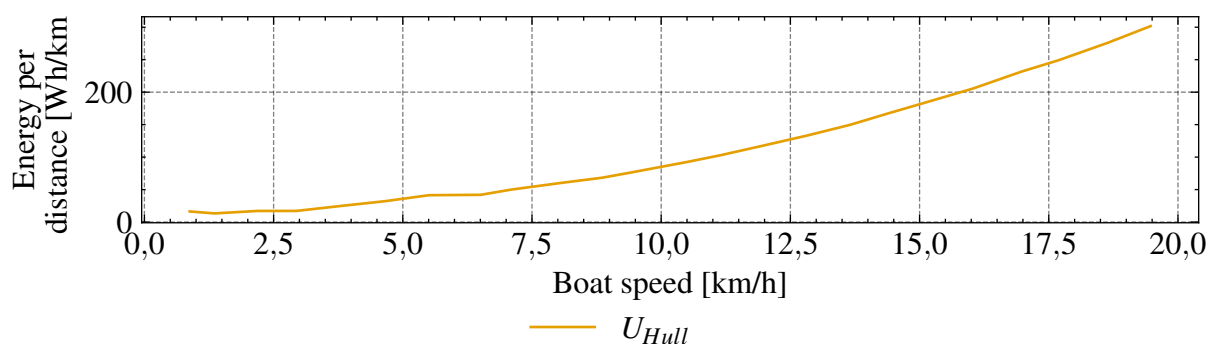
**Figura 88 – Potência elétrica em função da velocidade da embarcação**



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Potência elétrica requerida no ESC em função da velocidade da embarcação. O eixo horizontal apresenta a velocidade (km/h) e o vertical a potência (W).

**Figura 89 – Consumo (Wh/km) em função da velocidade da embarcação**



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Consumo específico de energia (Wh/km) em função da velocidade da embarcação (km/h).

**Tabela 14 – Indicadores de desempenho do modelo da embarcação solar**

U_opt_range_mps	Wh_per_km_opt	P_elec_opt_W	U_max_mps	P_elec_max_W
1,36	13,32	18,12	19,47	5876,72

Fonte: Elaboração Própria (2026).

As Figuras 90 e 91 apresentam a decomposição de eficiências sob o ponto de vista do ponto de operação da hélice (RPM) e do controle do piloto (*throttle*). Observa-se que as curvas têm forma muito semelhante, e que alguns subsistemas permanecem aproximadamente constantes no intervalo avaliado (por exemplo, transmissão, PV, e MPPT), o que é compatível com modelagens simplificadas adotadas para esses blocos.

Figura 90 – Eficiência do sistema da embarcação solar em função do RPM da hélice

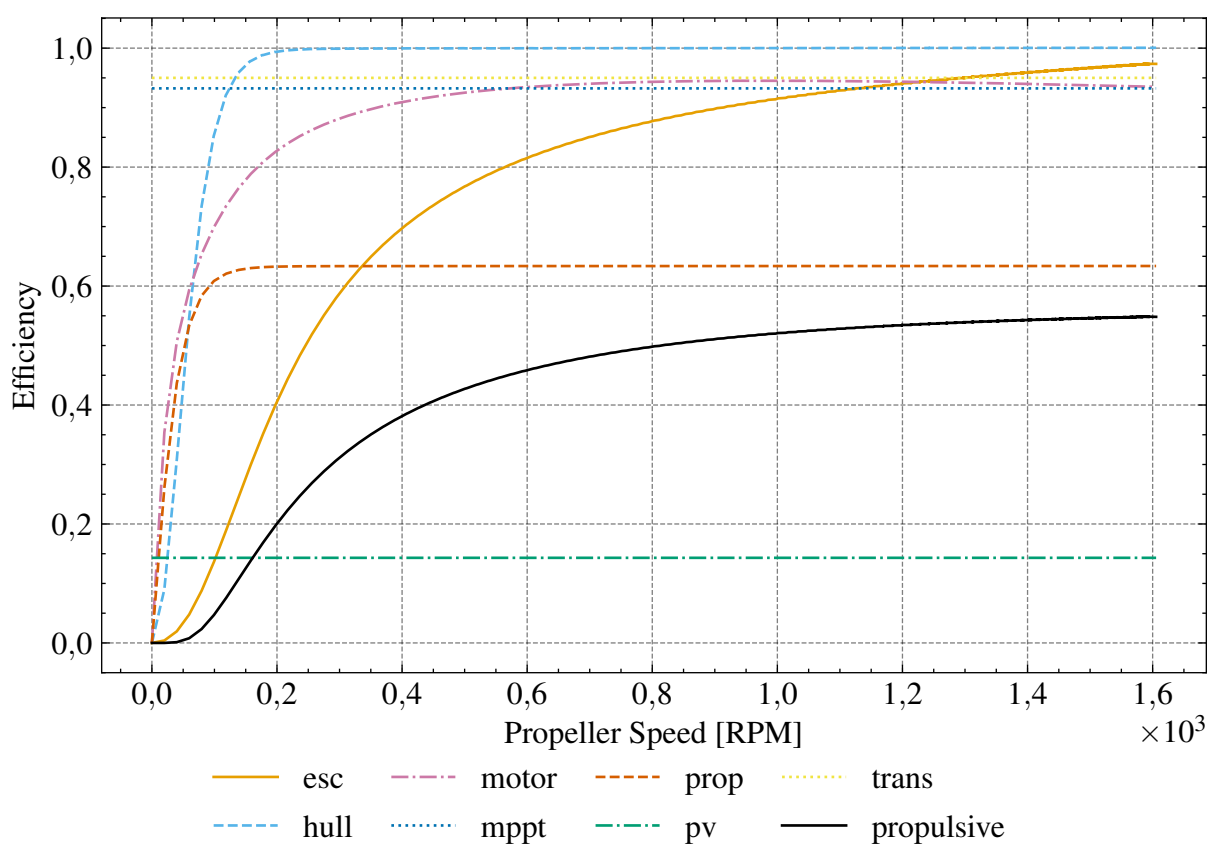
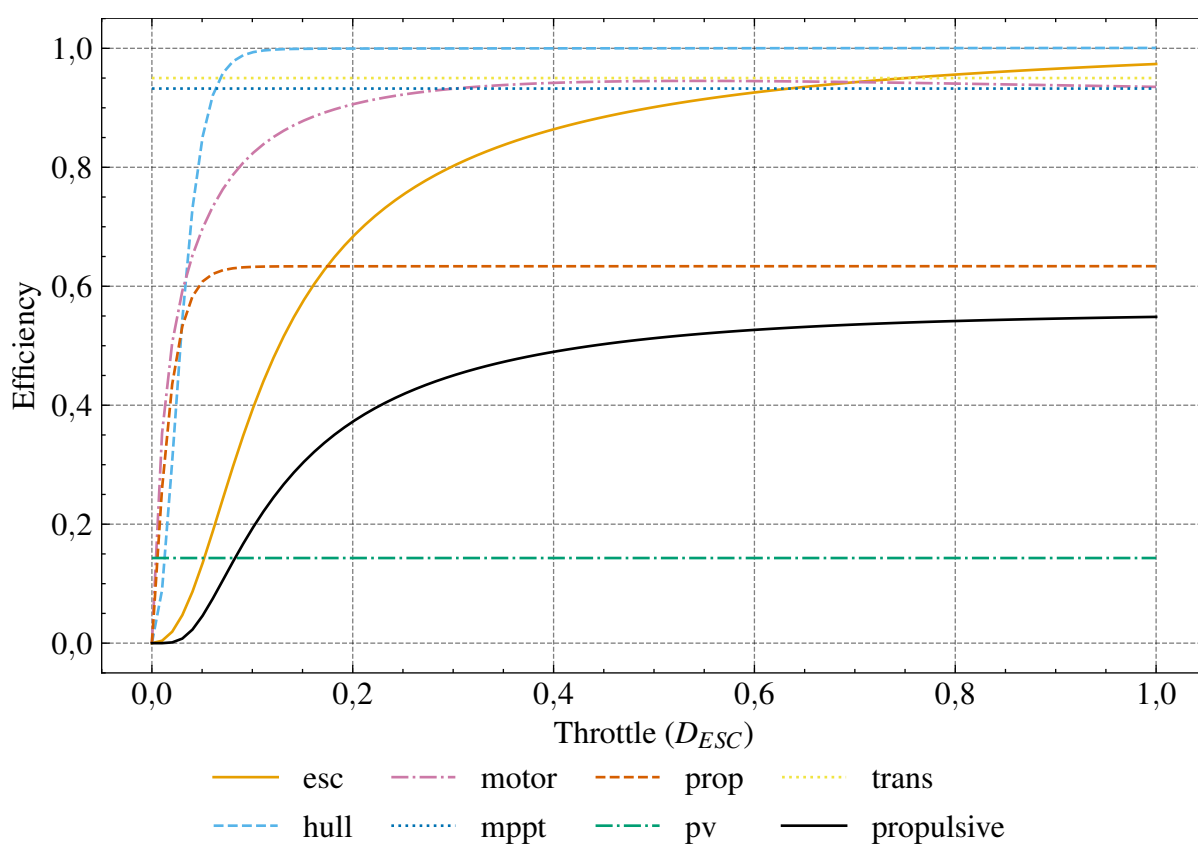


Figura 91 – Eficiência do sistema da embarcação solar em função do comando de aceleração (*throttle*)



## 8.2 Estudo de caso

Este estudo de caso demonstra a aplicabilidade do modelo como ferramenta de apoio à decisão: a partir de um conjunto de alternativas de projeto, comparam-se configurações de hélice, e transmissão e discute-se o compromisso entre desempenho em provas do tipo *sprint* (velocidade máxima) e provas de eficiência energética (*endurance*), por meio do consumo específico (Wh/km).

Em termos computacionais, o procedimento é composto por duas etapas. Na primeira, executa-se uma otimização multiobjetivo (NSGA-II) em que se busca, de forma simultânea, maximizar o desempenho em *sprint* e em *endurance*. A prova de *sprint* é simulada com irradiância fixa ( $G_{PV} = 600 \text{ W m}^{-2}$ ) e duração máxima de 300 s, sendo considerada concluída quando a distância percorrida atinge 240 m; a métrica associada é a velocidade média, calculada como a razão entre a distância, e o tempo de conclusão. A prova de *endurance* é simulada por 5 h e avaliada em quatro cenários de irradiância constante ( $G_{PV} \in \{200, 400, 600, 800\} \text{ W m}^{-2}$ ), com combinação por média ponderada das distâncias obtidas em cada cenário.

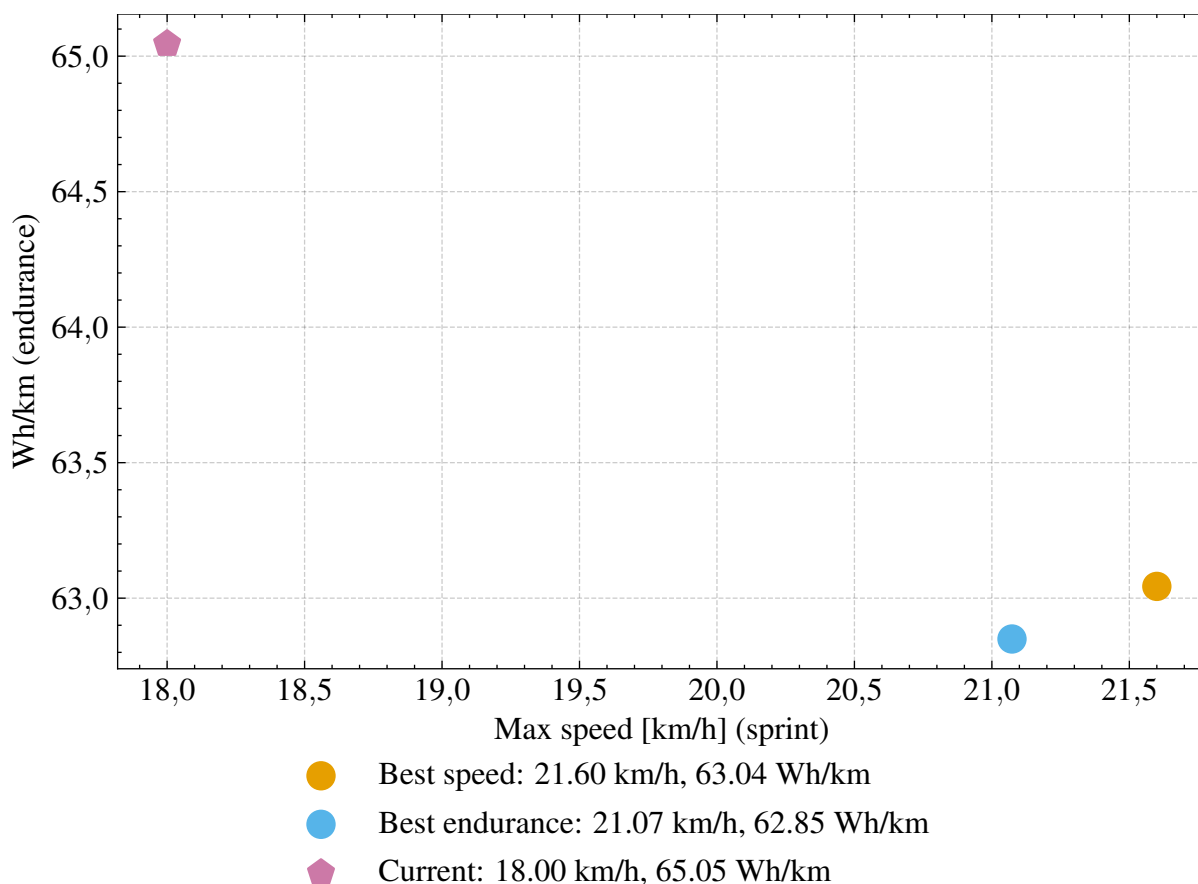
Nas variáveis de controle, estão incluídos a razão de transmissão ( $k_{tr}$ ), o *duty-cycle* do ESC na *endurance* ( $d_{end}$ ) e duas hélices (uma para *sprint* e outra para *endurance*), parametrizados por diâmetro ( $D$ ), e razão ( $P/D$ ). As restrições impostas ao otimizador garantem viabilidade energética e mecânica no modelo: manter o estado de carga mínimo da bateria acima de 10% e respeitar o limite de torque do motor de 30 N m, tanto no *sprint* quanto em cada cenário da *endurance*. A segunda etapa consiste em reavaliar soluções representativas por meio das métricas apresentadas a seguir, para comparação com a configuração atual.

A Figura 92 organiza as alternativas avaliadas no plano *velocidade máxima vs Wh/km*. O conjunto de pontos permite identificar os trade-offs entre os objetivos (fronteira de Pareto) e selecionar configurações representativas para comparação. No conjunto avaliado pelo modelo, há alternativas que apresentam simultaneamente menor Wh/km e maior velocidade máxima do que a configuração atual (*Current*), o que indica potencial de melhoria por ajuste do acoplamento motor-hélice-transmissão.

A Tabela 15 resume três opções: *Current*, *Best Wh/km*, e *Best max speed*. Os resultados quantificam o ganho relativo entre as alternativas e tornam explícitas as variáveis de decisão envolvidas, como a relação de transmissão ("trans\_k") e a geometria da hélice ("prop\_D", "prop\_P").

Ao comparar *Current* e *Best Wh/km*, observa-se redução de 65,05 para 62,85 Wh/km e aumento de 18,00 para 21,07 km/h na velocidade máxima, além de aumento de "propulsive\_eta" (0,50 para 0,56) e redução de "motor\_q\_load\_max" (3,38 para 3,09 Nm). A alternativa *Best max speed* atinge 21,60 km/h com Wh/km =

Figura 92 – Comparação das soluções: velocidade máxima versus consumo (Wh/km)



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Diagrama de compromisso entre velocidade máxima (km/h) e consumo específico (Wh/km) para as soluções avaliadas, com pontos rotulados para a condição atual, melhor velocidade e melhor autonomia.

63,04, evidenciando um compromisso em que a melhoria em *sprint* é acompanhada por um aumento moderado de consumo específico.

Tabela 15 – Resumo comparativo das opções de hélice/transmissão

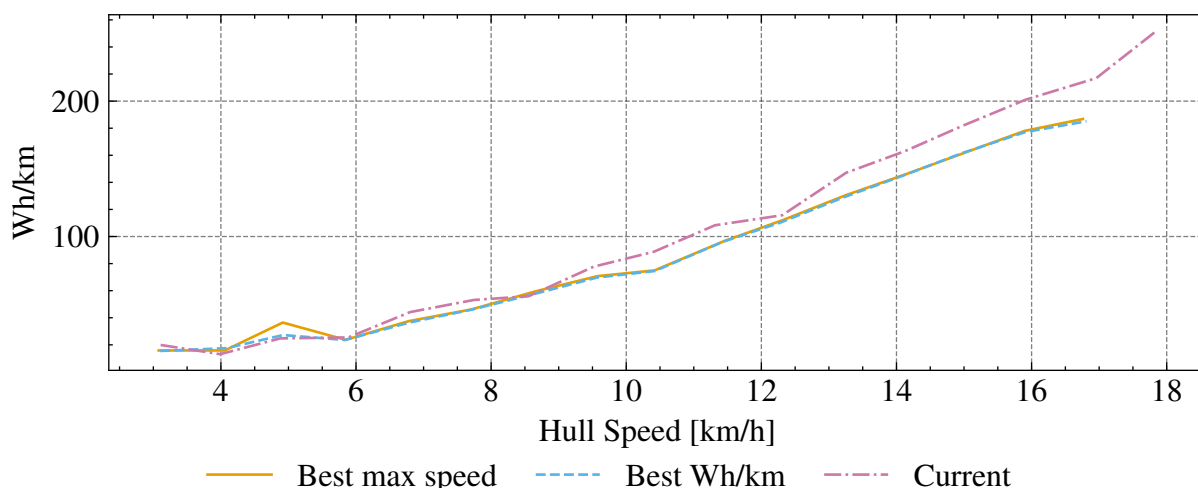
-	Current	Best Wh/km	Best max speed
trans_k [-]	0,64	0,48	0,51
esc_d_endurance [%]	40,01	43,97	43,97
prop_D [in]	9,00	11,22	10,90
prop_P [in]	10,50	10,37	9,90
P/D [-]	1,17	0,92	0,91
Wh/km	65,05	62,85	63,04
propulsive_eta [-]	0,50	0,56	0,55
motor_q_load_max [Nm]	3,38	3,09	3,09
prop_w [RPM]	849,60	709,16	748,50
endurance hull_u [km/h]	8,70	9,03	9,00
max speed [km/h]	18,00	21,07	21,60
endurance distance [km]	42,44	44,06	43,93

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 93 compara Wh/km em função da velocidade do casco para as três

configurações. A tendência observada é o crescimento de Wh/km com a velocidade, e o deslocamento das curvas ilustra como mudanças em hélice e transmissão alteram o custo energético para atingir uma determinada velocidade.

**Figura 93 – Consumo (Wh/km) em função da velocidade (mediana por faixas)**

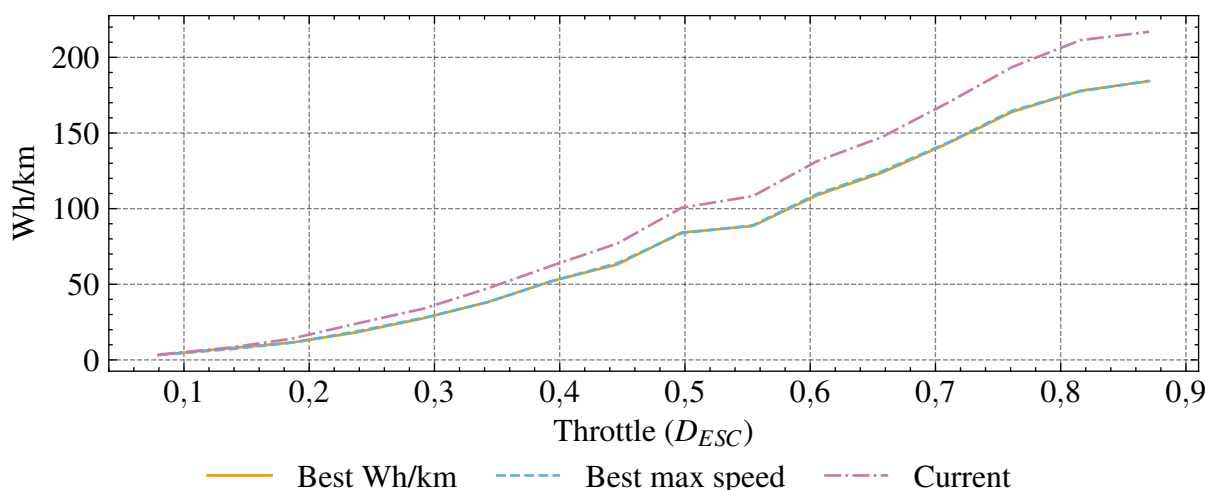


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Consumo específico (Wh/km) em função da velocidade do casco (km/h), com mediana por faixas. São indicadas as soluções de melhor autonomia, melhor velocidade e a condição atual, facilitando a comparação de desempenho energético.

A Figura 94 apresenta o mesmo indicador em função do comando do piloto (*throttle*), permitindo interpretar, do ponto de vista operacional, como diferentes configurações mudam o custo energético ao elevar a demanda de potência.

**Figura 94 – Consumo (Wh/km) em função do comando de aceleração (*throttle*), mediana por faixas**



Fonte: Elaboração Própria (2026).

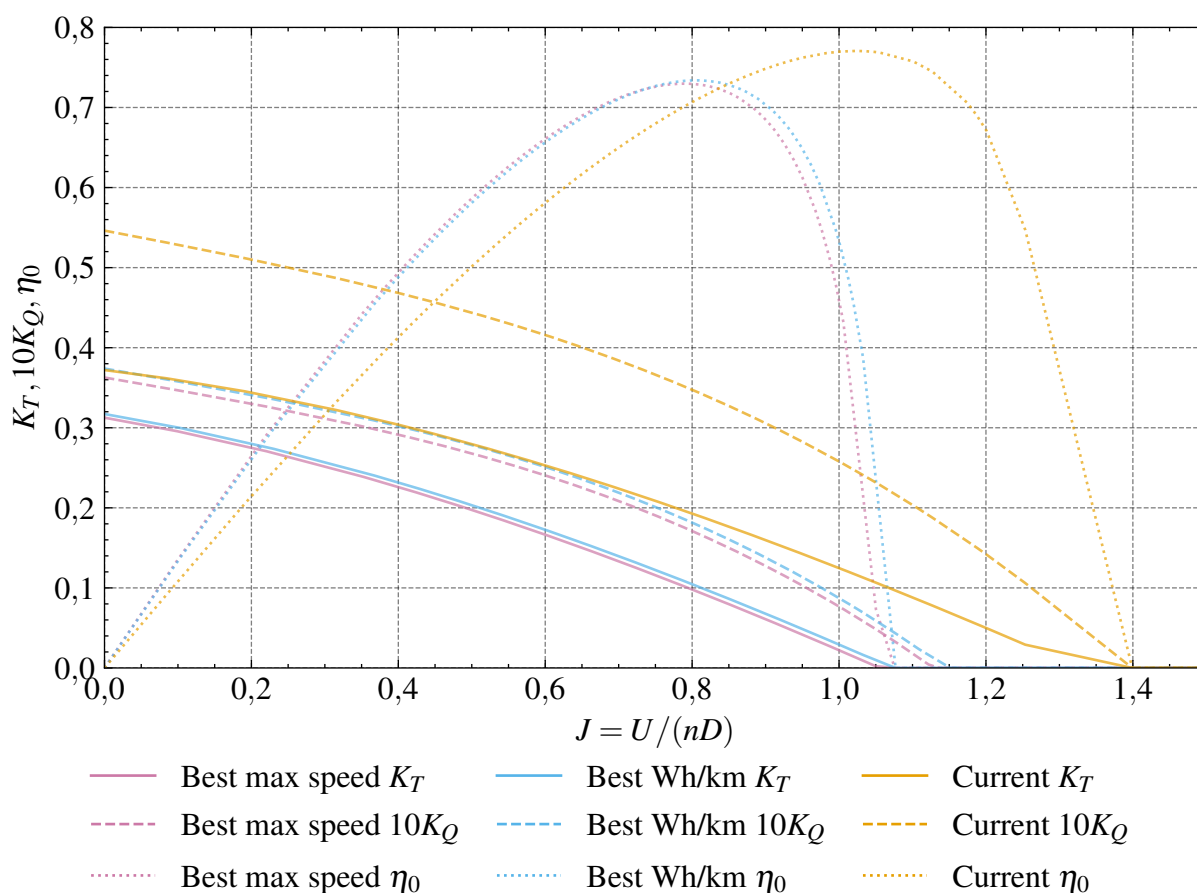
Legenda: Consumo específico (Wh/km) em função do comando de aceleração (*throttle*,  $D_{ESC}$ ), com mediana por faixas operacionais. A figura indica as condições de melhor autonomia, melhor velocidade e a condição atual para comparação direta do regime de comando.

A Figura 95 compara as curvas *open-water* das três hélices selecionadas. As diferenças em  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $\eta_0$  ao longo de  $J$  ajudam a explicar por que a geometria da hélice pode reduzir o consumo específico e/ou elevar a velocidade máxima no modelo.

Pode-se notar que as soluções melhores que a atual trazem a região de maior eficiência para  $J$  menores, fazendo com que o ponto de operação para as situações analisadas tenha melhor eficiência.

É importante destacar que  $\eta_0$  é uma eficiência em água livre e, portanto, não determina isoladamente o desempenho do sistema instalado. A discussão deve ser feita em conjunto com as curvas de Wh/km e com a eficiência propulsiva agregada reportada na tabela.

**Figura 95 – Curva clássica de desempenho da hélice em água livre (*open-water*)**



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Legenda: Curvas em água livre (*open-water*) com  $K_T$ ,  $10K_Q$  e eficiência  $\eta_0$  em função da razão de avanço  $J = U/(nD)$ . As marcações indicam os pontos correspondentes às soluções de melhor velocidade, melhor autonomia e condição atual, evidenciando o impacto da seleção da hélice.

Os resultados do estudo de caso sugerem que o modelo pode apoiar decisões estratégicas durante a competição ao comparar alternativas e explicitar compromissos entre objetivos. As conclusões, entretanto, são condicionadas ao cenário de simulação e às hipóteses de modelagem adotadas; a robustez das soluções frente às variações ambientais e incertezas de parâmetros, assim como considerações práticas do projeto mecânico estrutural, além da fabricação, devem ser avaliadas em trabalhos futuros.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho partiu do problema de pesquisa apresentado no Capítulo 1: investigar se os dados disponíveis dos diversos sistemas da embarcação permitem construir um modelo simulável e atualizável que represente seu comportamento e seja útil como ferramenta de estudo e apoio às decisões estratégicas.

Ao longo dele, foram reunidos dados de diversas fontes (medições do sistema, ensaios de laboratório, folhas de dados, dados de terceiros, etc.), construídos modelos de baixa fidelidade por subsistema, estimados parâmetros, e integrados os modelos em um modelo unificado. Os resultados do Capítulo 8 mostram que esse modelo consegue produzir métricas de interesse (como Wh/km, velocidade máxima estimada e decomposição de eficiências), que detalham a dinâmica do sistema, e organizar relações físicas relevantes para o entendimento e planejamento do sistema, ainda que existam limitações de dados, considerações e decisões simplificadas.

### 9.1 Síntese dos resultados

O resultado central do trabalho é a implementação de um modelo unificado e simulável da embarcação, construído a partir de modelos de baixa fidelidade dos principais componentes e acoplamentos. Esse modelo permite explorar relações entre variáveis do sistema de potência e conectar métricas de desempenho com regimes de operação (por exemplo, faixas de velocidade, e comando associadas à maior eficiência).

Como demonstração prática de uso para tomada de decisão, o estudo de caso da seção 8.2 avaliou alternativas para o conjunto hélice e transmissão com métricas multiobjetivo, comparando uma configuração de referência (utilizada na competição de 2019/2020) com soluções selecionadas dentro das hipóteses e do cenário de simulação adotado.

### 9.2 Verificação dos objetivos

O objetivo geral — desenvolver um modelo simulável e atualizável, baseado nos dados da embarcação solar da equipe Zênite Solar, passível de reparametrização e de alterações nos modelos com novos dados ao longo dos anos, útil para estudo, pesquisa, e decisões estratégicas — foi atendido no sentido de que o trabalho produziu um modelo unificado parametrizado e uma metodologia que viabiliza sua reparametrização e sua evolução com novos dados. Além disso, o modelo sintetiza o comportamento do sistema e gera indicadores diretamente aplicáveis a planejamento e comparação de alternativas.

Em relação aos objetivos específicos:

- a) **Descrever a embarcação solar e identificar seus componentes:** foi atendido pela caracterização do sistema e pela definição de subsistemas e sinais, que orientaram a modelagem, e a integração.
- b) **Criar modelos simuláveis de baixa fidelidade para cada componente:** foi atendido pela construção de modelos para geração, armazenamento, cargas, e propulsão, além dos acoplamentos necessários para compor o modelo unificado.
- c) **Avaliar o funcionamento do modelo por comparação com os dados:** foi atendido pela validação do modelo com dados coletados e pela análise de consistência física e fechamento do balanço de potência, discutidos no Capítulo 8. Ao mesmo tempo, a avaliação evidenciou limites de identificabilidade em alguns subsistemas quando a instrumentação é insuficiente ou quando variáveis são estimadas indiretamente.
- d) **Estruturar, documentar, e disponibilizar um *pipeline* aberto e reprodutível para a telemetria da embarcação:** foi atendido pela descrição, implementação, e disponibilização do *pipeline* no Capítulo 4.
- e) **Publicar dados brutos, códigos, e documentação em formato aberto (*open-source*):** foi atendido pela organização e disponibilização do material do projeto, descritas no Capítulo 4 (CARDOSO; BATISTA; MILAR, 2026; CARDOSO, 2026a; CARDOSO, 2026b).

### 9.3 Limitações

Os principais limites identificados durante o trabalho estão associados à qualidade e disponibilidade dos dados. Nem todos os sinais necessários para validação direta de todos os modelos estavam disponíveis com precisão adequada, o que motivou o uso de estimativas e representações indiretas em partes do sistema, como por exemplo, utilizar a velocidade da embarcação de 2022 para estimar o sinal de velocidade da embarcação de 2019/2020. Por esses motivos, a atualização de um subsistema possivelmente pode necessitar a reparametrização de outros subsistemas, o que pode ser feito seguindo a mesma abordagem deste trabalho.

Mesmo quando métricas de erro e resíduos são baixos em determinadas saídas, isso não garante que os parâmetros identificados sejam únicos ou fisicamente interpretáveis ou mesmo realistas: alterações em hipóteses do modelo podem levar a soluções numéricas diferentes com desempenho semelhante, indicando limitações de identificabilidade com o conjunto de dados considerado.

O modelo também abstrai aspectos do ambiente externo e foca no sistema interno da embarcação. Efeitos como vento, ondas, correntes, manobras, e a dinâmica

completa no espaço não foram incorporados, o que restringe o uso do modelo para planejamento e análise comparativa em cenários controlados, e não para predição detalhada de uma navegação completa.

#### 9.4 Trabalhos futuros

Como continuidade natural, destacam-se direções de evolução em instrumentação, modelagem, rastreabilidade, e aplicação do simulador:

- **Confiabilidade de tempo na aquisição:** incorporar um *real-time clock* (RTC) no sistema embarcado de aquisição para melhorar a consistência de *timestamps*, especialmente em cenários sem sincronização externa;
- **Instrumentação:** incrementar a quantidade de sensoriamento, priorizando variáveis que hoje são inferidas indiretamente e que impactam a identificabilidade de parâmetros;
- **Qualidade de sinais:** melhorar a qualidade e o condicionamento dos sinais medidos (ruído, resolução, filtragem, e calibração), reduzindo a incerteza na validação dos modelos;
- **Rastreabilidade de versões:** incluir, em mensagens periódicas na telemetria, um identificador de versão do *software*, como um prefixo do *commit* (*hash*) do *git*, permitindo associar logs a uma versão exata do *firmware*;
- **Modelos e fidelidade:** desenvolver modelos mais fiéis para subsistemas onde as hipóteses simplificadoras mais afetam as métricas de interesse;
- **Evolução anual do modelo:** a cada ano, parametrizar novamente a embarcação com os dados extraídos e manter um histórico de parâmetros e desempenho do modelo;
- **Gestão de dados:** estudar e desenvolver uma camada de gestão de dados que permita acesso facilitado, padronização de formatos, e melhor reprodutibilidade das análises;
- **Navegação e dinâmica no espaço:** integrar GPS, giroscópio, bússola e acelerômetro, assim como a direção elétrica na rede CAN, e criar um modelo dinâmico de posição e movimento, permitindo o estudo de rotas, e missões;
- **Simulação da competição:** desenvolver um modelo de simulação da competição seguindo as regras e simular embarcações utilizando este trabalho (ou derivados), permitindo comparar estratégias, e configurações em cenários coerentes;

- **Análise de falhas em tempo real:** desenvolver um sistema de diagnóstico baseado nos sinais disponíveis na rede CAN, combinando o *status* dos módulos CAN e as medições telemetrizadas para detectar falhas, degradações, e condições anômalas durante a operação;
- **Digital twin:** transformar o modelo em um observador que utiliza sinais recebidos por telemetria para estimar estados internos em tempo quase real, apoiando decisões estratégicas durante as competições;
- **Geração e MPPT:** aprimorar os modelos do subsistema de geração (painéis e MPPTs) e estudar o impacto dessas escolhas no desempenho global do sistema.

## 9.5 Conclusão

O trabalho atendeu ao objetivo geral de desenvolver um modelo simulável e atualizável da embarcação solar da equipe Zênite Solar, passível de reparametrização com novos dados ao longo dos anos. Para isso, foram descritos o objeto de estudo e seus componentes, estruturado um *pipeline* aberto e reprodutível de dados, construídos e parametrizados modelos de baixa fidelidade para geração, armazenamento, cargas e propulsão, e integrado um modelo unificado. Esse modelo foi avaliado quantitativamente com dados reais da competição e aplicado em um estudo de caso de decisão do conjunto hélice-transmissão em cenário controlado.

Ao disponibilizar abertamente os dados brutos (CARDOSO; BATISTA; MILAR, 2026), bem como códigos e documentação (CARDOSO, 2026a; CARDOSO, 2026b), este trabalho busca fortalecer a colaboração técnica entre a equipe Zênite Solar e a comunidade do Desafio Solar Brasil, reduzindo barreiras de entrada para que outras equipes possam reproduzir, estudar, e evoluir as soluções aqui apresentadas. Além do impacto direto no contexto das competições, a criação de ferramentas abertas para estudo, simulação, e otimização de sistemas de propulsão elétrica e geração fotovoltaica contribui para o processo de maturação de tecnologias de transporte de baixo carbono. Nesse sentido, o valor deste trabalho ultrapassa a aplicação em uma embarcação específica: ele se conecta diretamente aos crescentes esforços em sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, K. S. *et al.* Pvlb python: 2023 project update. *Journal of Open Source Software*, v. 8, n. 92, p. 5994, dez. 2023. ISSN 2475-9066. Disponível em: <<https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.05994>> .
- ATEN, S.; SCHADE, D. T.; COLELLA, K. J. Solar Splash As A Capstone Design Project. In: *1997 Annual Conference Proceedings*. Milwaukee, Wisconsin: ASEE Conferences, 1997. p. 2.365.1–2.365.10. Disponível em: <<http://peer.asee.org/6788>> .
- BARNITSAS, M. M.; RAY, D.; KINLEY, P. *Kt, Kq and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers*. [S.l.], 1981. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/2027.42/91702>> .
- BERJOZA, D.; JURGENA, I.; OSADCUKS, V. Energy consumption by solar-powered watercraft at various speed settings. In: *20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. [s.n.], 2021. Disponível em: <<http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF380.pdf>> .
- BIRK, L. *Fundamentals of Ship Hydrodynamics: Fluid Mechanics, Ship Resistance and Propulsion*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd, 2019. ISBN 978-1-118-85548-5 978-1-119-19157-5 978-1-118-85551-5 978-1-118-85555-3.
- BLANK, J.; DEB, K. Pymoo: Multi-objective optimization in python. *IEEE access : practical innovations, open solutions*, v. 8, p. 89497–89509, 2020.
- BOTERO, E. M. *et al.* SUAVE: An Open-Source Environment for Conceptual Vehicle Design and Optimization. In: *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. San Diego, California, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016. ISBN 978-1-62410-393-3. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2016-1275>> .
- CANopen Monitor Contributors. *CANopen Monitor*. 2024. Disponível em: <<https://github.com/oresat/CANopen-monitor>> .
- CANopenNode Contributors. *CANopenNode: CANopen Protocol Stack*. 2026. Disponível em: <<https://github.com/CANopenNode/CANopenNode>> .
- CANopenTerm Project. *CANopenTerm: CANopen Analysis and Configuration Tool*. 2025. Disponível em: <<https://canopenterm.de/>> .
- CARDOSO, J. A. *Solarboat\_data\_pipeline*. 2026. Disponível em: <[https://github.com/joaoantoniocardoso/solarboat\\_data\\_pipeline](https://github.com/joaoantoniocardoso/solarboat_data_pipeline)> .
- CARDOSO, J. A. *Solarboat\_model*. 2026. Disponível em: <[https://github.com/joaoantoniocardoso/solarboat\\_model](https://github.com/joaoantoniocardoso/solarboat_model)> .
- CARDOSO, J. A.; BATISTA, F. A. B.; MILAR, A. P. *Raw CAN Bus Logs from the Zênite Solar Boat Project (2019–2020)*. Zenodo, 2026. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.18371239>> .
- CARDOSO, V. *Api-Telemetria*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/api-telemetria>> .

CARDOSO, V. *Data-to-Cloud-Telemetry*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/data-to-cloud-telemetry>>.

CARDOSO, V. *Save-Can-Data-Telemetry*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/save-can-data-telemetry>>.

CARDOSO, V. *Webapp-Telemetry*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/webapp-telemetry>>.

CARLTON, J. (Ed.). *Marine Propellers and Propulsion*. 2nd ed. ed. Oxford Boston: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-08-054923-1.

CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. Fifth edition. New York, NY: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-0-07-748160-5.

CHOI, J.-K. *et al.* A Development of EPISODE Solar Boat. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, v. 44, n. 6, p. 635–646, dez. 2007. ISSN 1225-1143. Disponível em: <<http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=DHJSCN&py=2007&vnc=v44n6&sp=635>>.

de Castro Nóbrega, J. C.; ROSSLING, A. Development of Solar Powered Boat for Maximum Energy Efficiency. *Renewable Energy and Power Quality*, p. 302–307, abr. 2012. ISSN 2172038X, 2172038X. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/icrepq'12/299-nobrega.pdf>>.

(DECEASED), J. A. D.; BECKMAN, W. A.; BLAIR, N. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. 1. ed. Wiley, 2020. ISBN 978-1-119-54028-1 978-1-119-54032-8. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119540328>>.

DESAFIO Solar Brasil - Equipe Zênite. 2023. Disponível em: <<https://desafiosolar.com.br/equipe-zenite/>>.

DESAFIO Solar Brasil - Equipes. 2023. Disponível em: <<https://desafiosolar.com.br/equipes-2/>>.

DESAFIO Solar Brasil - Release DSB2017. 2017. Disponível em: <<https://desafiosolar.com.br/release-dsb2017/>>.

Embedded Office GmbH & Co. KG. *CANopen Standardized Architecture - CANopen Stack*. 2024. Disponível em: <<https://canopen-stack.org/v4.4/usage/architecture/>>.

EMERY, K. *Uncertainty Analysis of Certified Photovoltaic Measurements at the National Renewable Energy Laboratory*. [S.l.], 2009. NREL/TP-520-45299, 964609 p. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/964609-xeByG7/>>.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIĆ, D. *Fundamentals of Power Electronics*. Third edition. Cham: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-43881-4.

European Union-Copernicus Marine Service. *Multi Observation Global Ocean Sea Surface Salinity and Sea Surface Density*. Mercator Ocean International, 2020. Disponível em: <[https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/MULTIOBS\\_GLO\\_PHY\\_S\\_SURFACE\\_MYNRT\\_015\\_013/INFORMATION](https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/MULTIOBS_GLO_PHY_S_SURFACE_MYNRT_015_013/INFORMATION)>.

FULLER, S. *et al.* The python control systems library (python-control). In: *60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.]: IEEE, 2021. p. 4875–4881.

GÖKSU, B.; YÜKSEL, O. Impacts of the Form Design and Operational Factors on the Energy Consumption of a Solar-Powered Boat: A System Dynamics Approach. *Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences*, v. 9, n. 2, p. 66–81, dez. 2023. ISSN 2564-7016. Disponível em: <<http://dergipark.org.tr/en/doi/10.52998/trjmms.1272543>>.

GORTER, T. *Performance Evaluation of Photovoltaic Boats in an Early Design Stage : Numerical Simulation with Industrial Design Engineering Methods*. Tese (Doutorado) — University of Twente, Enschede, The Netherlands, abr. 2014. Disponível em: <<http://purl.org/utwente/doi/10.3990/1.9789036536431>>.

GORTER, T. Design Considerations of a Solar Racing Boat: Propeller Design Parameters as a Result of PV System Power. *Energy Procedia*, v. 75, p. 1901–1906, ago. 2015. ISSN 18766102. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215009479>>.

GORTER, T. *et al.* Scenario-based simulation of PV boats in an early design stage. In: *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Tampa, FL, USA: IEEE, 2013. p. 0769–0774. ISBN 978-1-4799-3299-3 978-1-4799-3298-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6744262/>>.

GORTER, T.; REINDERS, A.; HOUTEN, F. V. A New Approach in Numerical Simulation of PV Systems for PV Boats. *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4294-4299*, WIP, p. 6 pages, 5966 kb, 2012. Disponível em: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=15903>>.

GORTER, T. *et al.* Design Evaluation of 150 PV Boats. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4038-4043*, WIP, p. 6 pages, 3412 kb, 2011. Disponível em: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=11340>>.

GORTER, T. *et al.* PV system data analysis of a PV-powered racing boat during the Frisian Solar Challenge 2010. In: *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Austin, TX, USA: IEEE, 2012. p. 003316–003321. ISBN 978-1-4673-0066-7 978-1-4673-0064-3 978-1-4673-0065-0. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6318283/>>.

GORTER, T. *et al.* PV-Boats: Design Issues in the Realization of PV Powered Boats. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, WIP-Munich, v. 6-10 September 2010, p. 8 pages, 9186 kb, 2010. Disponível em: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=7322>>.

HERMAN, J.; USHER, W. SALib: An open-source python library for sensitivity analysis. *The Journal of Open Source Software*, The Open Journal, v. 2, n. 9, jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.21105/joss.00097>>.

HOUTEN, F. J. A. M. V. *et al.* Monitored PV System Data Analysis of PV-Powered Racing Boat during the Dong Energy Solar Challenge 2012. In: *Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2012)*. [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=15909>>.

IEA. *Net Zero by 2050*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>.

Isaac Rodriguez. *The Factory Method Pattern and Its Implementation in Python*. 2019. Disponível em: <<https://realpython.com/factory-method-python/>>.

IXYS (Littelfuse). *DSEI2x101-12A Fast Recovery Epitaxial Diode Datasheet*. IXYS Integrated Circuits Division (now Littelfuse), 2025. Disponível em: <<https://docs.rs-online.com/5560/0900766b8140278e.pdf>>.

Jinko Solar. *US-MKT-250-270P-B*. 2015. Disponível em: <[https://solarproof.com.au/datasheets/panel\\_datasheet\\_rtuww6HPOwkN5GioPnbS3aGac4cltSuJ8zsfhFHY.pdf](https://solarproof.com.au/datasheets/panel_datasheet_rtuww6HPOwkN5GioPnbS3aGac4cltSuJ8zsfhFHY.pdf)>.

Jinko Solar. *JKM270P-60-B*. jinkosolar.us, 2019. Disponível em: <<https://jinkosolar.us/wp-content/uploads/2019/03/US-MKT-250-270P-B.pdf>>.

KAPUŚCIK, W. *et al.* AGH Solar Boat –the analysis of energy and ecological parameters of the solar powered boat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019.

KIMBALL, R.; CASERTA, J. *The Data Warehouse ETL Toolkit: Practical Techniques for Extracting, Cleaning, Conforming, and Delivering Data*. Indianapolis: Wiley, 2004. ISBN 978-0-7645-6757-5.

KROON, A. *Nonlinear Optimization of Strategies: Finding an Optimal Race Strategy for the TU Delft Solar Boat*. Tese (Doutorado) — TU Delft, 2017. Disponível em: <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:db8ef89e-12e8-4eaf-9964-96e723bef5d3>>.

KURNIAWAN, A. A Review of Solar-Powered Boat Development. *IPTEK: The Journal for Technology and Science*, v. 27, 2016.

Kvaser. *CAN Bus Protocol Tutorial*. 2015. Disponível em: <<https://kvaser.com/can-protocol-tutorial/>>.

LAI, X. *et al.* Global parametric sensitivity analysis of equivalent circuit model based on Sobol' method for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, p. 126246, abr. 2021. ISSN 09596526. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621004662>>.

LEUNG, C. P.; CHENG, K. W. E. Zero emission solar-powered boat development. In: *2017 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA)*. Hong Kong: IEEE, 2017. p. 1–6. ISBN 978-1-5386-1387-0. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8277736/>>.

Littelfuse. *IXFN420N10T Power MOSFET Datasheet*. Littelfuse (formerly IXYS Corporation), 2025. Disponível em: <<https://www.littelfuse.com/products/power-semiconductors/mosfets-si-sic/n-channel-trench-gate/gen1/ixfn420n10t>>.

Ljung. *System Identification*. 2nd ed. ed. [S.l.]: Pearson India, 1998. ISBN 978-81-317-4495-6.

- MACDONALD, T. *et al.* SUAVE: An Open-Source Environment Enabling Multi-Fidelity Vehicle Optimization. In: *18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*. Denver, Colorado, USA: American Institute for Aeronautics and Astronautics, 2017. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2017-4437>>.
- MACHADO, O. J. *REGRAS DE COMPETIÇÃO 2013*. 2013.
- MACHADO, O. J. *REGRAS DE COMPETIÇÃO 2015*. 2015.
- MACHADO, O. J. *REGRAS DE COMPETIÇÃO 2016*. 2016.
- MACHADO, O. J. *REGRAS DE COMPETIÇÃO 2018*. 2018.
- MACHADO, O. J. *REGRAS DE COMPETIÇÃO 2021*. 2021.
- MAHMUD, K.; MORSALIN, S.; KHAN, M. I. Design and Fabrication of an Automated Solar Boat. *International Journal of Advanced Science and Technology*, v. 64, p. 31–42, mar. 2014. ISSN 20054238. Disponível em: <<http://article.nadiapub.com/IJAST/vol64/4.pdf>>.
- MINAK, G. Solar Energy-Powered Boats: State of the Art and Perspectives. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 8, p. 1519, jul. 2023. ISSN 2077-1312. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-1312/11/8/1519>>.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*. 2. ed. Cambridge University Press, 2017. ISBN 978-1-316-49419-6 978-1-107-14206-0. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781316494196/type/book>>.
- Motenergy. *ME0909 Brush Type DC Motor*. 2011. Disponível em: <<https://www.motenergy.com/me0909.html>>.
- NASIRUDIN, A.; CHAO, R.-M.; UTAMA, I. K. A. P. Solar Powered Boat Design Optimization. *Procedia Engineering*, v. 194, p. 260–267, 2017. ISSN 18777058. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817332940>>.
- NASIRUDIN, A. *et al.* Determination of PV Power and Battery Capacity Size for a Leisure Solar Powered Boat at Kalimas River, Surabaya, Indonesia. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, v. 17, n. 3, p. 123–129, out. 2020. ISSN 2301-9069, 1829-8370. Disponível em: <<https://ejournal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/view/31965>>.
- NORTON, R. L. *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*. Sixth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020. ISBN 978-1-260-11331-0.
- OLIVEIRA, M. A. N. de. *Análise da viabilidade de embarcações solares para transporte de passageiros*. 160 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, maio 2013. Disponível em: <[https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno\\_up//THESIS/6000229/2013\\_mestrando\\_mauricio\\_aguilar\\_nepomuceno\\_de\\_oliveira\\_20200405215808739.pdf](https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_up//THESIS/6000229/2013_mestrando_mauricio_aguilar_nepomuceno_de_oliveira_20200405215808739.pdf)>.

- OOSTERVELD, M.; OOSSANEN, P. V. Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series. *International Shipbuilding Progress*, v. 22, n. 251, p. 251–262, jul. 1975. ISSN 15662829, 0020868X. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.3233/ISP-1975-2225102>>.
- Optima. *YellowTop D35 Technical Specifications*. 2020. Disponível em: <<https://www.optimabatteries.com/products/yellowtop-d35>>.
- PARENTE, C. D. *Desenvolvimento de Um Sistema Eletrônico Para Controle de Direção Do Protótipo Náutico, Utilizando Um Atuador Eletromecânico*. 84 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/430>>.
- PEDREGOSA, F. *et al.* Scikit-learn: Machine learning in python. *CoRR*, abs/1201.0490, 2012. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1201.0490>>.
- PEHERSTORFER, B.; WILLCOX, K.; GUNZBURGER, M. Survey of Multifidelity Methods in Uncertainty Propagation, Inference, and Optimization. *SIAM Review*, v. 60, n. 3, p. 550–591, jan. 2018. ISSN 0036-1445, 1095-7200. Disponível em: <<https://epubs.siam.org/doi/10.1137/16M1082469>>.
- PLETT, G. *Battery Management Systems: Battery Modeling Volume I*. Artech House, 2015. (Artech House Power Engineering and Power Electronics, v. 1). ISBN 978-1-63081-023-8. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=M-TasgEACAAJ>>.
- REED, P. M. *et al.* *Addressing Uncertainty in Multisector Dynamics Research*. 2025. Zenodo. Disponível em: <<https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.15391962>>.
- REID, R. L.; HOEPPNER, B. D. Five Years of Solar Powered Boat Racing at Marquette University. In: *Proceedings of the 1997 Annual Conference*. Milwaukee, WI, USA: ASEE Conferences, 1997. Disponível em: <<https://peer.asee.org/6573>>.
- RESISTANCE - Prelimina. 2020. Prelimina. Disponível em: <<https://prelimina.com/resistance/>>.
- ROHATGI, A. *WebPlotDigitizer*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/automeris-io/WebPlotDigitizer>>.
- RONGÈRE, F. *Meshmagick: A Command Line Tool and Python Package to Manipulate Hydrodynamics Meshes*. École Centrale de Nantes, 2021. Disponível em: <<https://github.com/LHEEA/meshmagick>>.
- SALEM, A. A.; SEDDIEK, I. S. Techno-Economic Approach to Solar Energy Systems Onboard Marine Vehicles. *Polish Maritime Research*, v. 23, n. 3, p. 64–71, set. 2016. ISSN 2083-7429. Disponível em: <<https://www.sciendo.com/article/10.1515/pomr-2016-0033>>.
- SALTELLI, A. *et al.* *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. 1. ed. Wiley, 2007. ISBN 978-0-470-05997-5 978-0-470-72518-4. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470725184>>.

- SANTOS, H. F. L. *et al.* QUE FONTE DE DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZAR NO BRASIL? QUE INCERTEZA ESPERAR? UMA COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ABORDAGENS E VARIADAS FONTES DE DADOS. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018*, 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/754>>.
- SCHAFFRIN, C.; BENNDORF, S.; SCHNEIDER, S. THE SOLAR BOAT “KORONA”: A COMPLETE PHOTOVOLTAIC-POWERED SYSTEM. In: *Clean and Safe Energy Forever*. Elsevier, 1990. p. 359–363. ISBN 978-0-08-037193-1. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080371931500768>>.
- SCHWIMMBECK, S. *et al.* Modeling the Dynamic Behavior of 12V AGM Batteries and Its Degradation. In: *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 1–6.
- SHARMA, K.; SYAL, P. A Review on Solar Powered Boat Design. *International Research Journal on Advanced Science Hub (IRJASH)*, v. 3, n. 9S, set. 2021. Disponível em: <<https://rspsciencehub.com/index.php/journal/article/download/555/465/905>>.
- SOLCAST. *Solcast Solar Irradiance Data (-26.243602, -48.6417668)*. Solcast, 2020. Disponível em: <<https://solcast.com/>>.
- SOUSA, G.; SIMONETTI, D.; NORENA, E. Efficiency optimization of a solar boat induction motor drive. In: *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*. Rome, Italy: IEEE, 2000. v. 3, p. 1424–1430. ISBN 978-0-7803-6401-1. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/882071/>>.
- SOUSA, G. C. D. *et al.* Efficiency Optimization of a Solar Boat IM Drive Employing Variable DC Link Voltage and Fuzzy Control. *Eletrônica de Potência*, v. 8, n. 1, p. 9–15, jun. 2003. ISSN 1984-557X, 1414-8862. Disponível em: <<https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/664>>.
- Sunaryo; NURACHMAN, D. Propulsion System Analysis For Solar-Powered Electric Water Recreational. *E3S Web of Conferences*, v. 67, p. 04010, 2018. ISSN 2267-1242. Disponível em: <<https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20186704010>>.
- Sunaryo; NURACHMAN, D.; IMFIANTO, P. S. Design and calculation of mechanical system for solar-powered electric boat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 105, p. 012127, jan. 2018. ISSN 1755-1307, 1755-1315. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/105/1/012127>>.
- SUTHERLAND, J. *et al.* Implementing Value-Driven Design in Modelica for a Racing Solar Boat. In: MADNI, A. M. *et al.* (Ed.). *Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 829–844. ISBN 978-3-319-62216-3 978-3-319-62217-0. Disponível em: <[http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-62217-0\\_58](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-62217-0_58)>.
- TRENTELMAN, T. *et al.* Modelica Based Naval Architecture Library for Small Autonomous Boat Design. In: *The 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017*. [s.n.], 2017. p. 643–652. Disponível em: <[https://ep.liu.se/en/conference-article.aspx?series=ecp&issue=132&Article\\_No=71](https://ep.liu.se/en/conference-article.aspx?series=ecp&issue=132&Article_No=71)>.

Trishan Esrām. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, n. 2, p. 439–449, jun. 2007. ISSN 0885-8969. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4207429/>>.

UICKER, J. J.; PENNOCK, G. R.; SHIGLEY, J. E. *Theory of Machines and Mechanisms*. Fifth edition. New York Oxford: Oxford University Press, 2017. ISBN 978-0-19-026448-2.

United Nations. *Interagency Report for Second Global Sustainable Transport Conference | Department of Economic and Social Affairs*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/publications/interagency-report-second-global-sustainable-transport-conference>>.

Vila-Viñas, D.; CRESPO, J. M.; MARTENS, C. Open Knowledge, Decolonial, and Intercultural Approaches to Communication Technologies for Mobility: The Achuar Kara Solar Project. In: MARTENS, C.; VENEGAS, C.; TAPUY, E. F. S. S. (Ed.). *Digital Activism, Community Media, and Sustainable Communication in Latin America*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 97–123. ISBN 978-3-030-45393-0 978-3-030-45394-7. Disponível em: <[https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-45394-7\\_5](https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-45394-7_5)>.

VRIJDAG, A.; MARTELLI, M. Parameter Identification of a Model Scale Ship Drive Train. *Journal of Marine Science and Engineering*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 3, p. 268, mar. 2021. ISSN 2077-1312. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-1312/9/3/268>>.

WATER Properties Calculator. 2025. Disponível em: <<https://www.hamzasreef.com/Contents/Calculators/WaterProperties.php>>.

WENDORFF, A. *et al.* *SUAVE: An Aerospace Vehicle Environment for Designing Future Aircraft*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/suavecode/SUAVE>>.

Zenite Solar Team. *MAM17: Módulo de Acionamento Do Motor (Versão 2017)*. 2017. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MAM17>>.

Zenite Solar Team. *MCC18: Módulo Controlador de Carga (Versão 2018)*. 2018. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MCC18>>.

Zenite Solar Team. *MDE18: Módulo de Direção Elétrica (Versão 2018)*. 2018. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MDE18>>.

Zenite Solar Team. *CAN\_IDS: CAN BUS Protocol Description with Code Generation for the Solar Boat Modules and Applications*. 2019. Disponível em: <[https://github.com/ZeniteSolar/CAN\\_IDS](https://github.com/ZeniteSolar/CAN_IDS)>.

Zenite Solar Team. *MAB19: Módulo de Acionamento Das Bombas de Porão (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MAB19>>.

Zenite Solar Team. *MCB19: Módulo de Carregamento de Bateria (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MCB19>>.

Zenite Solar Team. *MCS19: Módulo de Carregamento Do Sistema (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MCS19>>.

Zenite Solar Team. *MFP19: Módulo Fonte Principal (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MFP19>>.

Zenite Solar Team. *MIC19: Módulo de Interface de Controle (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MIC19>>.

Zenite Solar Team. *MRPC19: Módulo CAN Para Raspberry Pi Zero (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MRPC19>>.

Zenite Solar Team. *MSC19: Módulo de Sensores CAN (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MS19>>.

Zenite Solar Team. *MSWI19: Módulo Da Interface No Volante (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MSWI19>>.

Zenite Solar Team. *MT19: Módulo Tacômetro (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MT19>>.

Zenite Solar Team. *MVC19: Módulo de Voltímetro CAN Com Display (Versão 2019)*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ZeniteSolar/MVC19>>.

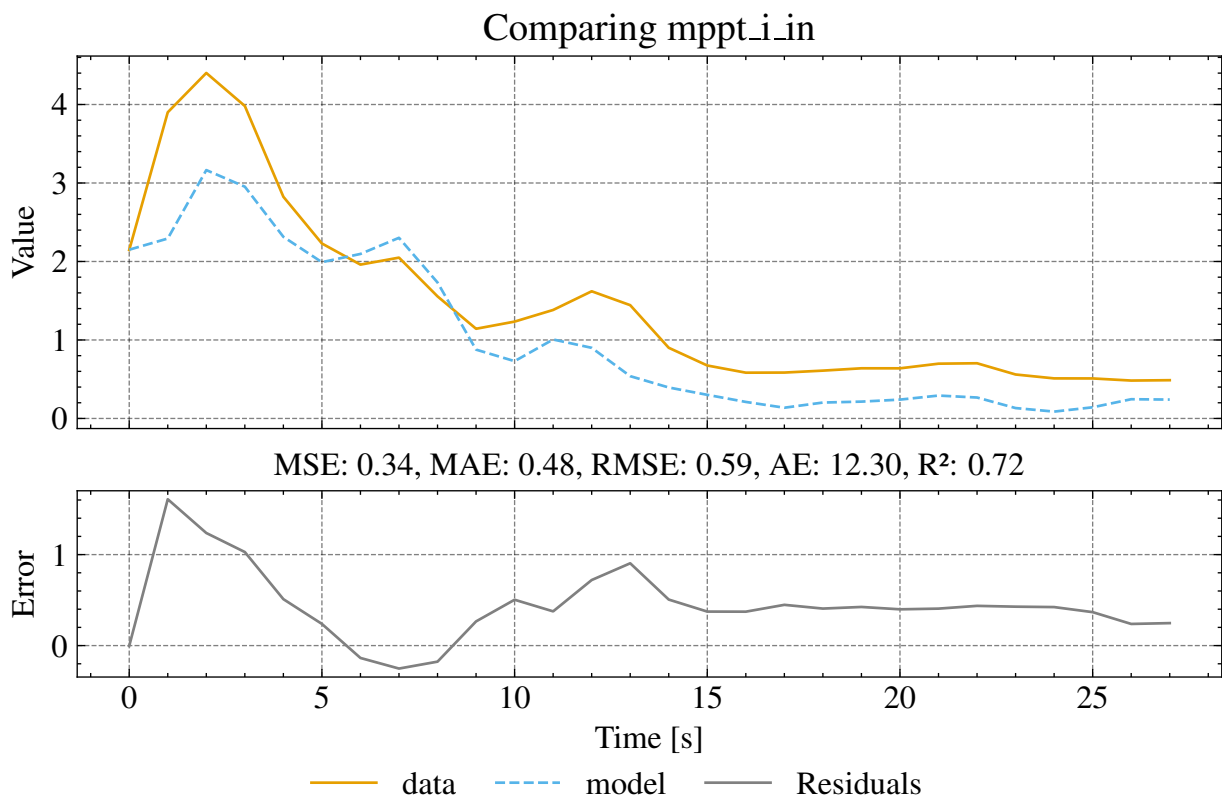
## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – FIGURAS DA AVALIAÇÃO DO MODELO DA GERAÇÃO

As figuras a seguir avaliam o modelo da geração utilizando o conjunto de parâmetros obtido via otimização no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b). O conjunto final é exportado para <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_params.json> e os valores adotados no restante do trabalho são os apresentados na Tabela 3.

### A.1 Avaliação para a Seção A

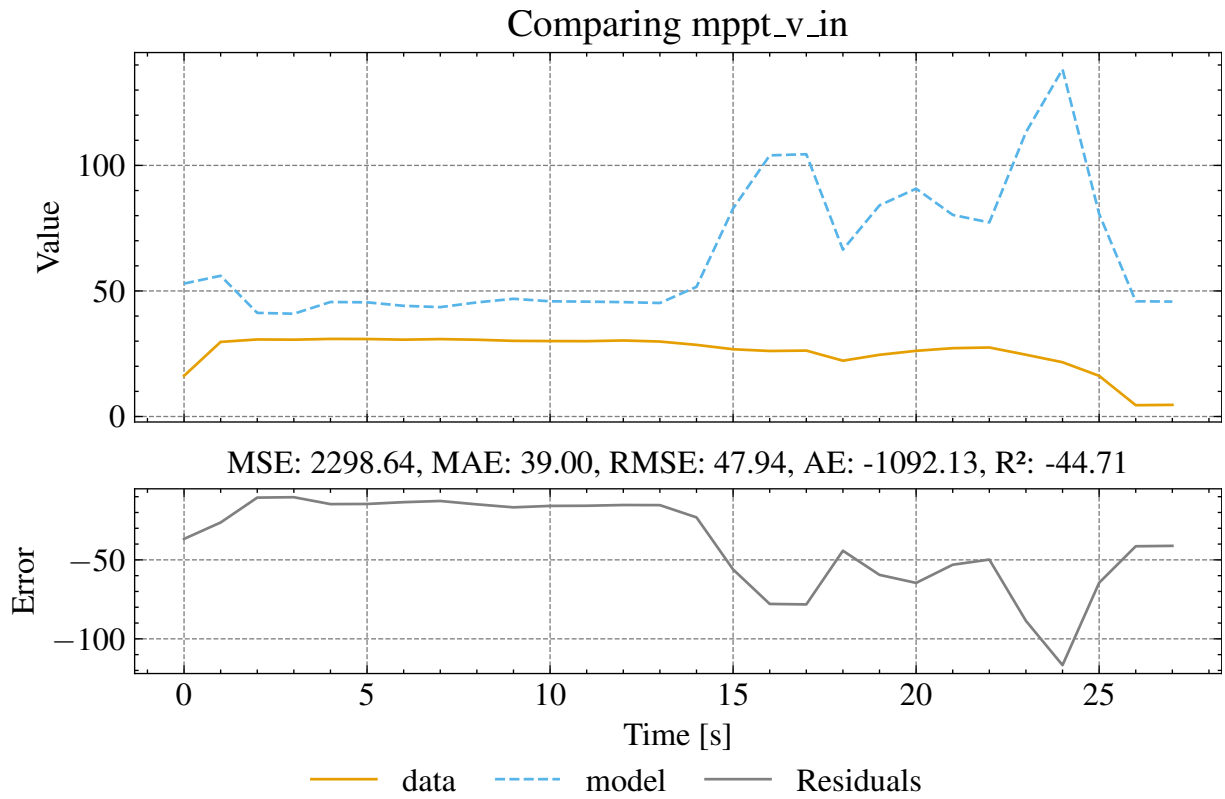
Figura 96 – Comparação do sinal  $i_{MPPT,in}$  do modelo otimizado com os dados da seção A



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do MPPT ( $i_{MPPT,in}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado na seção A. O gráfico mostra as séries temporais, o resíduo e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ), permitindo avaliar a aderência do ajuste.

Figura 97 – Comparação do sinal mppt\_v\_in do modelo otimizado com os dados da seção A

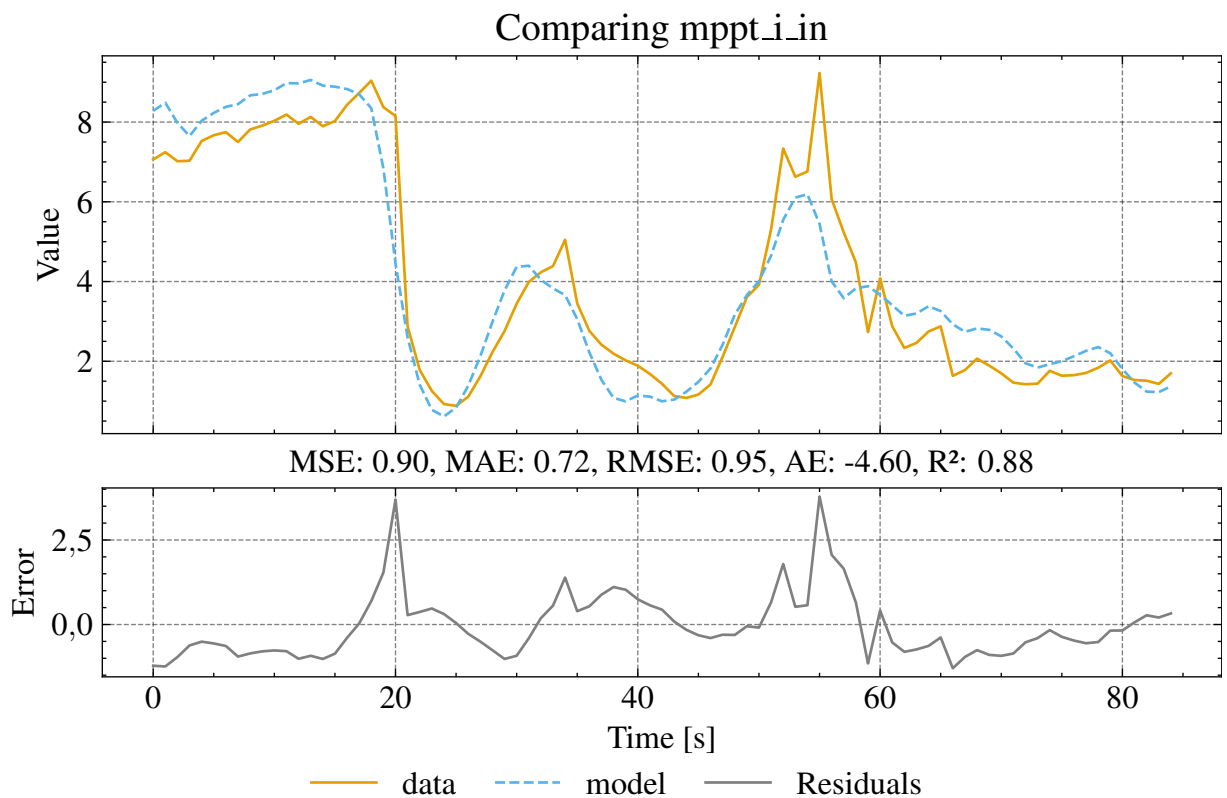


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão de entrada do MPPT ( $v_{MPPT,in}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado na seção A. O gráfico reúne séries temporais, painel de resíduos e métricas de erro, quantificando a qualidade do ajuste.

## A.2 Avaliação para a Seção B

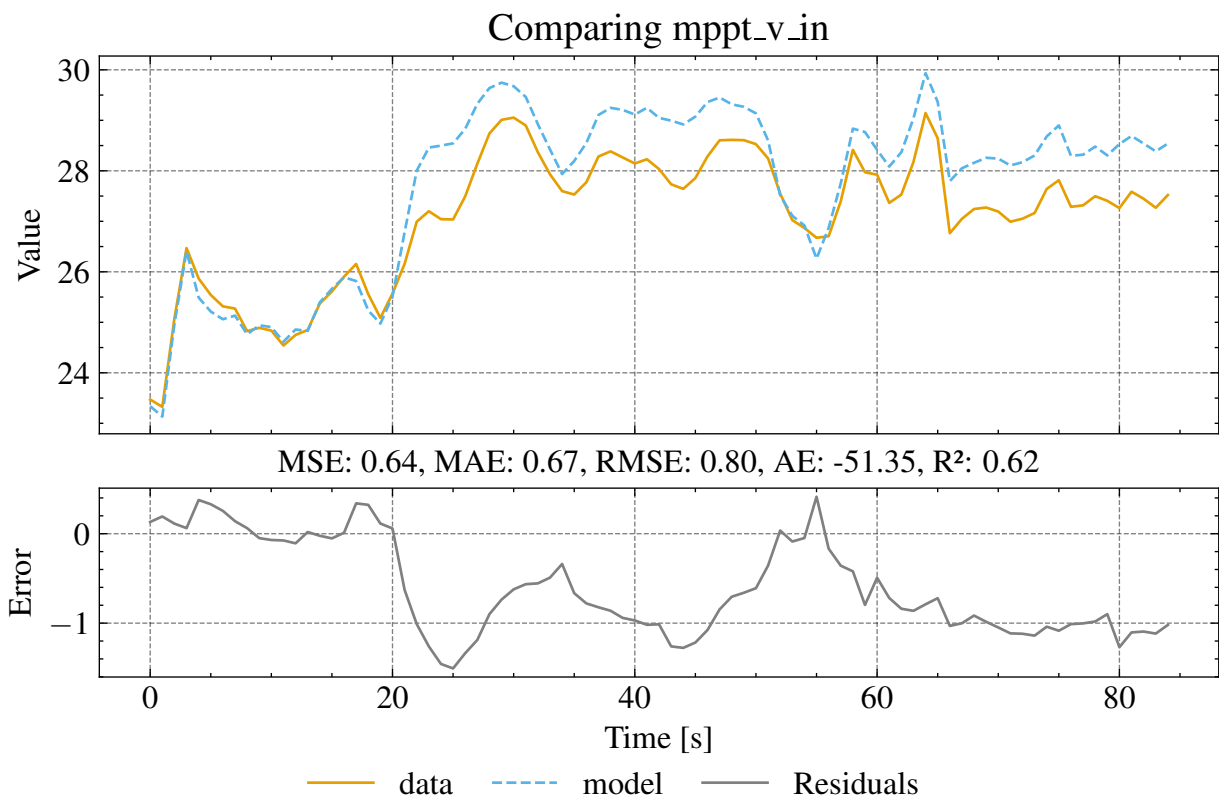
Figura 98 – Comparação do sinal mppt\_i\_in do modelo otimizado com os dados da seção B



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do MPPT ( $i_{MPPT,in}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado na seção B. O gráfico mostra as séries temporais, o resíduo e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ), permitindo avaliar a aderência do ajuste.

Figura 99 – Comparação do sinal mppt\_v\_in do modelo otimizado com os dados da seção B

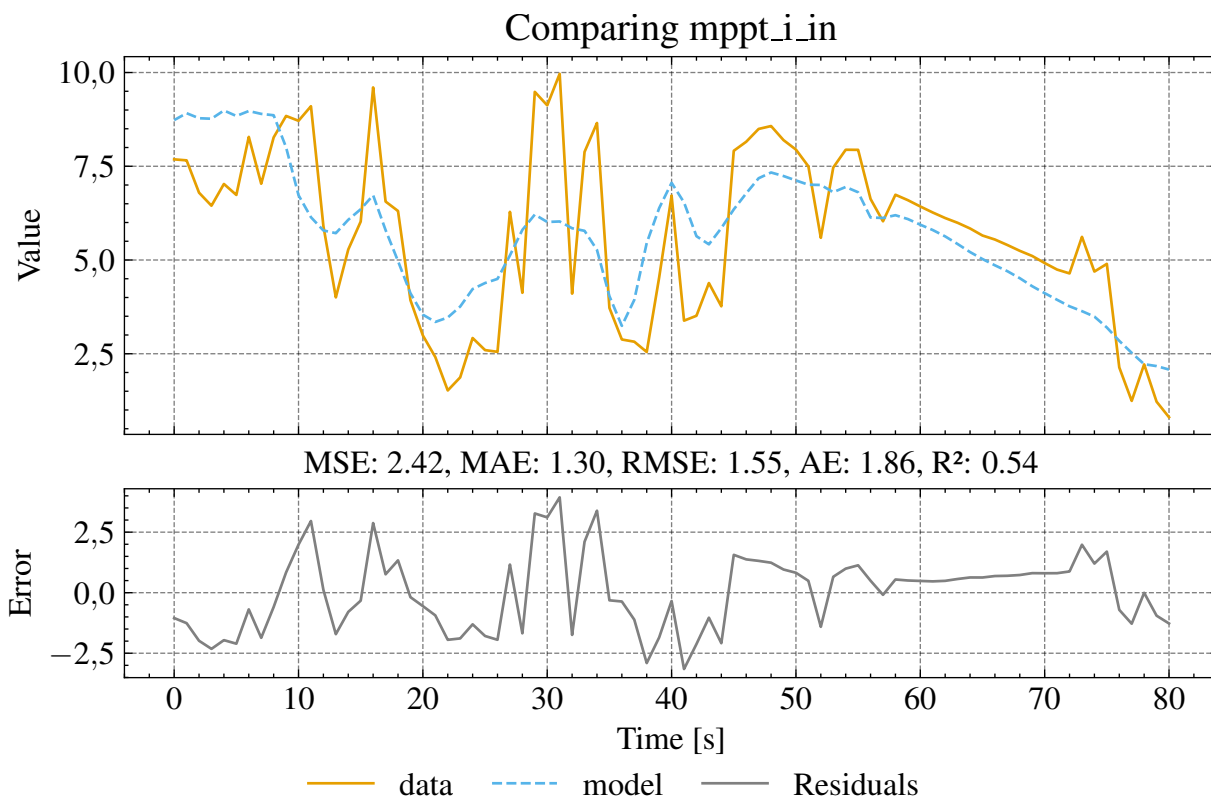


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão de entrada do MPPT ( $v_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção B. O gráfico reúne séries temporais, painel de resíduos e métricas de erro, quantificando a qualidade do ajuste.

### A.3 Avaliação para a Seção D

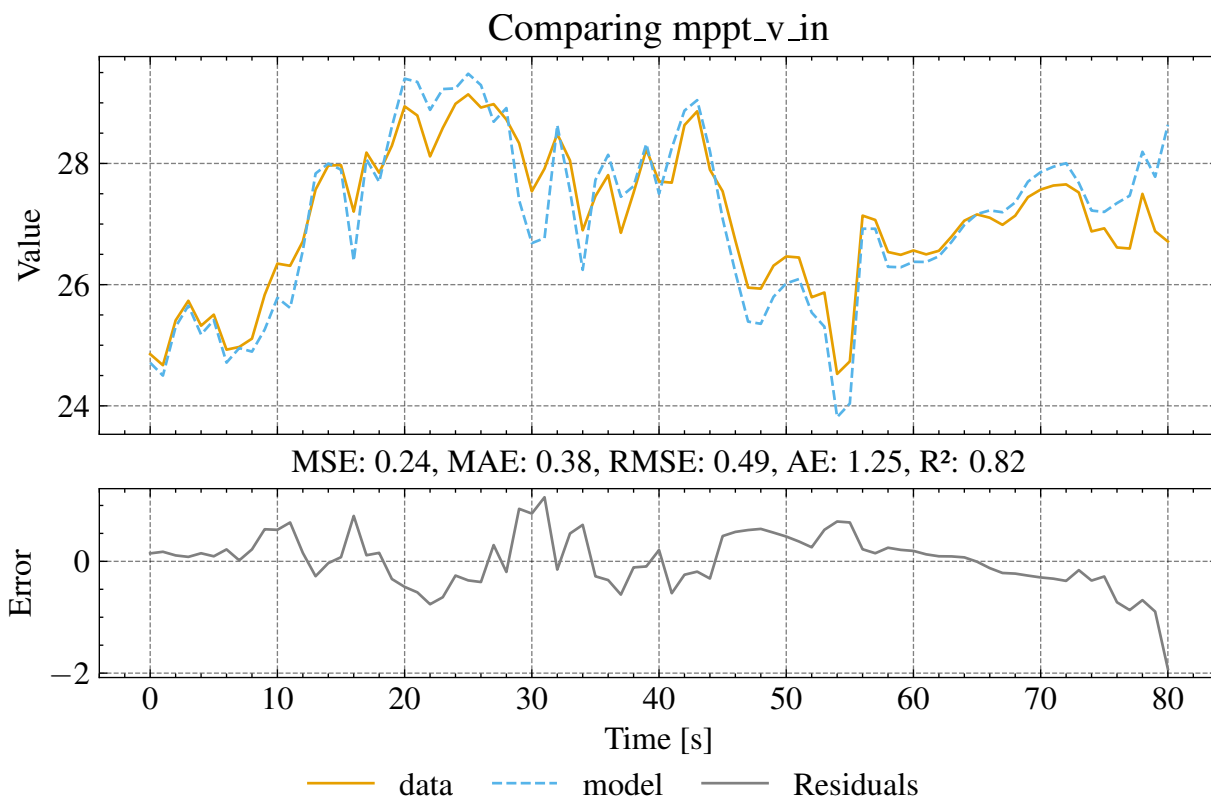
Figura 100 – Comparação do sinal mppt\_i\_in do modelo otimizado com os dados da seção D



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do MPPT ( $i_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção D. O gráfico mostra as séries temporais, o resíduo e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ), permitindo avaliar a aderência do ajuste.

Figura 101 – Comparação do sinal mppt\_v\_in do modelo otimizado com os dados da seção D

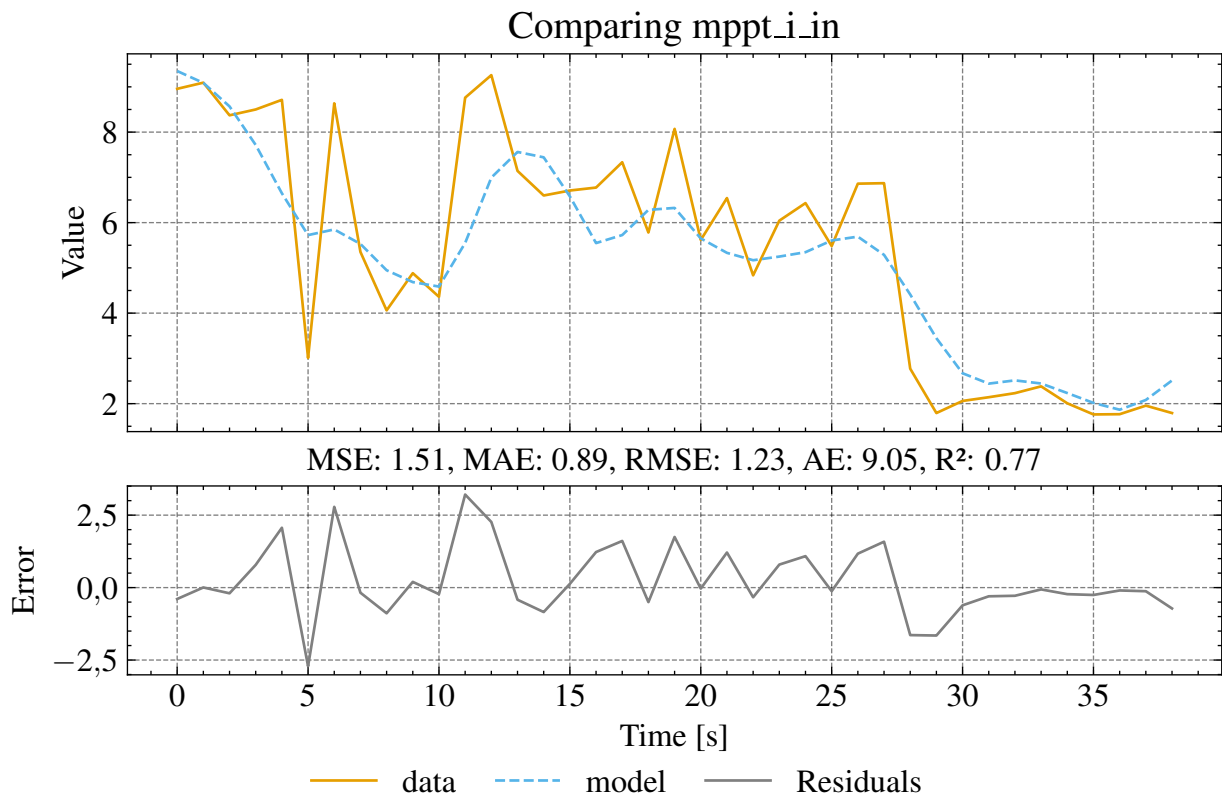


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão de entrada do MPPT ( $v_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção D. O gráfico reúne séries temporais, painel de resíduos e métricas de erro, quantificando a qualidade do ajuste.

#### A.4 Avaliação para a Seção E

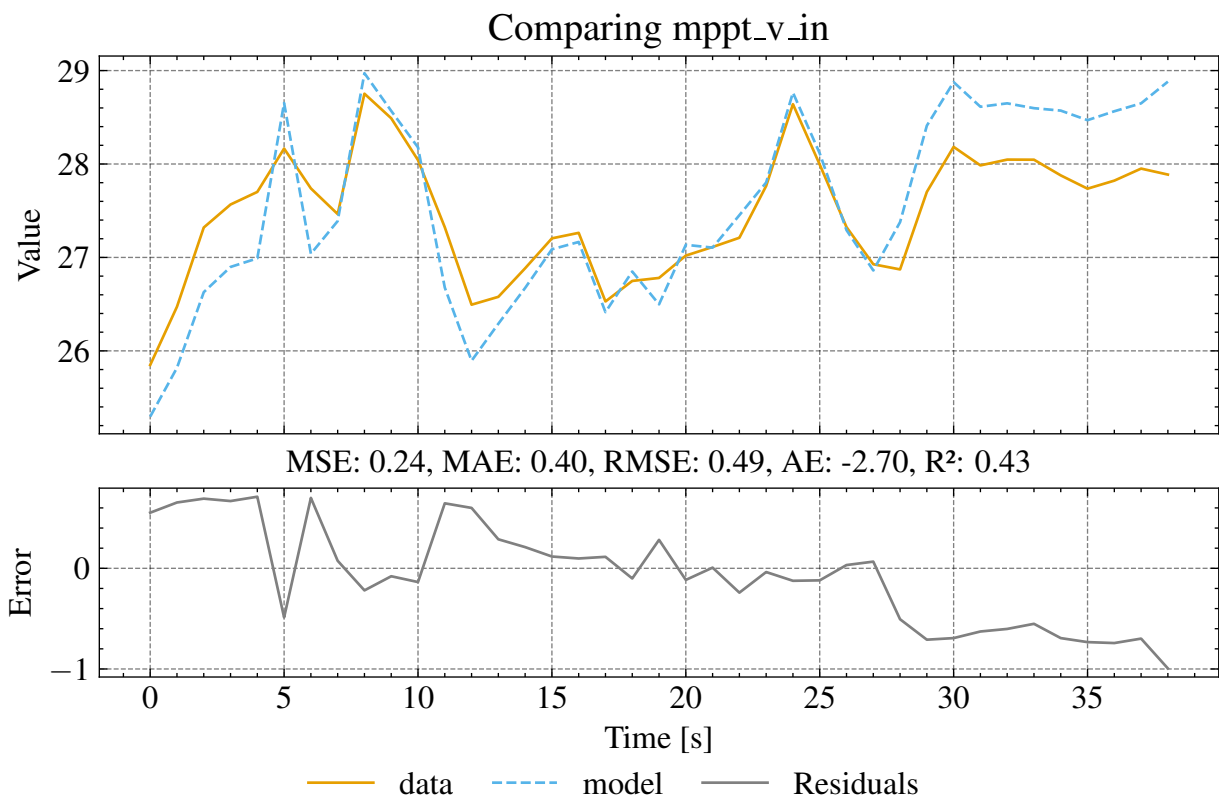
Figura 102 – Comparação do sinal mppt\_i\_in do modelo otimizado com os dados da seção E



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do MPPT ( $i_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção E. O gráfico mostra as séries temporais, o resíduo e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ), permitindo avaliar a aderência do ajuste.

Figura 103 – Comparação do sinal mppt\_v\_in do modelo otimizado com os dados da seção E

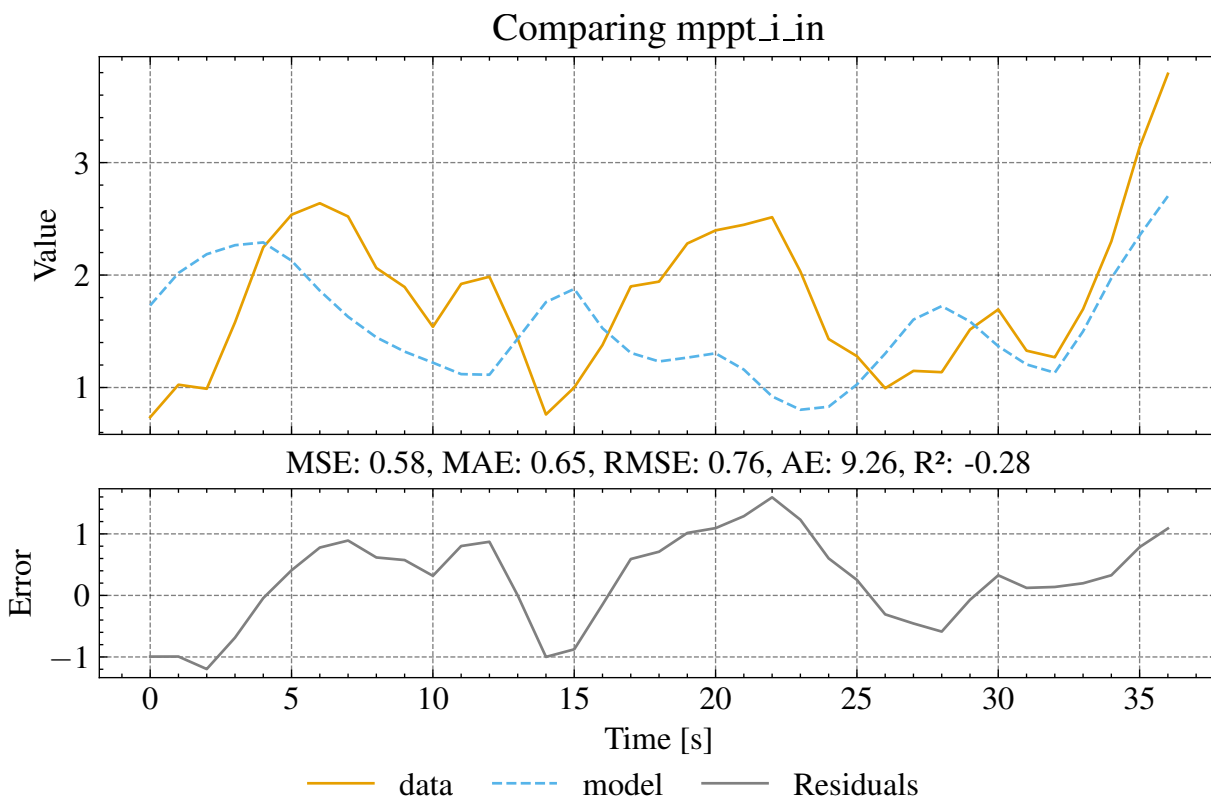


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão de entrada do MPPT ( $v_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção E. O gráfico reúne séries temporais, painel de resíduos e métricas de erro, quantificando a qualidade do ajuste.

### A.5 Avaliação para a Seção F

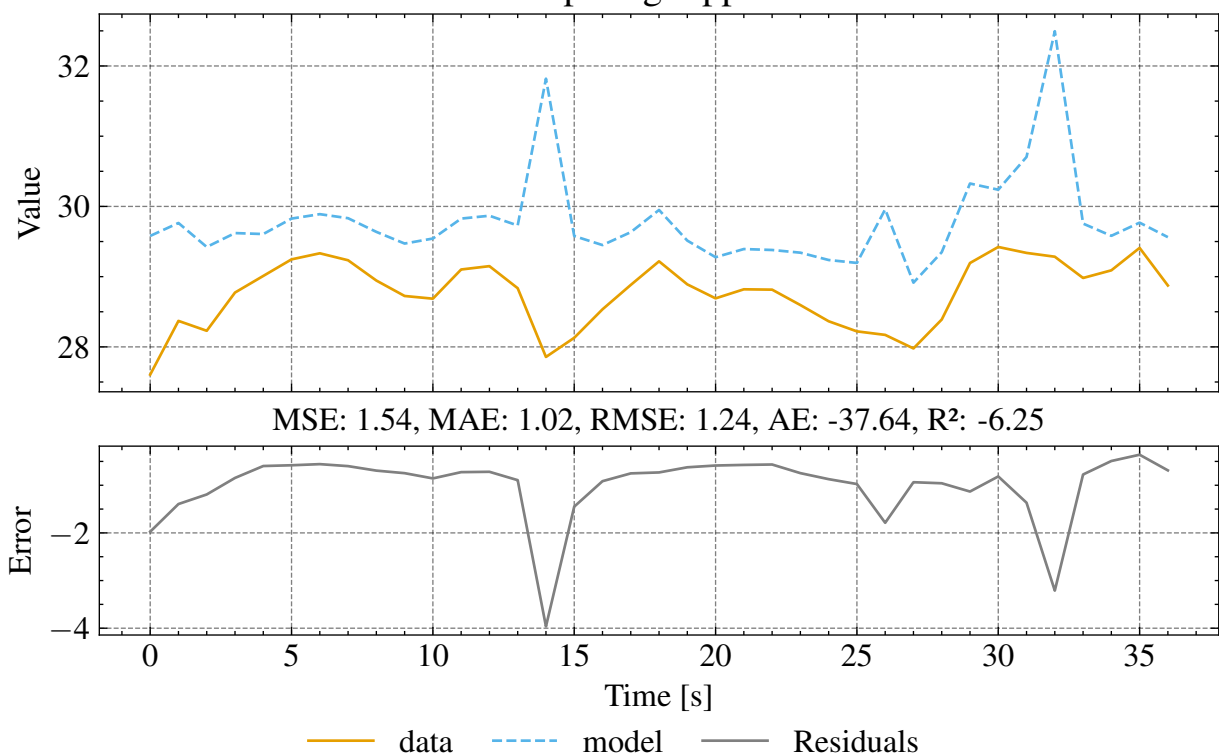
Figura 104 – Comparação do sinal mppt\_i\_in do modelo otimizado com os dados da seção F



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do MPPT ( $i_{MPPT,in}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado na seção F. O gráfico mostra as séries temporais, o resíduo e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ), permitindo avaliar a aderência do ajuste.

Figura 105 – Comparação do sinal mppt\_v\_in do modelo otimizado com os dados da seção F  
 Comparing mppt\_v\_in



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão de entrada do MPPT ( $v_{MPPT,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F. O gráfico reúne séries temporais, painel de resíduos e métricas de erro, quantificando a qualidade do ajuste.

## APÊNDICE B – FIGURAS DA AVALIAÇÃO DO MODELO DA BATERIA

### B.1 Estado de carga inicial por seção

O *notebook* <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b) realiza uma otimização do SoC inicial  $z_{Batt}(t_0)$  para cada seção, mantendo os parâmetros 2RC constantes. Esses parâmetros do modelo (bem como os coeficientes de OCV utilizados como entrada) são descritos na monografia, na Tabela 5, e o conjunto consolidado é exportado em <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_params.json>.

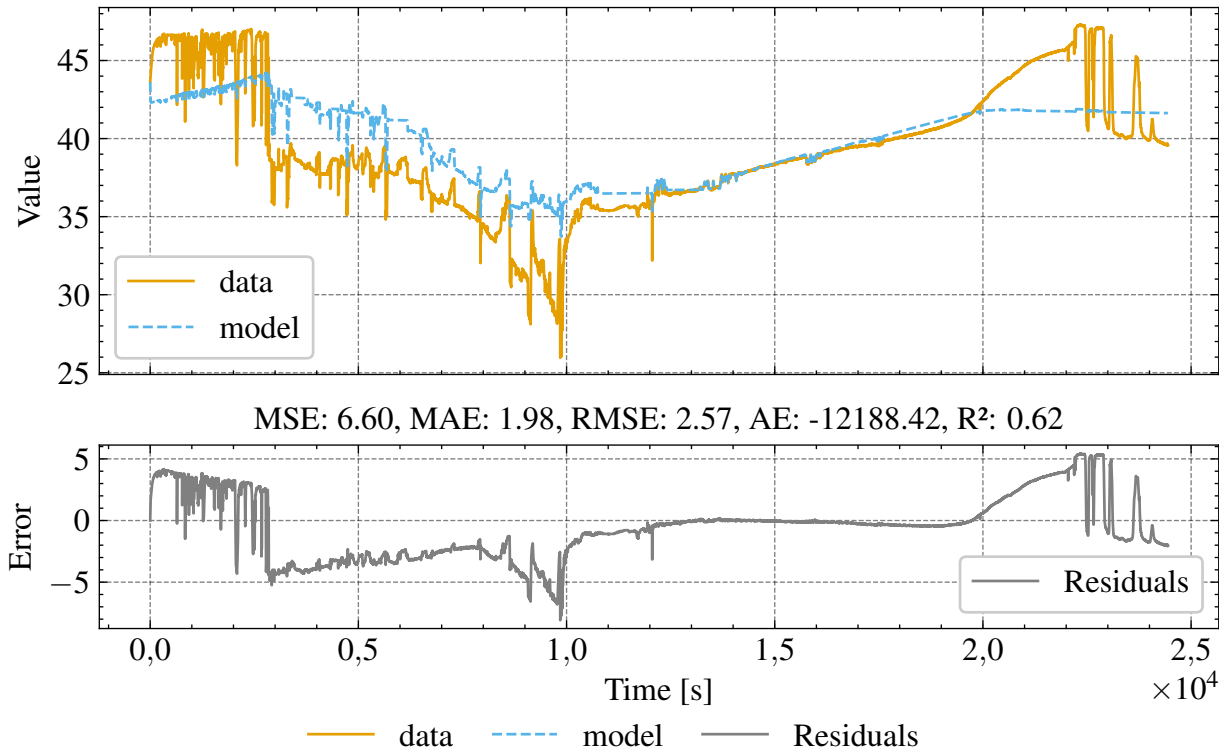
**Tabela 16 – SoC inicial otimizado por seção**

Seção	$z_{Batt}(t_0)$
D	1,1973
D12	1,4893
D24	0,8627
D23	1,1252
D34	0,0087
D46	0,7754
D45	0,7157
D56	1,4414
E	0,7557
E12	0,1928
E23	0,1928
F1	1,2634
F2	0,5134
F3	0,8259

Fonte: Elaboração própria (2026).

### B.2 Avaliação para a Seção D

**Figura 106 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D**  
**Comparing batt\_v**

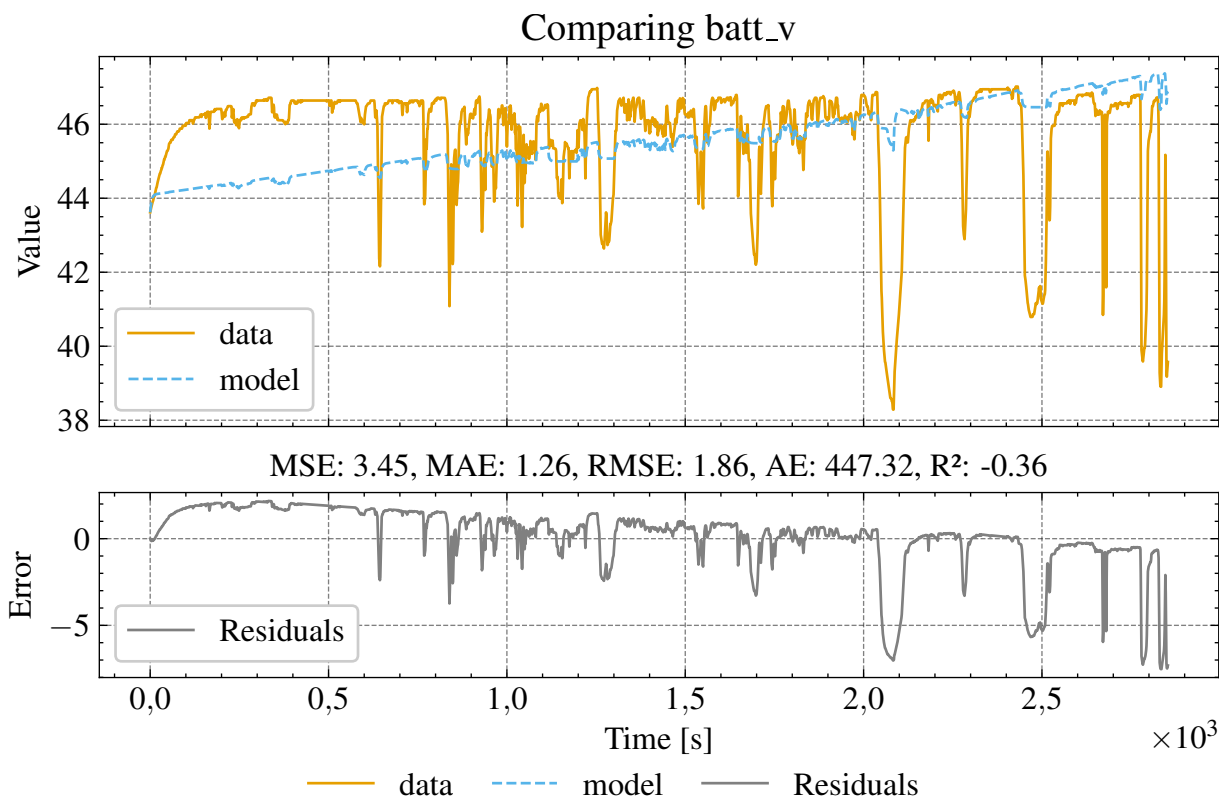


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.3 Avaliação para a Seção D12

Figura 107 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D12

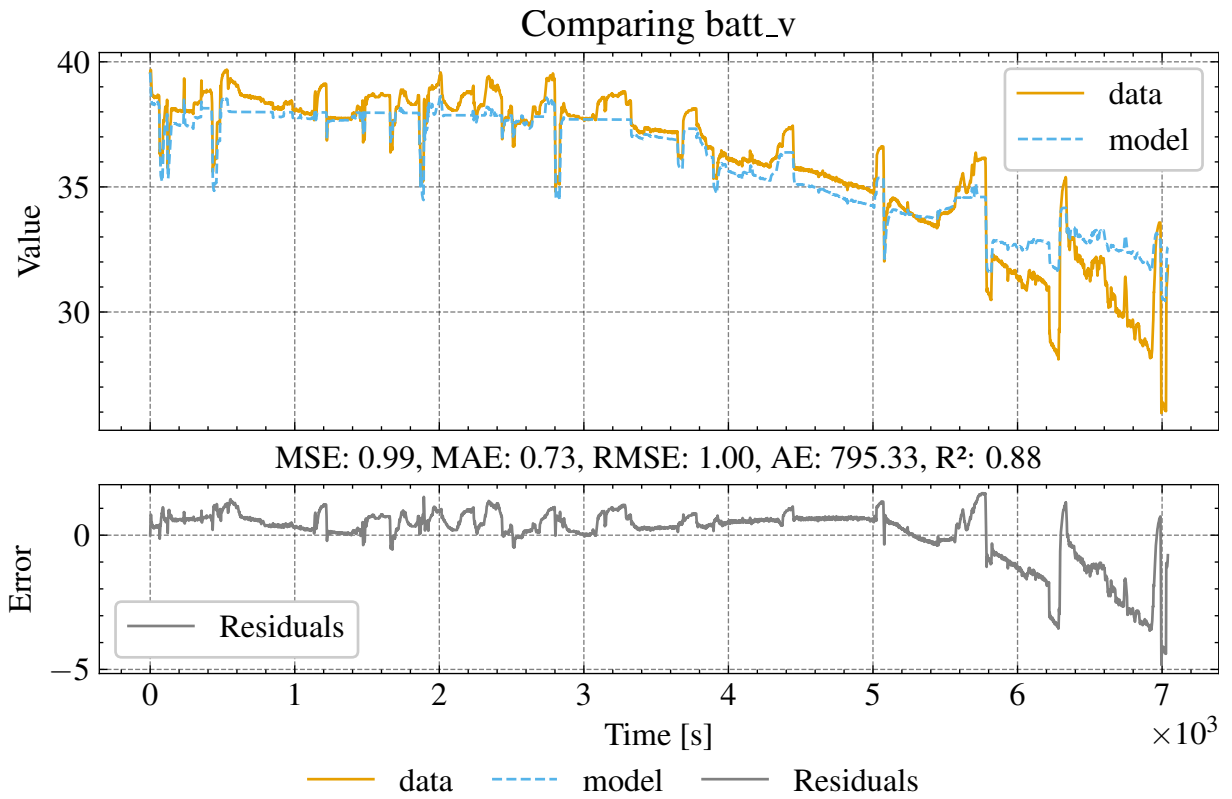


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D12. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

#### B.4 Avaliação para a Seção D24

Figura 108 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D24

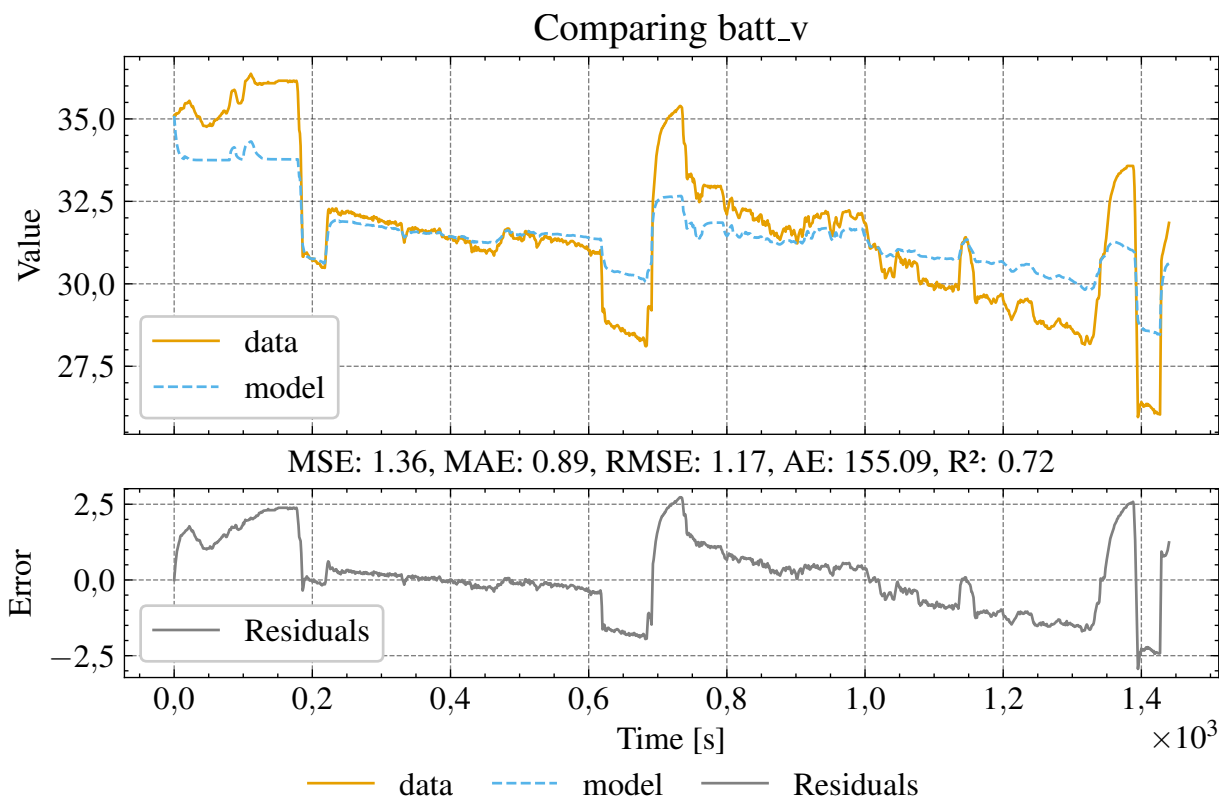


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D24. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.5 Avaliação para a Seção D34

Figura 109 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D34

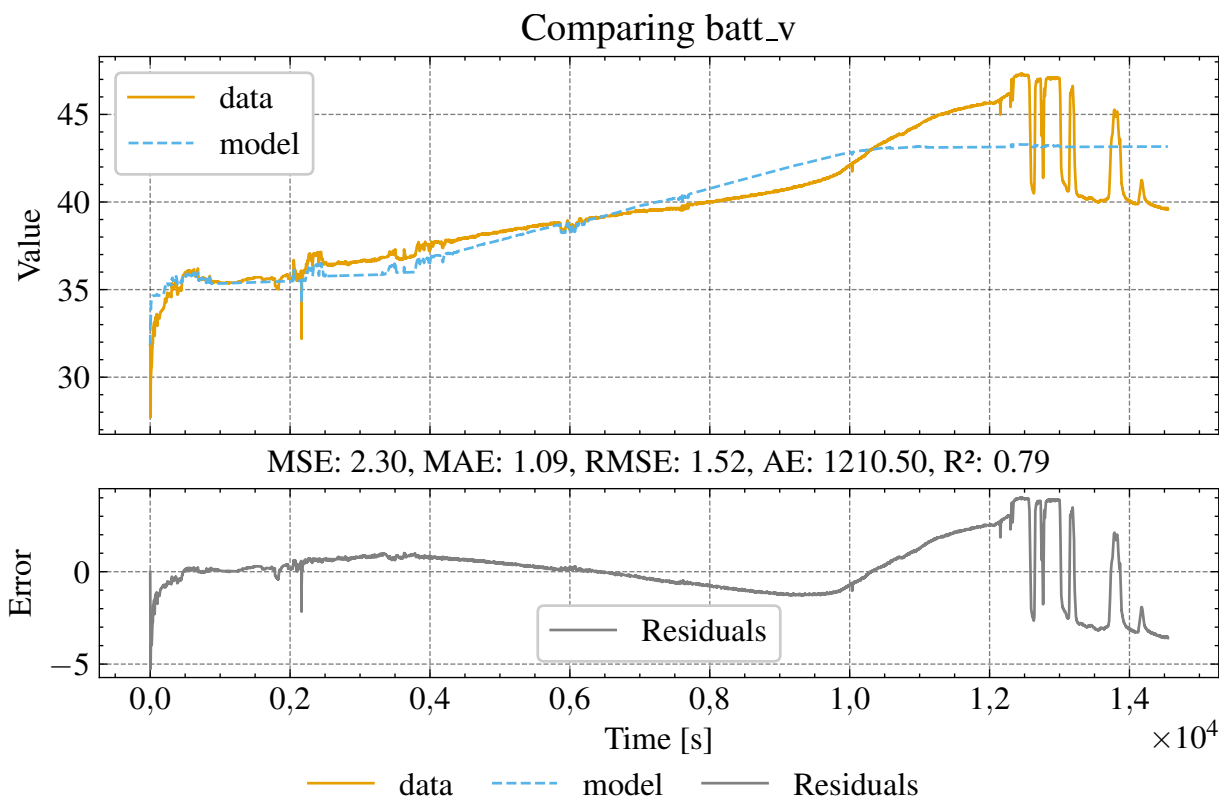


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D34. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.6 Avaliação para a Seção D46

Figura 110 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D46

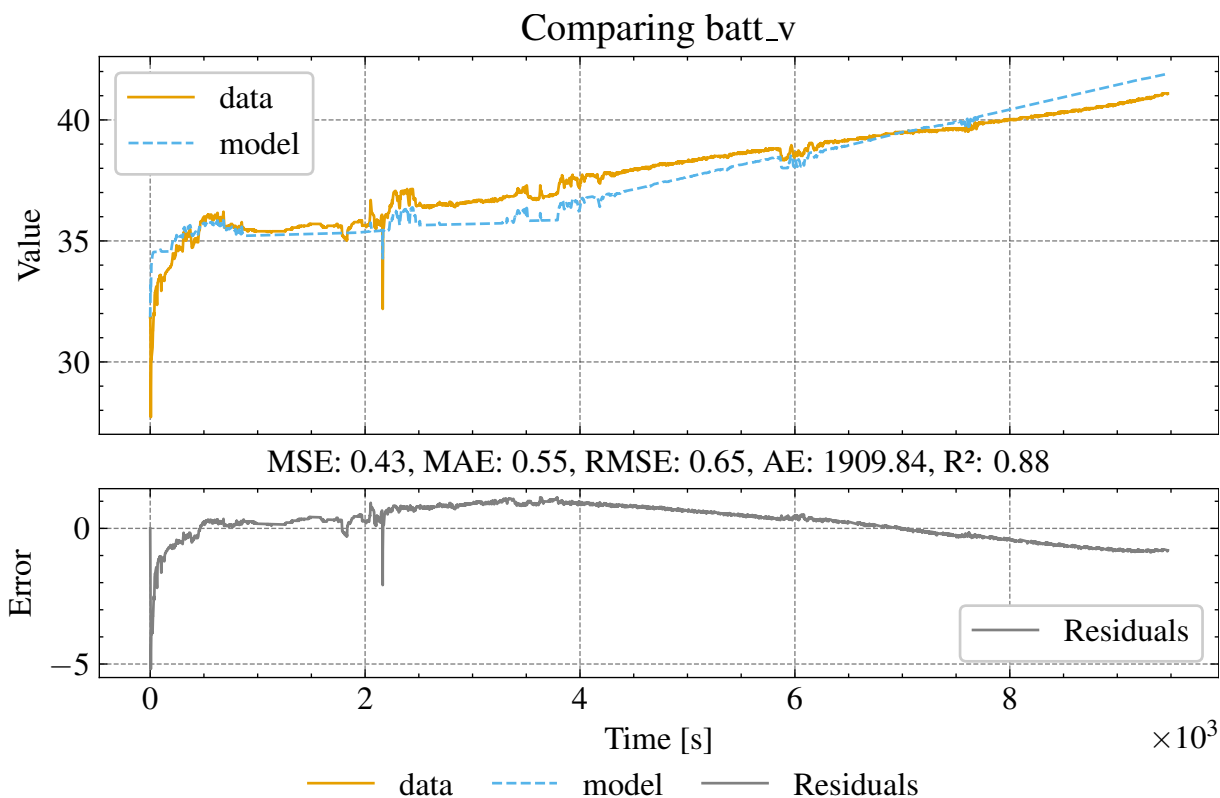


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D46. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.7 Avaliação para a Seção D45

Figura 111 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D45

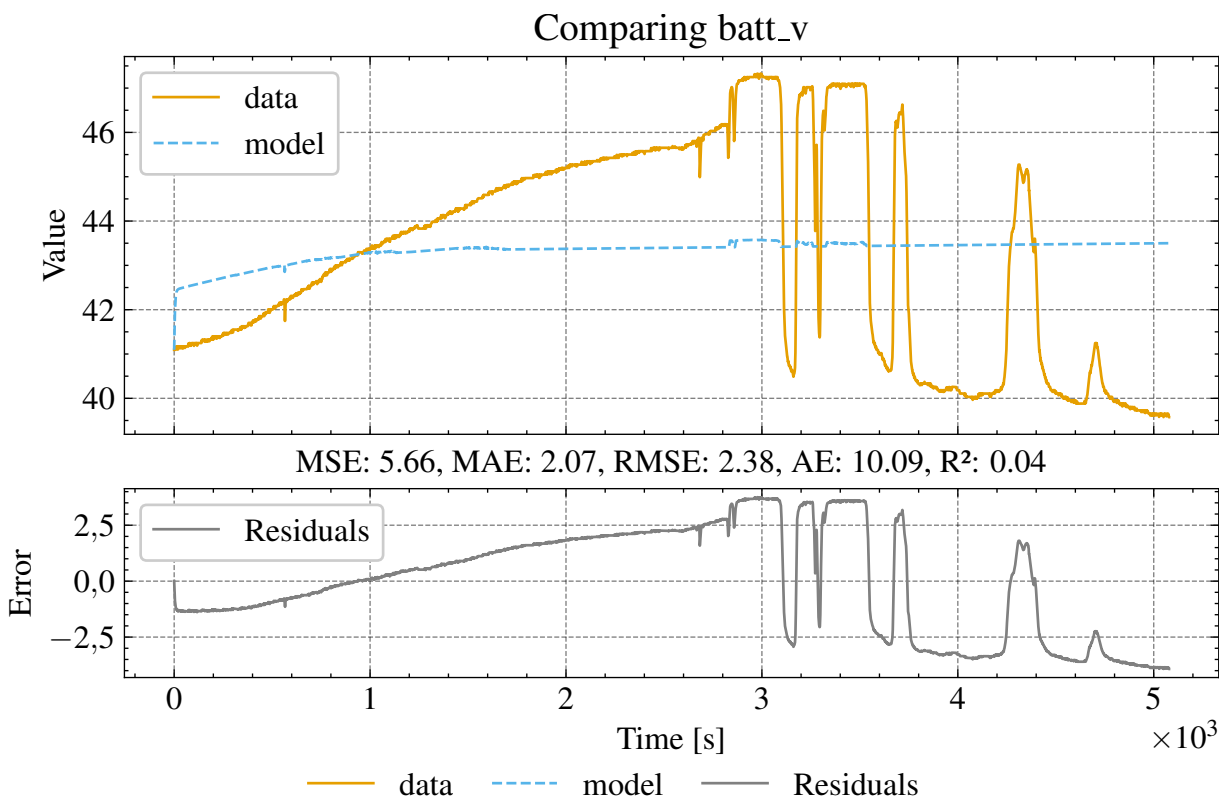


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D45. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.8 Avaliação para a Seção D56

Figura 112 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção D56

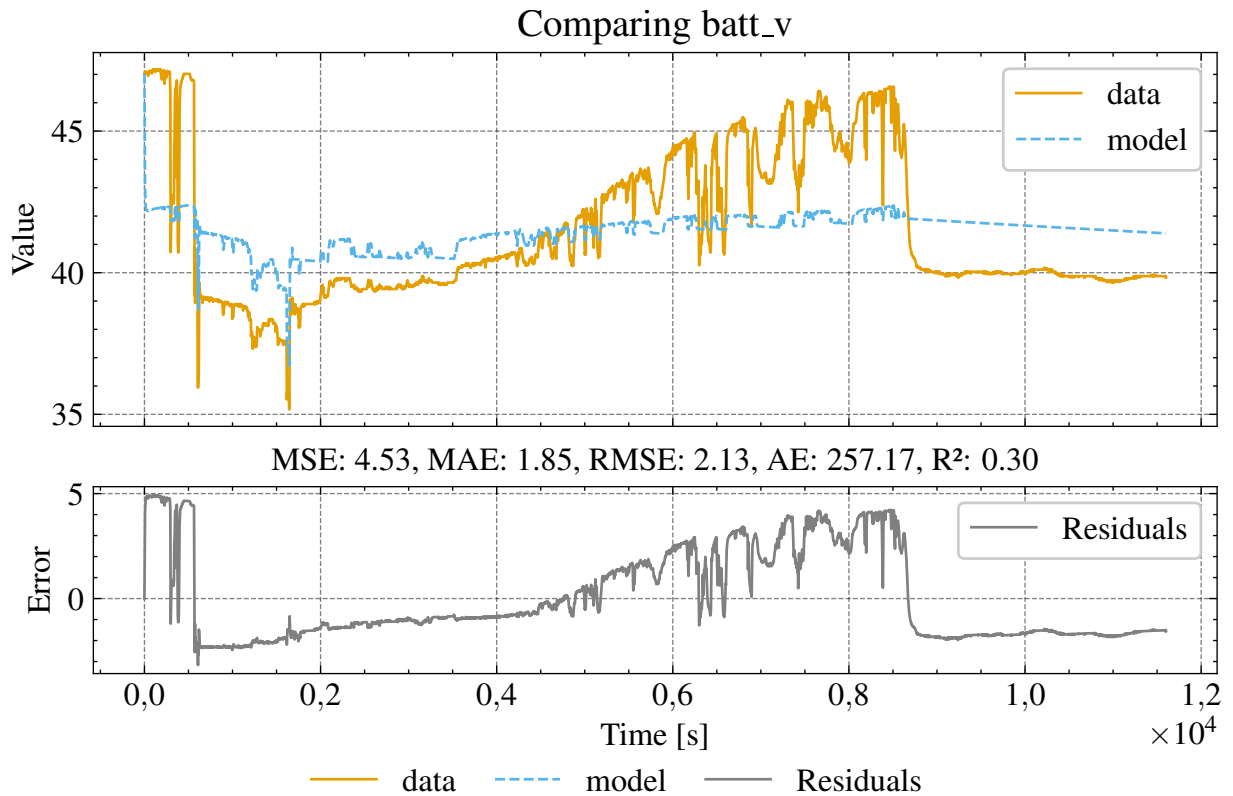


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção D56. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.9 Avaliação para a Seção E

Figura 113 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção E

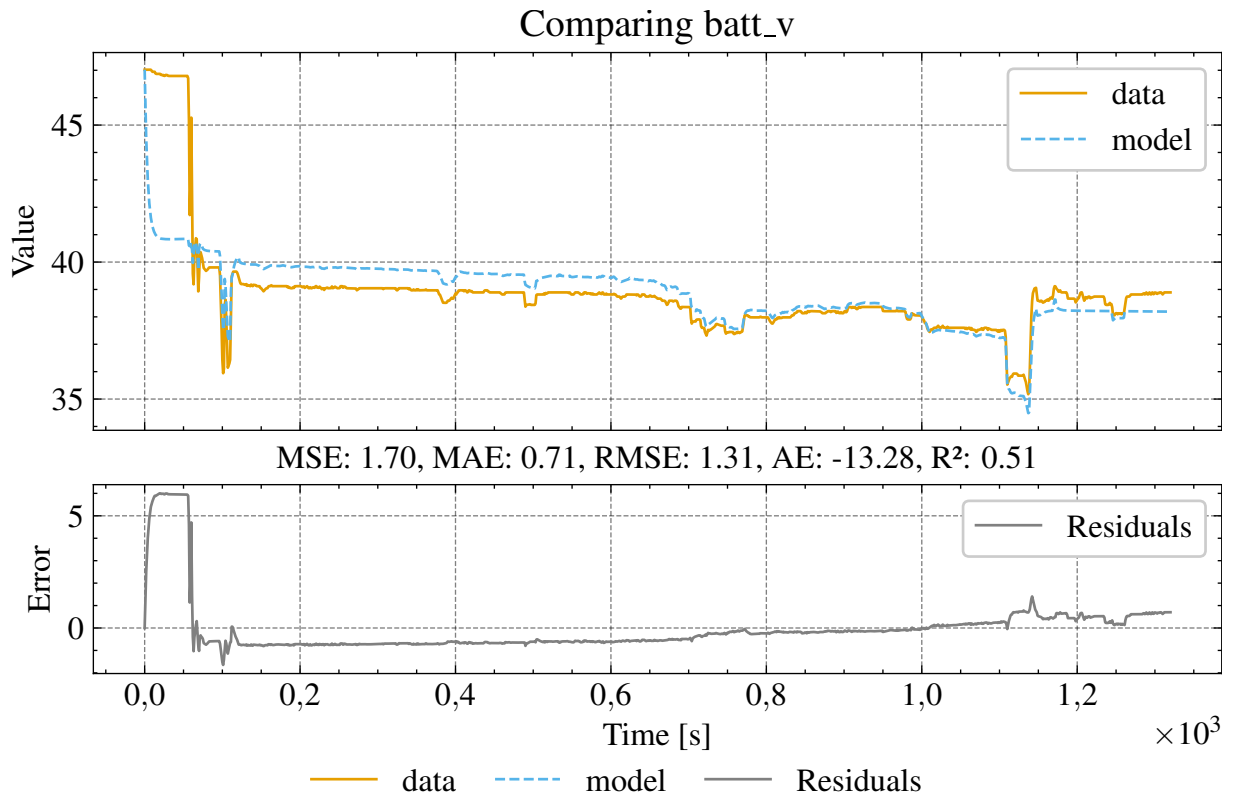


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção E. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.10 Avaliação para a Seção E12

Figura 114 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção E12

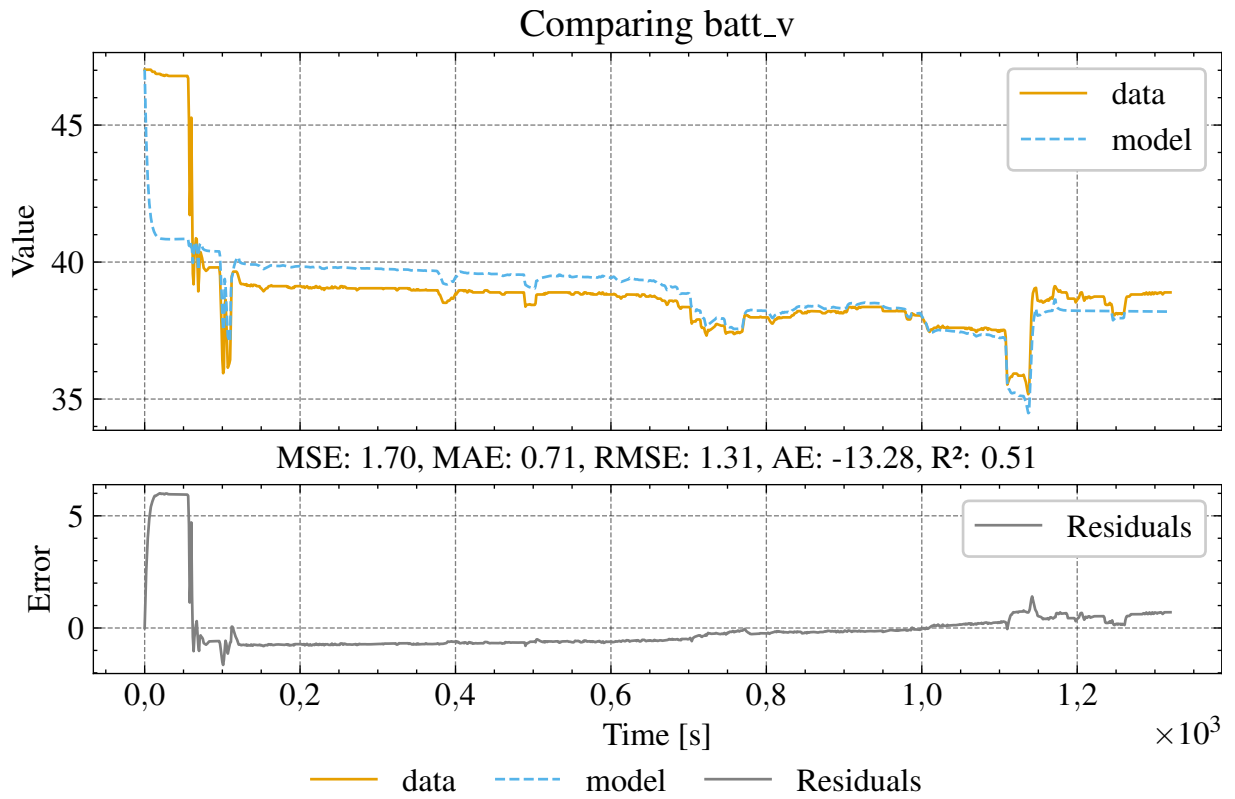


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção E12. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.11 Avaliação para a Seção E23

Figura 115 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção E23

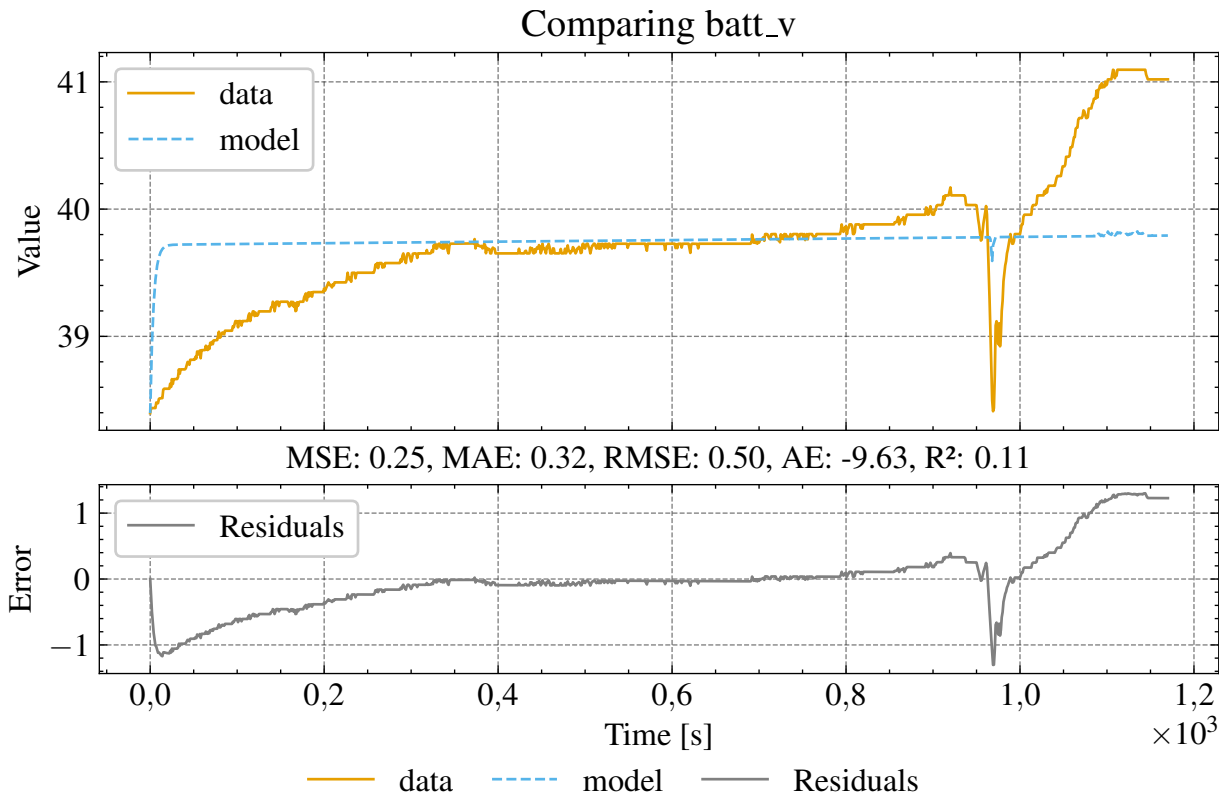


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção E23. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.12 Avaliação para a Seção F1

Figura 116 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção F1

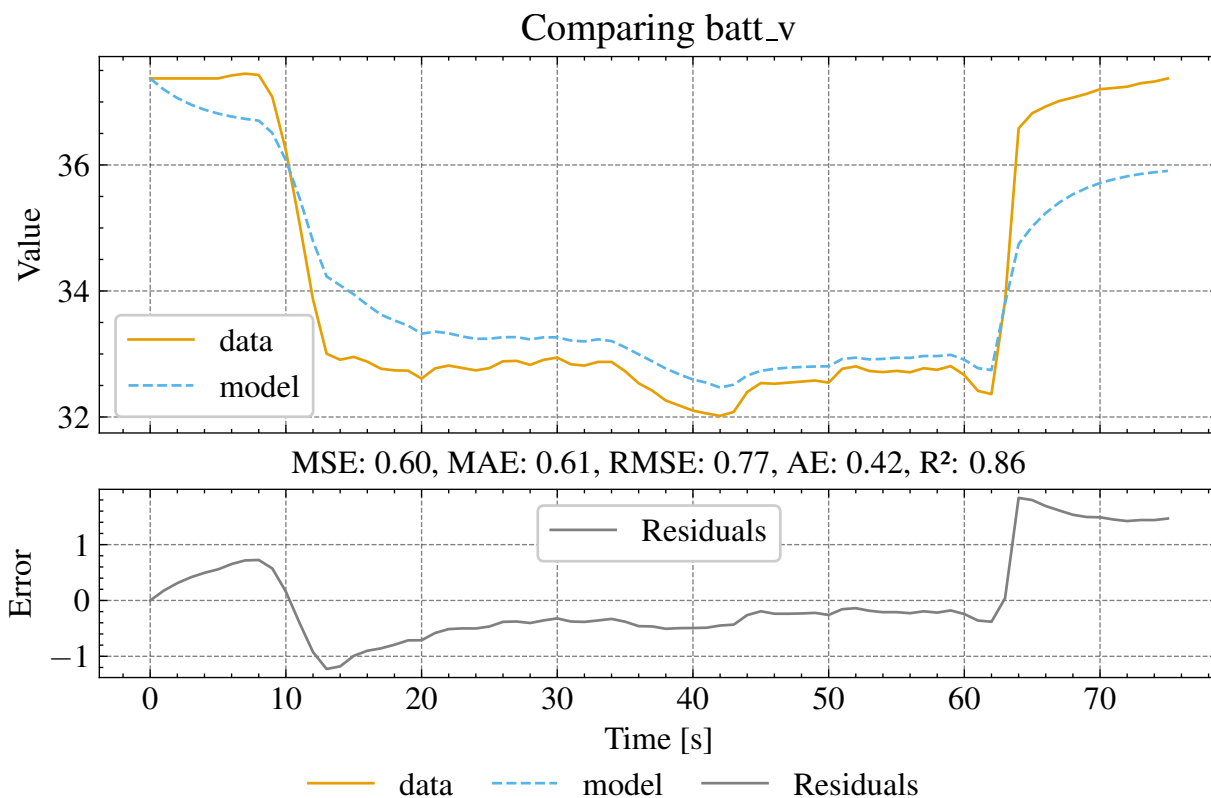


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção F1. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### B.13 Avaliação para a Seção F2

Figura 117 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção F2

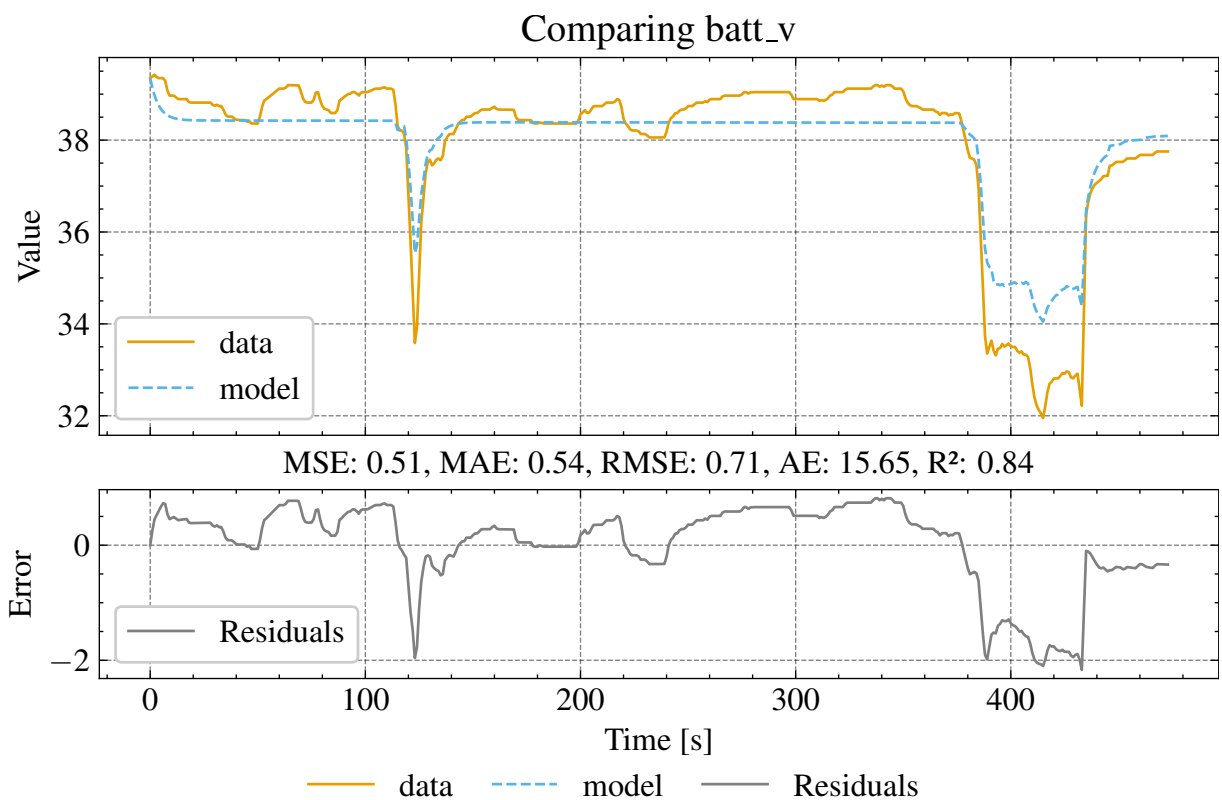


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção F2. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

**B.14 Avaliação para a Seção F3**

Figura 118 – Comparação do sinal batt\_v do modelo otimizado com os dados da seção F3



Fonte: Elaboração própria (2026).

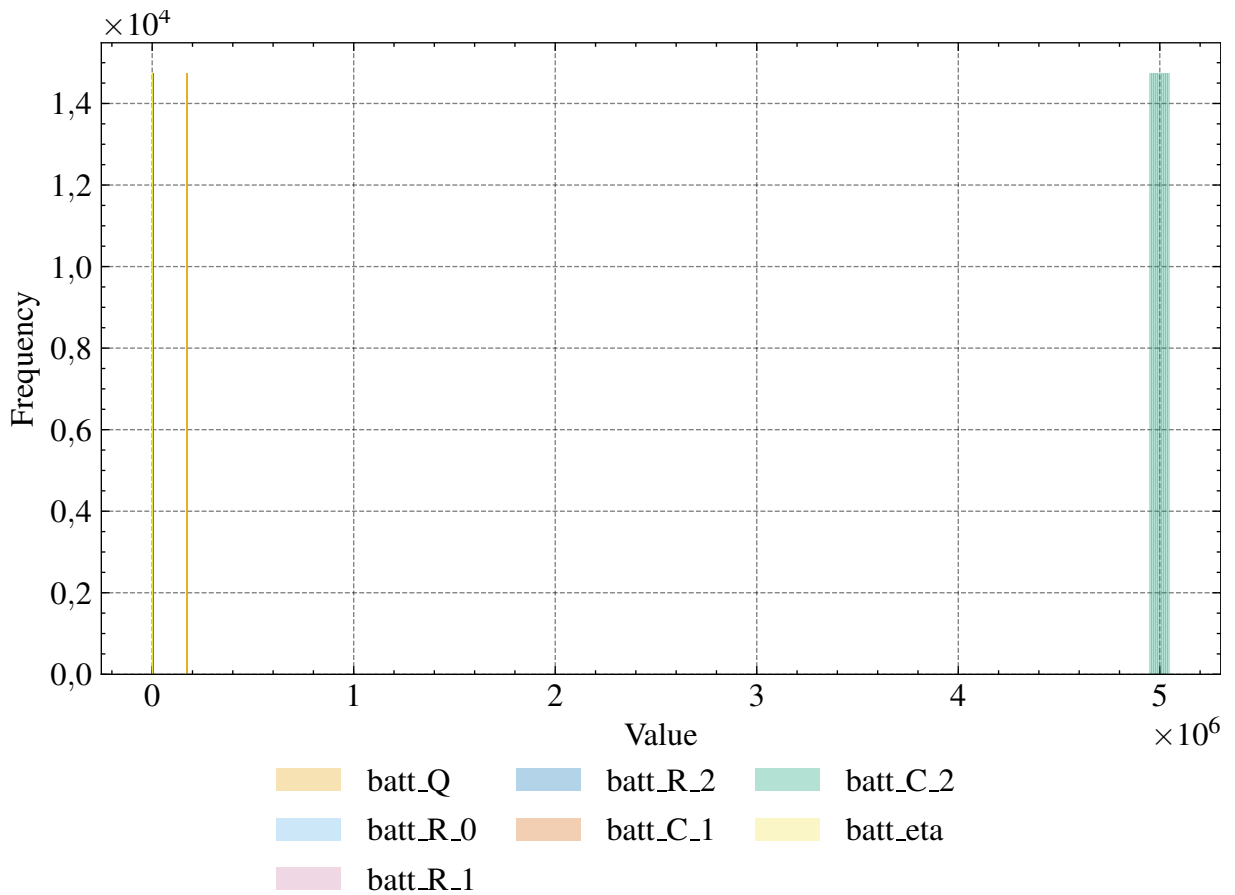
Legenda: Comparação entre a tensão terminal da bateria ( $v_{Batt}$ ) medida e a predita pelo modelo 2RC otimizado na seção F3. O painel principal apresenta as séries no tempo (s) e o painel inferior exibe os resíduos; as métricas (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ) resumem o ajuste.

### APÊNDICE C – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DA BATERIA

A análise de sensibilidade do modelo 2RC é implementada no *notebook* < solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_sensitivity.ipynb > (CARDOSO, 2026b), o qual carrega como entrada os coeficientes de OCV em < solarboat\_model/models/2020/battery/battery\_ocv\_params.json >. Os parâmetros do modelo avaliados e utilizados como referência são os descritos na Tabela 5.

As tabelas a seguir apresentam os índices de Sobol em regime permanente para o modelo 2RC, considerando respostas a degrau de corrente de 150 A e -30 A.

Figura 119 – Distribuição dos valores para cada fator



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Distribuição dos valores amostrados para cada parâmetro do planejamento de sensibilidade ( $Q_{Batt}$ ,  $\eta_{Batt}$ ,  $R_{Batt,0}$ ,  $R_{Batt,1}$ ,  $R_{Batt,2}$ ,  $C_{Batt,1}$  e  $C_{Batt,2}$ ). O histograma evidencia a faixa e a densidade de amostragem usadas na análise.

**Tabela 17 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf
batt_ocv	batt_eta	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_R_2	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_1	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_0	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_Q	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_C_2	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_1	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
batt_v	batt_eta	S1	0,01	0,00
		ST	0,01	0,00
	batt_R_2	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_1	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_R_0	S1	0,02	0,00
		ST	0,02	0,00
	batt_Q	S1	0,01	0,00
		ST	0,01	0,00
	batt_C_2	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_1	S1	0,47	0,01
		ST	0,47	0,01
batt_z	batt_eta	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_R_2	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_1	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_0	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_Q	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_C_2	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_1	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00

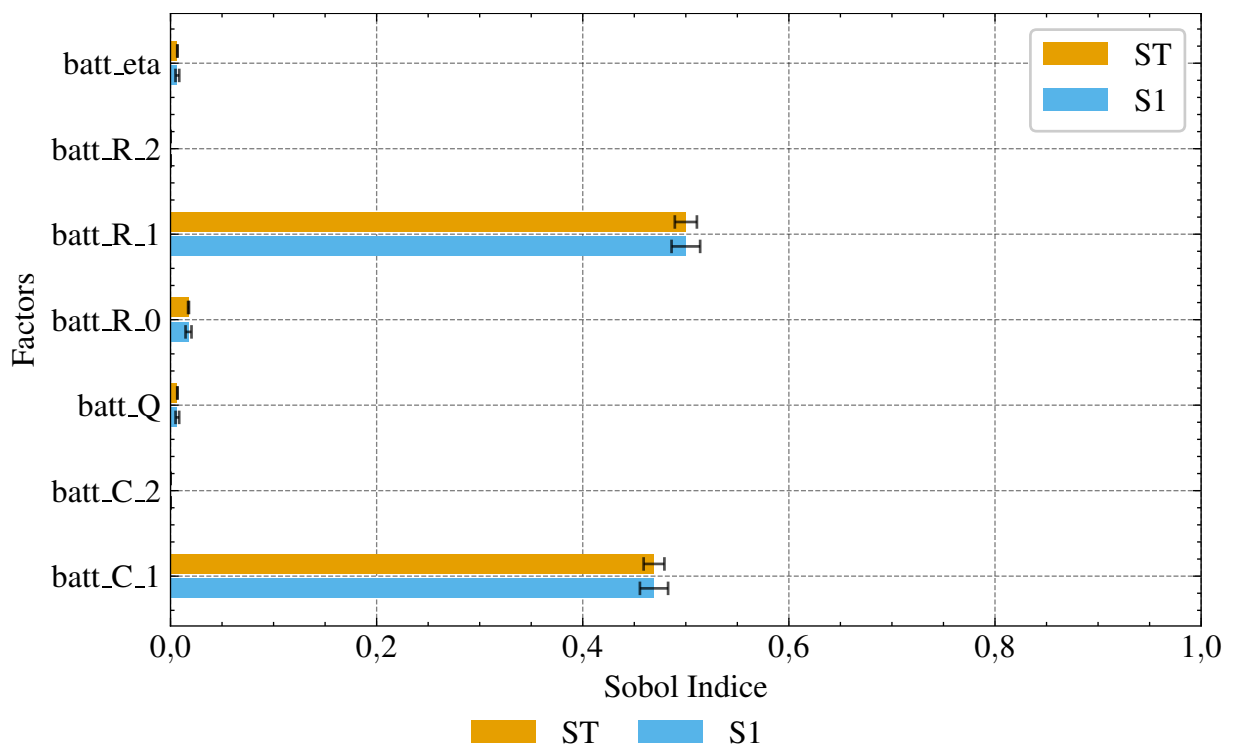
Fonte: Elaboração Própria (2026).

**Tabela 18 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf
batt_ocv	batt_eta	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_R_2	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_1	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_0	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_Q	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_C_2	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_1	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
batt_v	batt_eta	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_2	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_1	S1	0,27	0,01
		ST	0,27	0,01
	batt_R_0	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_Q	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_2	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_1	S1	0,73	0,02
		ST	0,73	0,01
batt_z	batt_eta	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_R_2	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_1	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_R_0	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_Q	S1	0,50	0,01
		ST	0,50	0,01
	batt_C_2	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	batt_C_1	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00

Fonte: Elaboração Própria (2026).

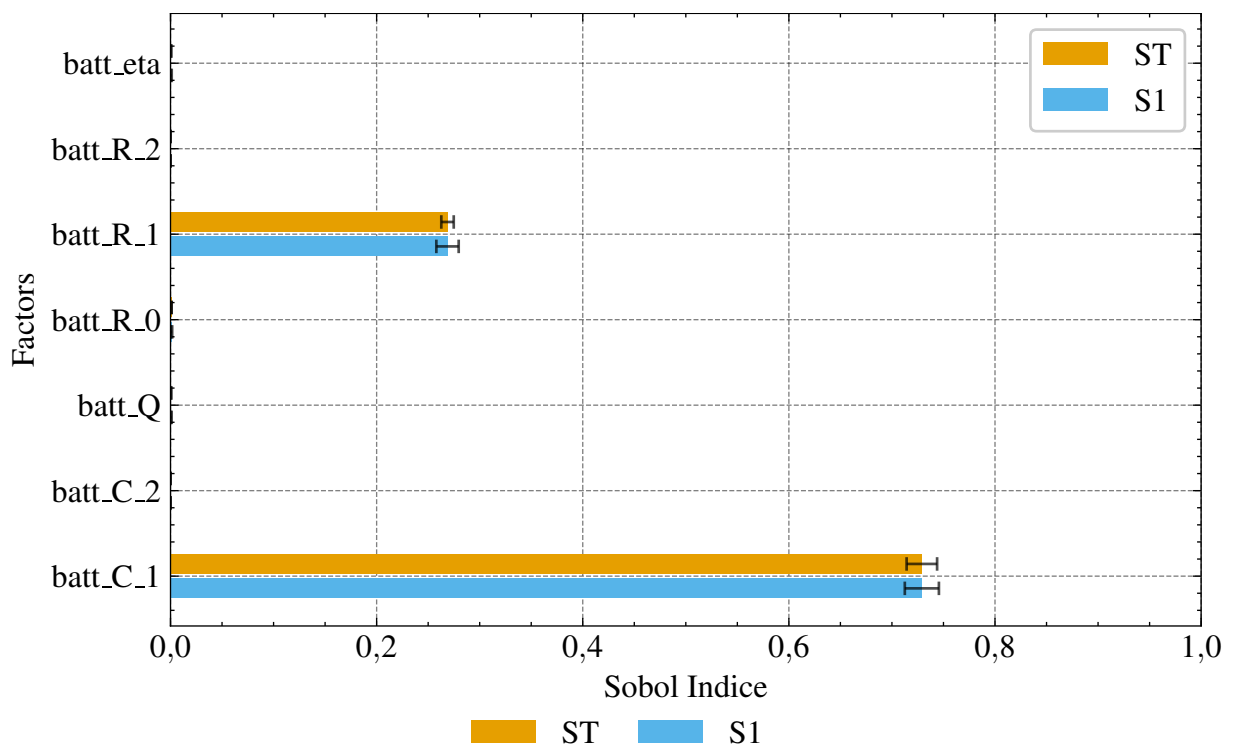
Figura 120 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt}$  em regime permanente, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) para a saída  $v_{Batt}$  em regime permanente, com degrau de corrente de 150 A. O gráfico compara a influência relativa de cada parâmetro do modelo 2RC na variabilidade da tensão.

Figura 121 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt}$  em regime permanente, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

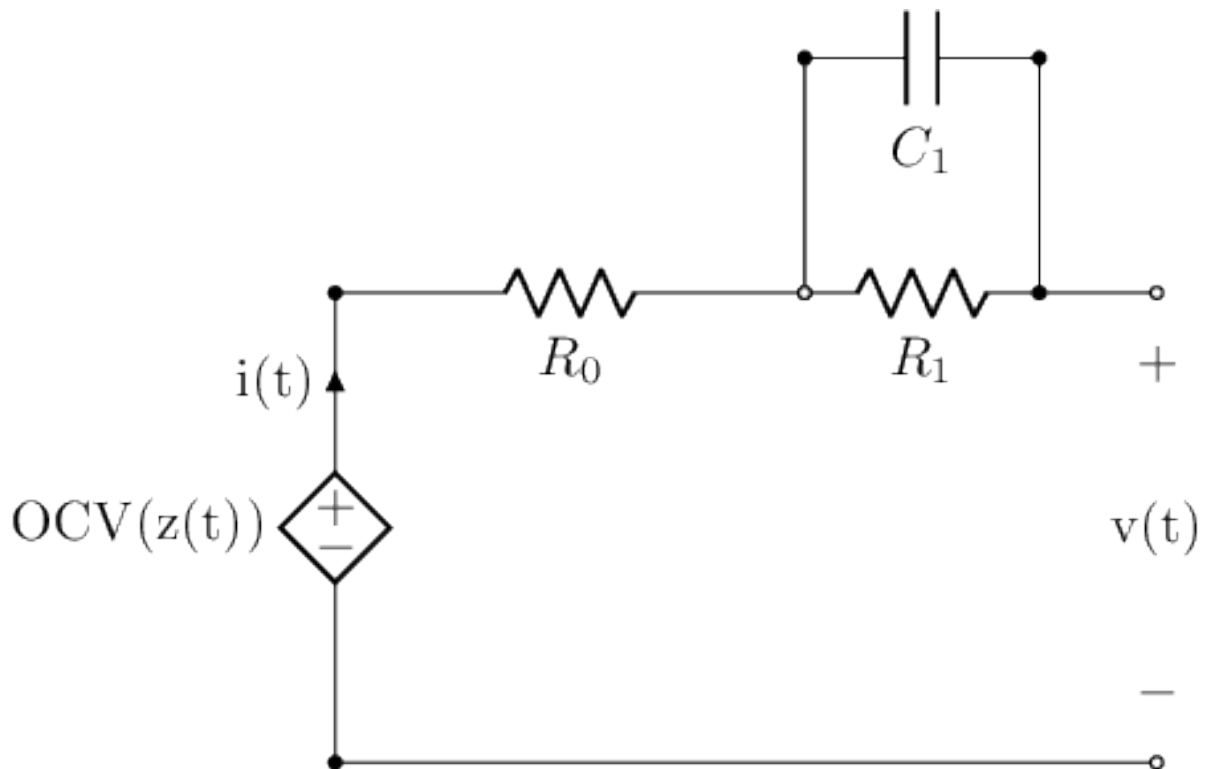
Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) para a saída  $v_{Batt}$  em regime permanente, com degrau de corrente de -30 A. O gráfico compara a influência relativa de cada parâmetro do modelo 2RC na variabilidade da tensão.

## APÊNDICE D – RESULTADOS COMPLEMENTARES DA BATERIA

### D.1 Modelo PNGV 1RC

As figuras desta seção foram obtidas no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_1rc\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

Figura 122 – Esquema do modelo de bateria 1RC utilizado nos notebooks exploratórios.



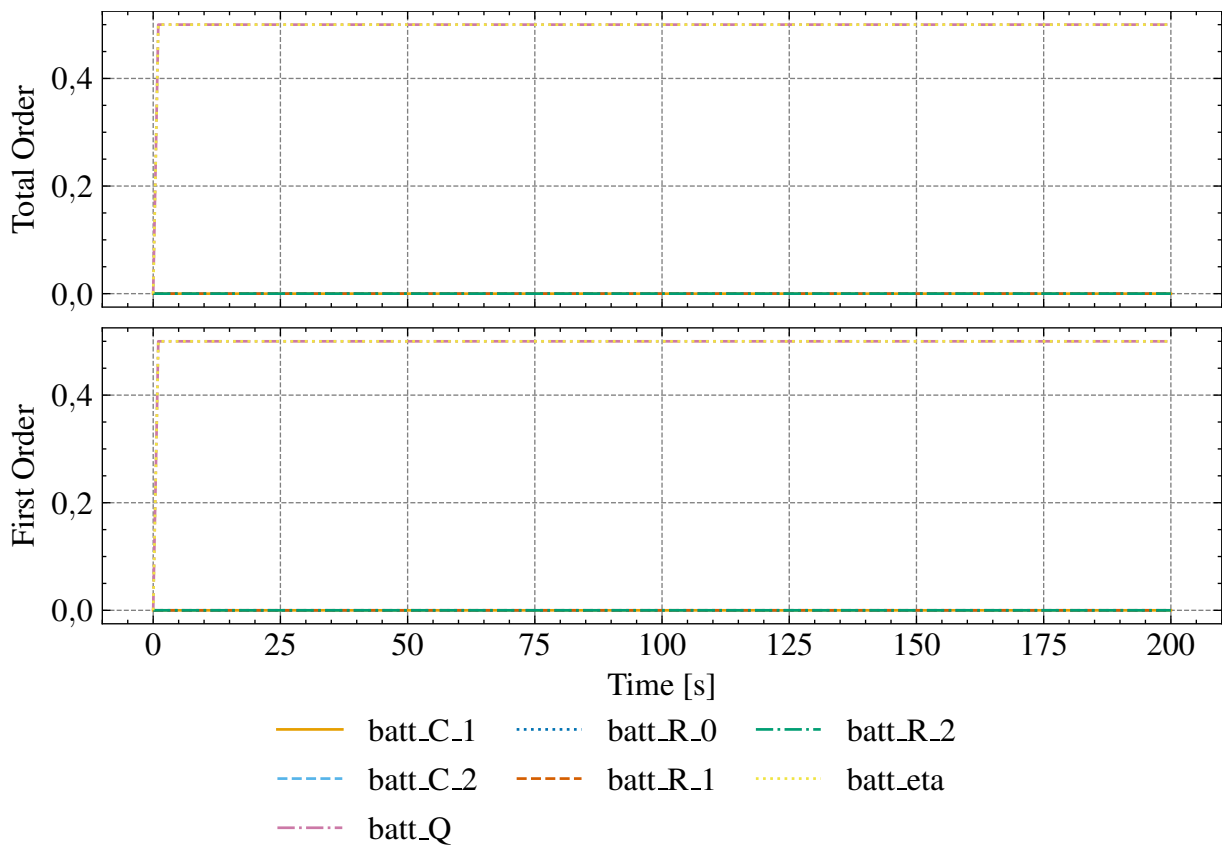
Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Diagrama do modelo elétrico equivalente da bateria utilizado na parametrização, destacando a estrutura dinâmica adotada para representar a tensão terminal e os efeitos transitórios.

### D.2 Modelo PNGV 2RC

As figuras desta seção foram obtidas no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/battery/PNGV\_2rc\_sensitivity.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

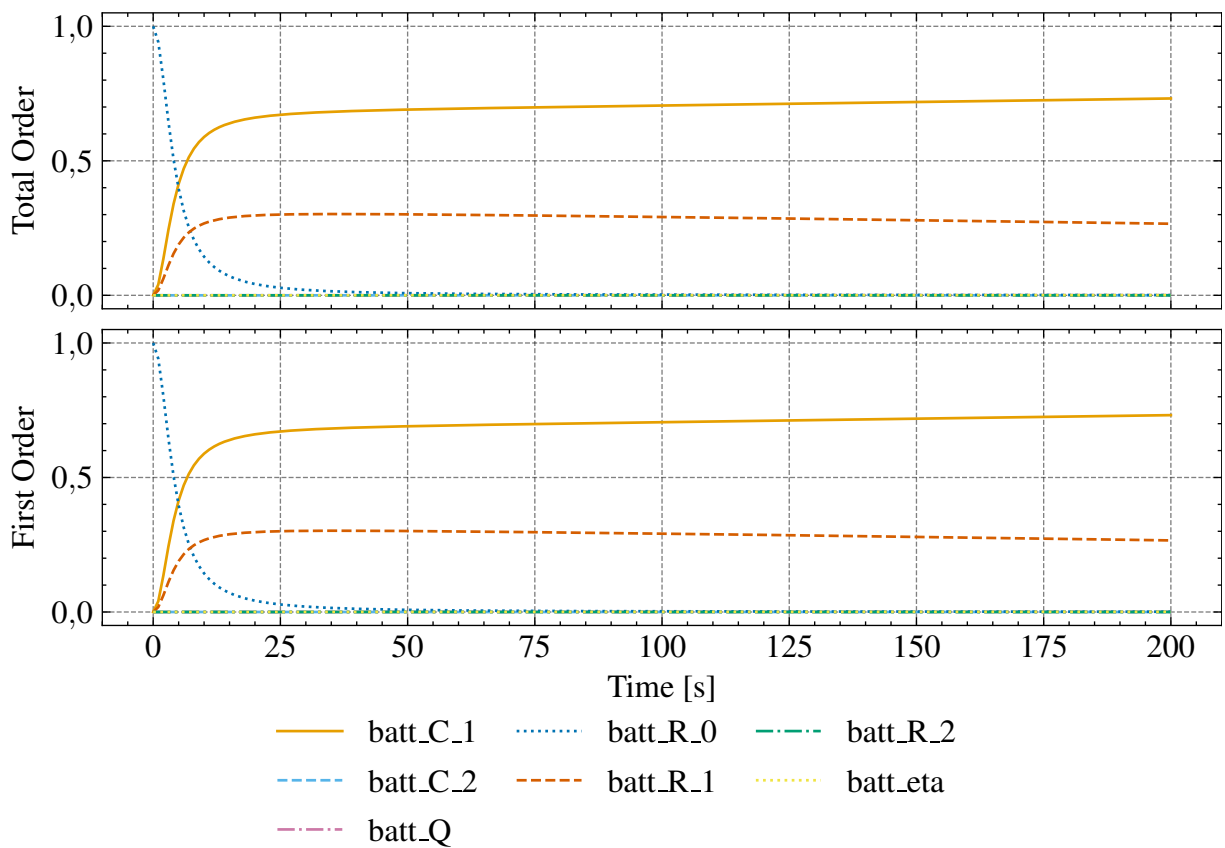
Figura 123 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt,ocv}$  durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $v_{Batt,ocv}$  para o caso de corrente de referência de -30 A, com índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e totais ( $S_T$ ) ao longo do tempo.

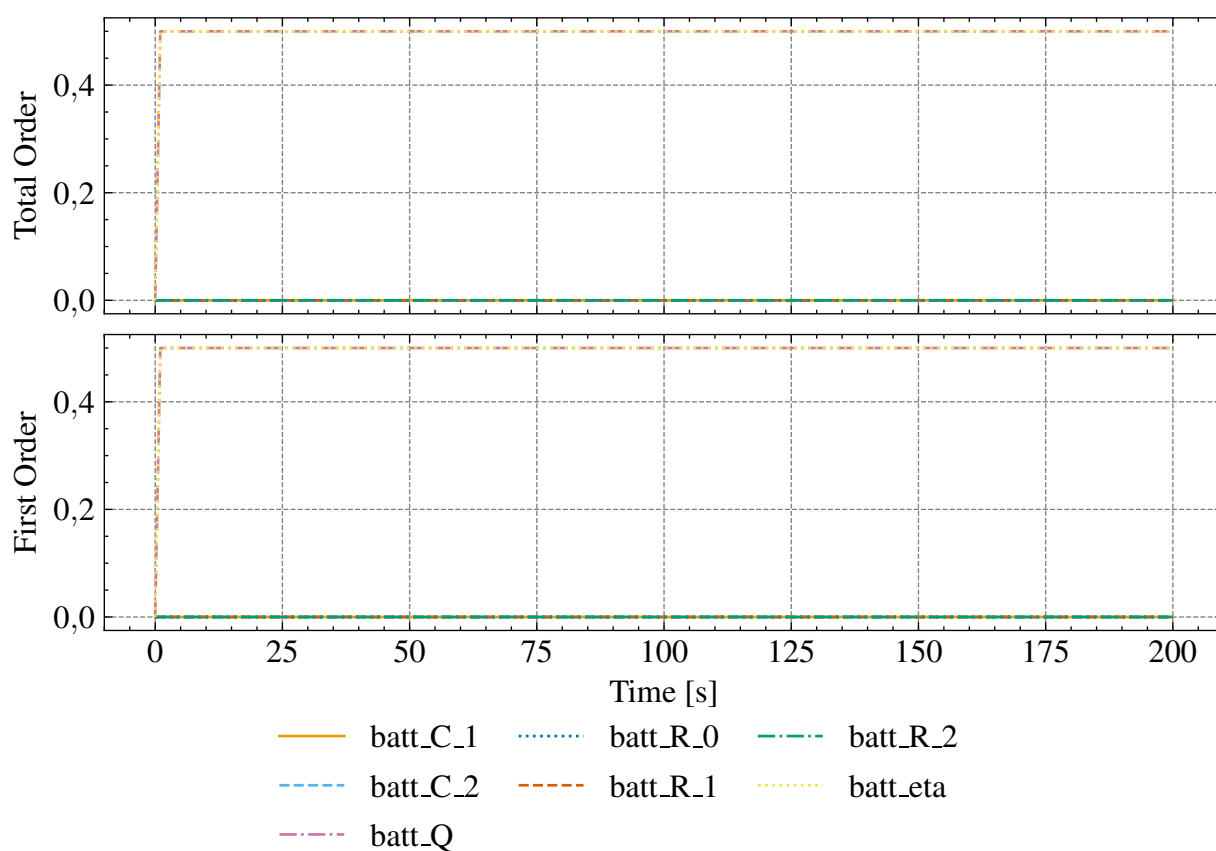
Figura 124 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $v_{Batt}$  para o caso de corrente de referência de -30 A, com índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e totais ( $S_T$ ) ao longo do tempo.

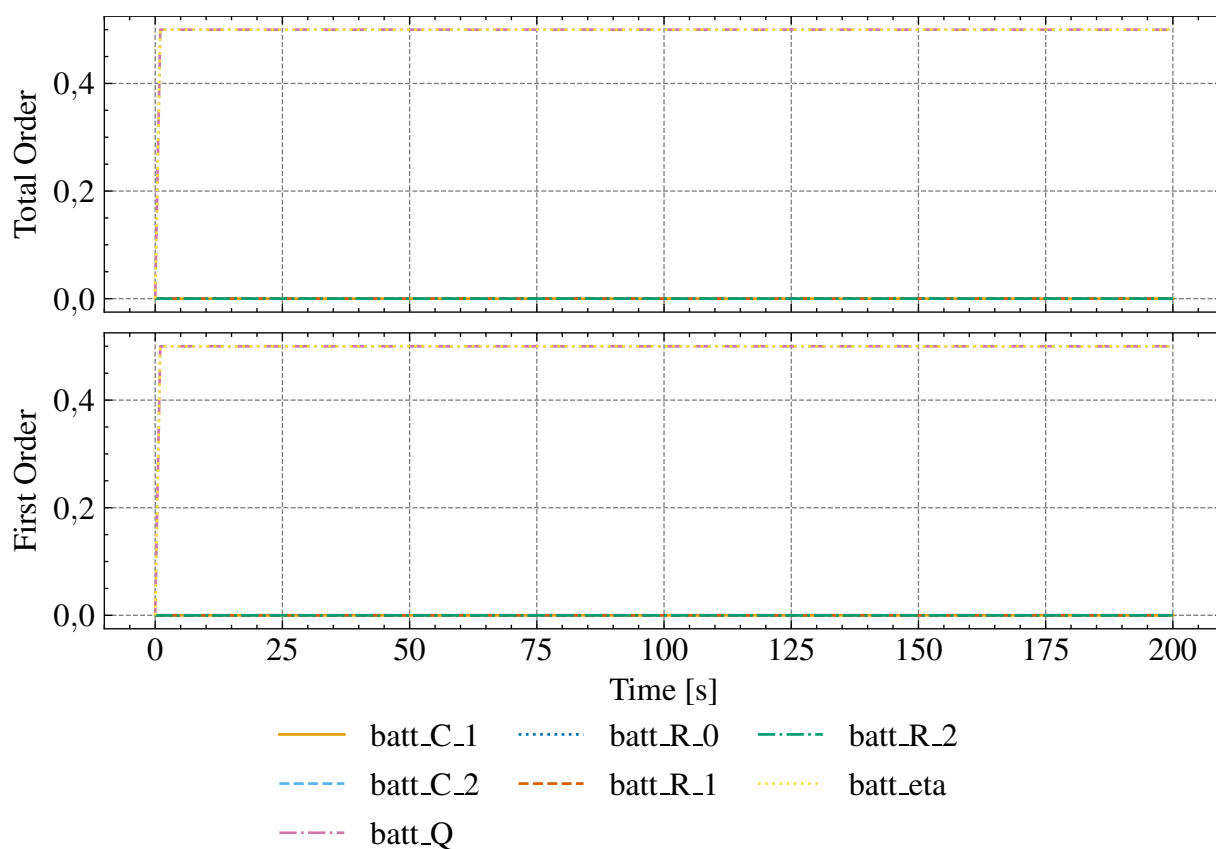
Figura 125 – Índices de Sobol para a saída  $batt\_z$  durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $z_{Batt}$  para o caso de corrente de referência de -30 A, com índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e totais ( $S_T$ ) ao longo do tempo.

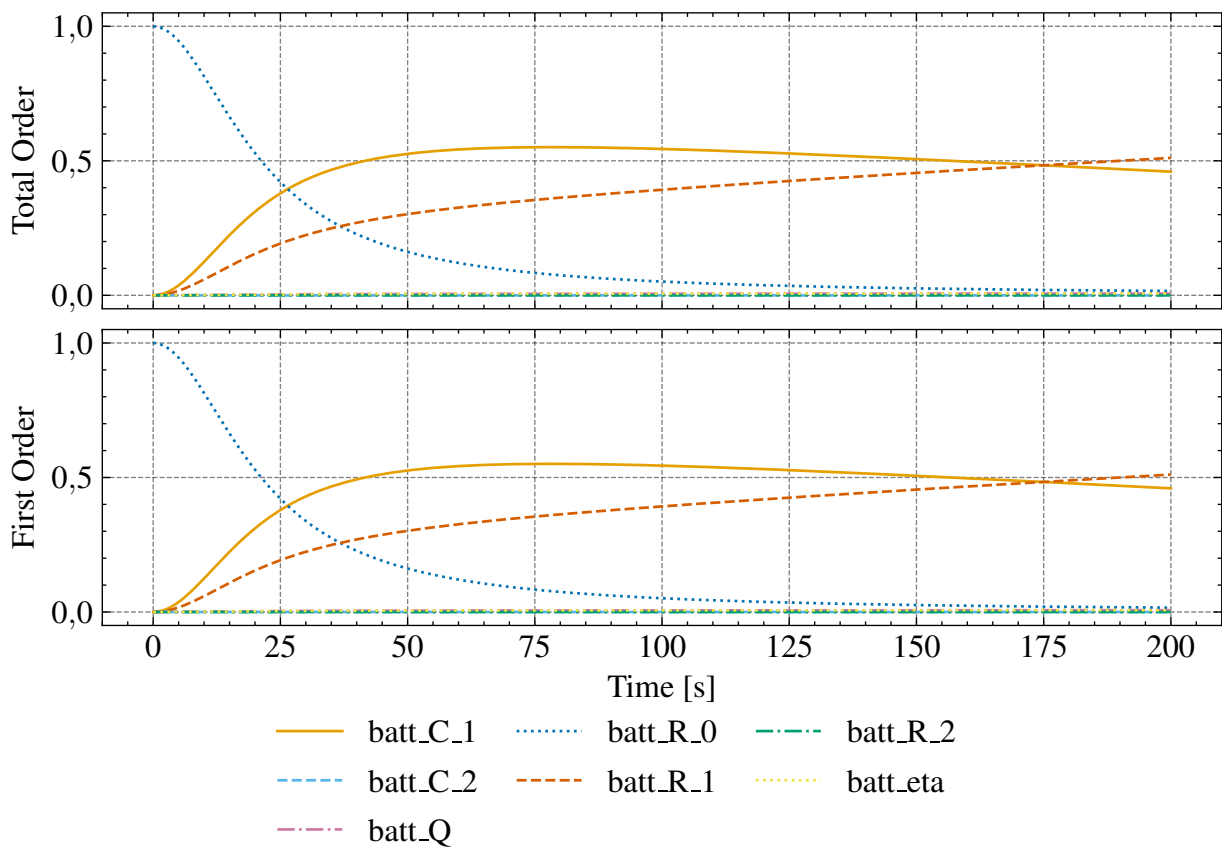
Figura 126 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt,ocv}$  durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $v_{Batt,ocv}$  para o caso de corrente de referência de 150 A, com índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e totais ( $S_T$ ) ao longo do tempo.

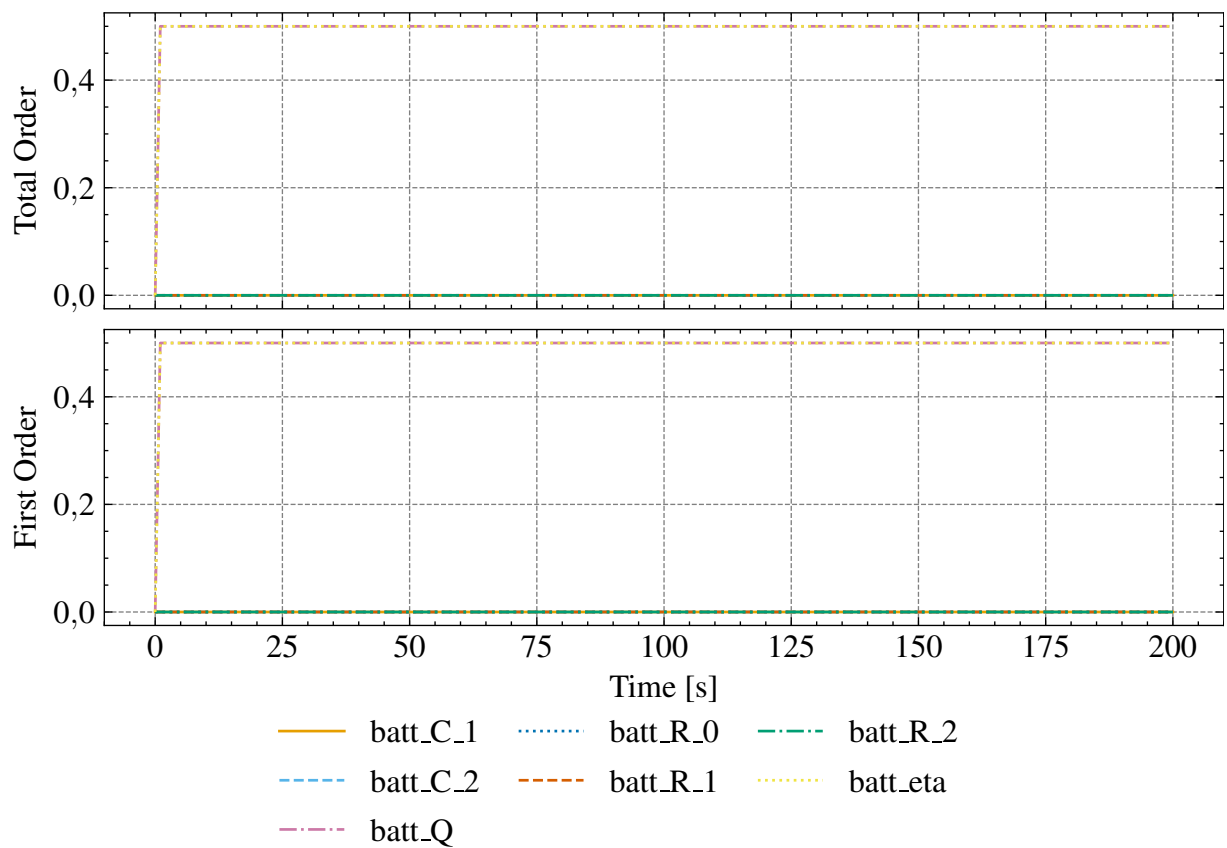
Figura 127 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $v_{Batt}$  para o caso de corrente de referência de 150 A, com índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e totais ( $S_T$ ) ao longo do tempo.

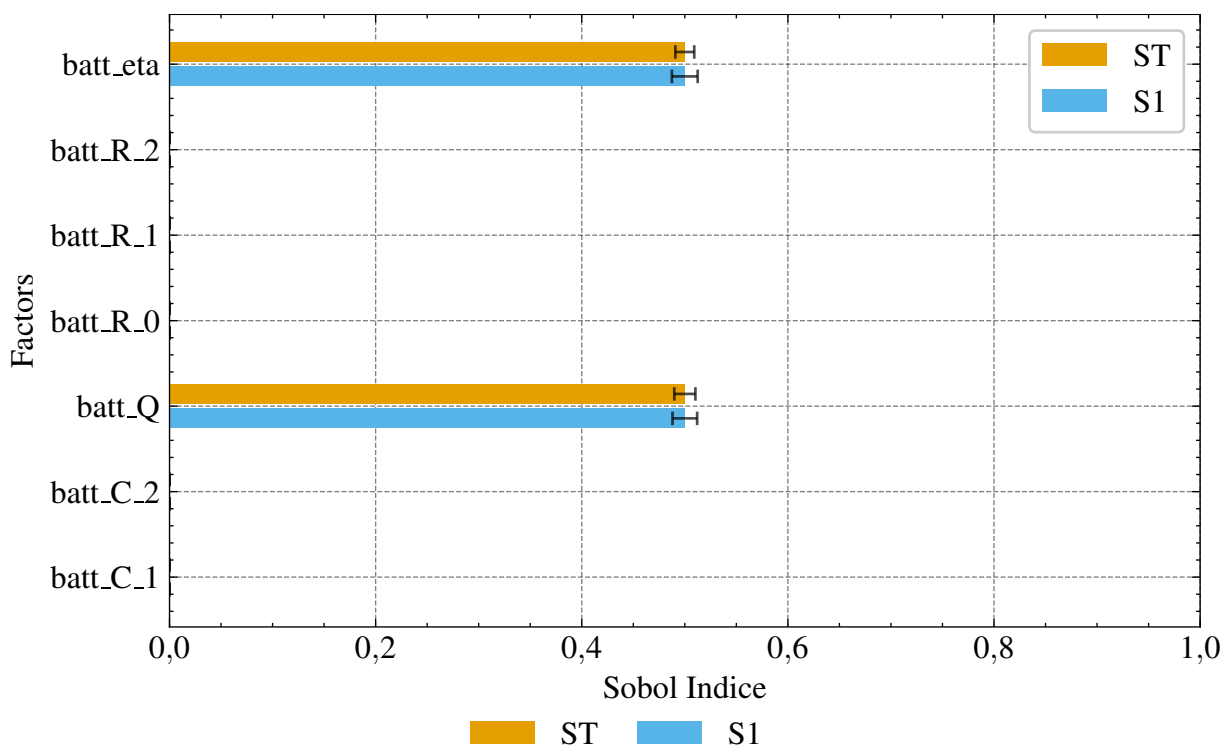
Figura 128 – Índices de Sobol para a saída  $z_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $z_{Batt}$  para o caso de corrente de referência de 150 A, com índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e totais ( $S_T$ ) ao longo do tempo.

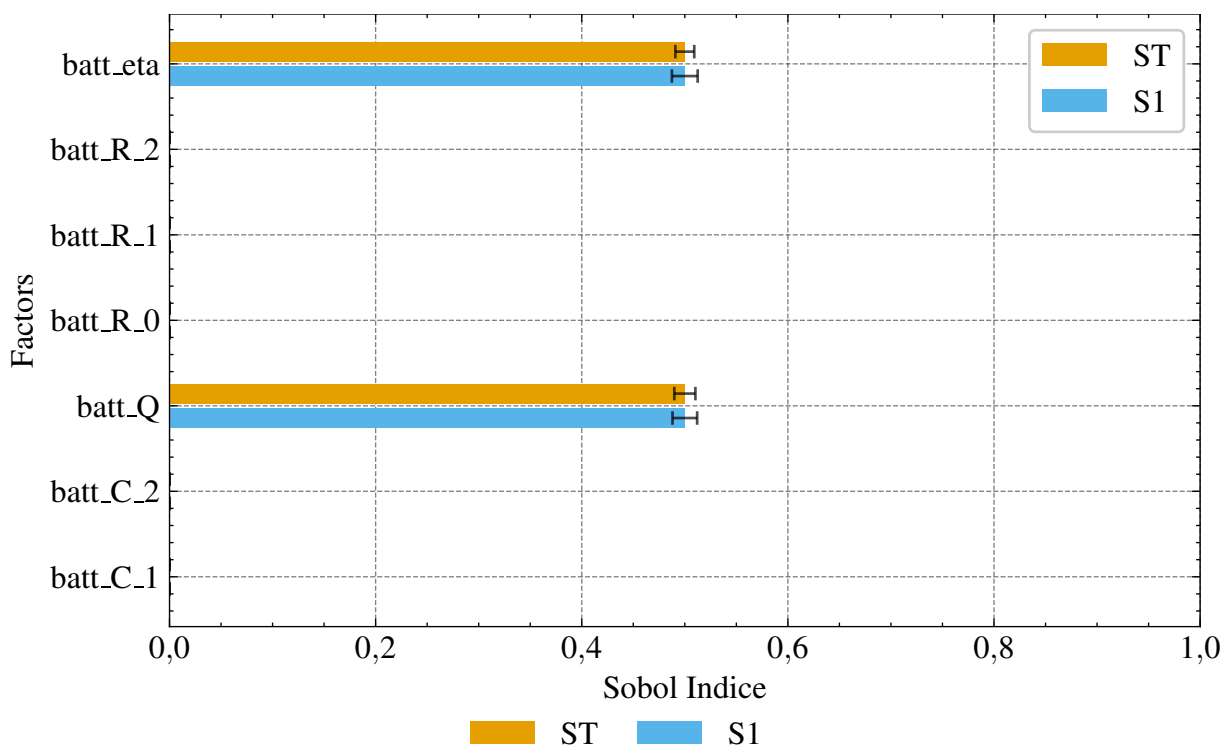
Figura 129 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt,ocv}$  em regime permanente, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Síntese em barras dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $v_{Batt,ocv}$  no caso de -30 A, destacando a importância relativa dos parâmetros.

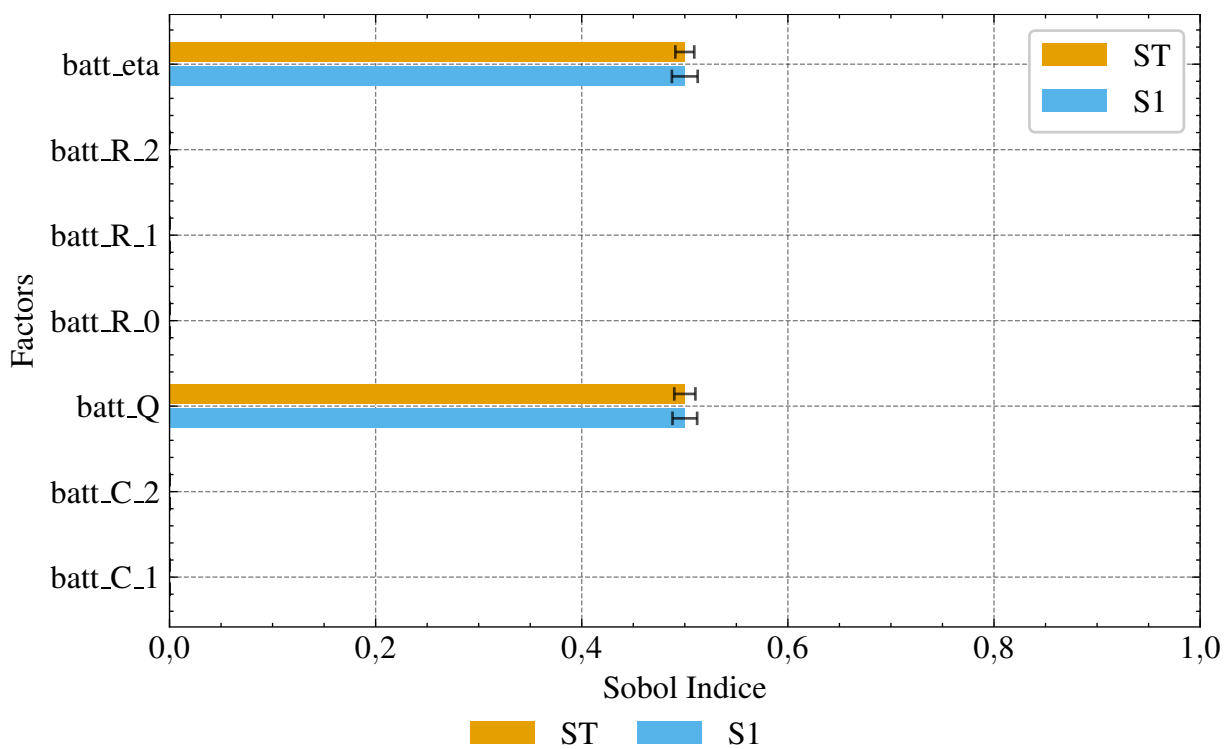
Figura 130 – Índices de Sobol para a saída  $z_{Batt}$  em regime permanente, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Síntese em barras dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $z_{Batt}$  no caso de -30 A, destacando a importância relativa dos parâmetros.

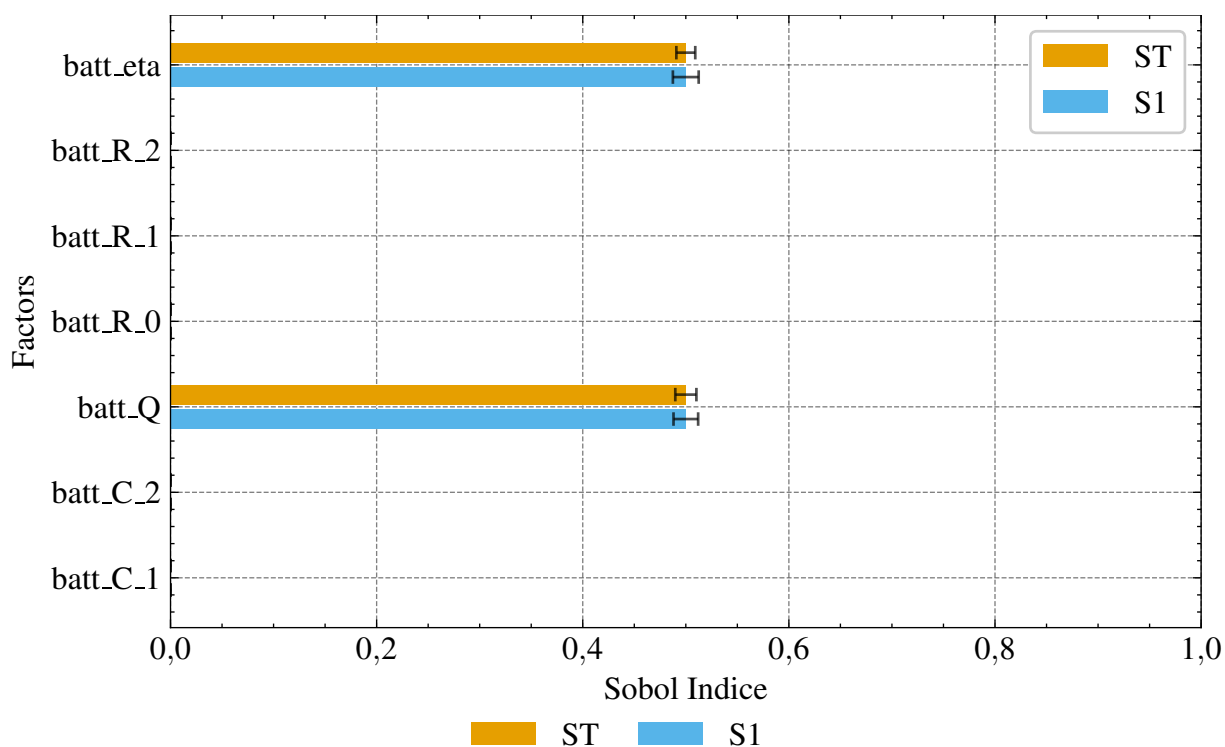
Figura 131 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt,ocv}$  em regime permanente, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Síntese em barras dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $v_{Batt,ocv}$  no caso de 150 A, destacando a importância relativa dos parâmetros.

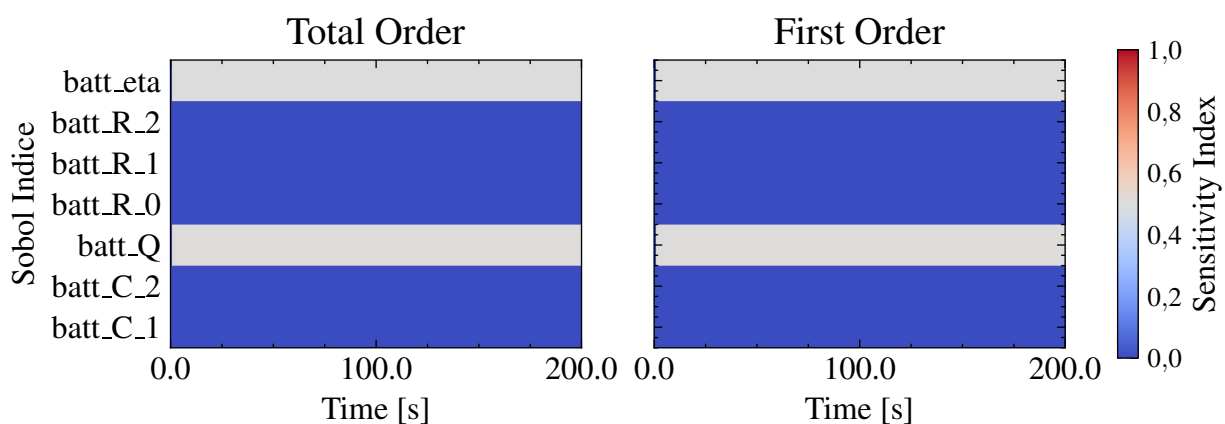
Figura 132 – Índices de Sobol para a saída  $z_{Batt}$  em regime permanente, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Síntese em barras dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $z_{Batt}$  no caso de 150 A, destacando a importância relativa dos parâmetros.

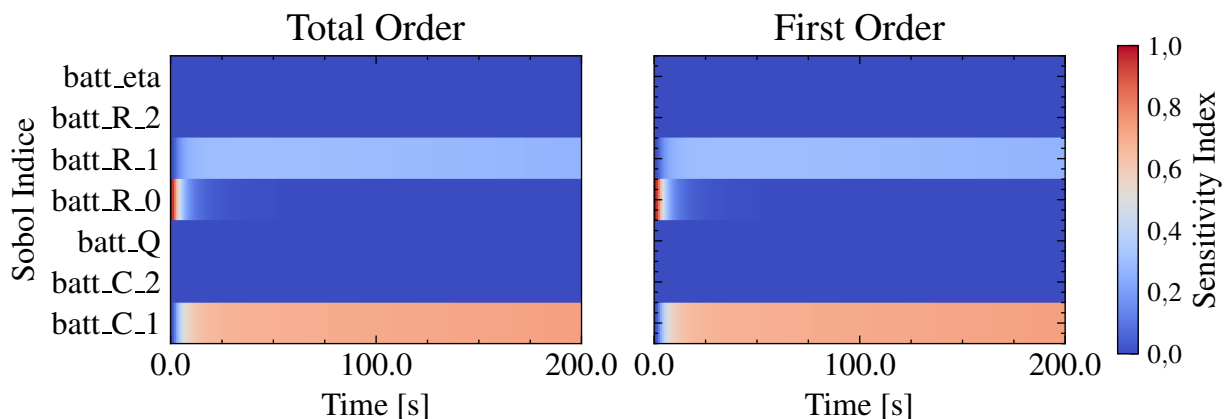
Figura 133 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt,ocv}$  durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $v_{Batt,ocv}$  no caso de -30 A, evidenciando a variação temporal da influência de cada parâmetro.

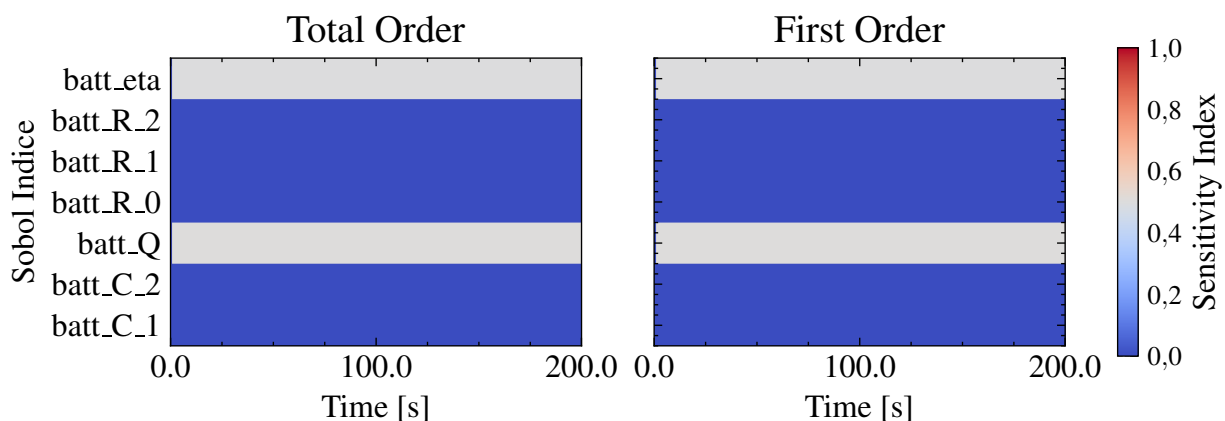
Figura 134 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $v_{Batt}$  no caso de -30 A, evidenciando a variação temporal da influência de cada parâmetro.

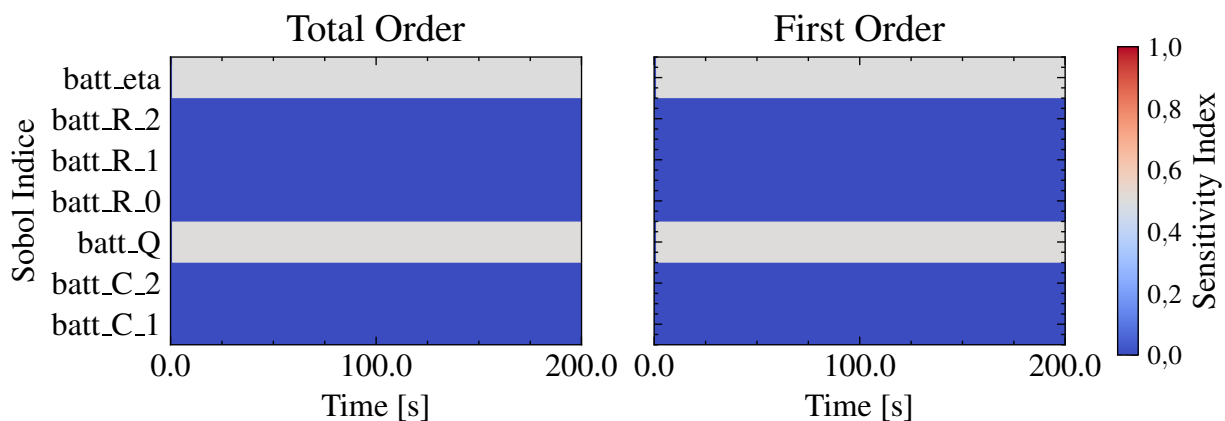
Figura 135 – Índices de Sobol para a saída  $z_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de -30 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $z_{Batt}$  no caso de -30 A, evidenciando a variação temporal da influência de cada parâmetro.

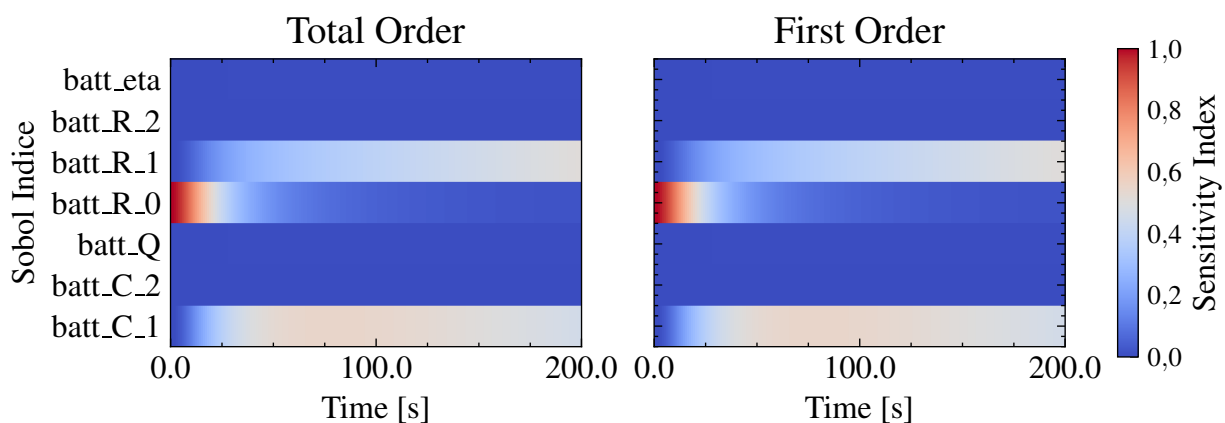
Figura 136 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt,ocv}$  durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $v_{Batt,ocv}$  no caso de 150 A, evidenciando a variação temporal da influência de cada parâmetro.

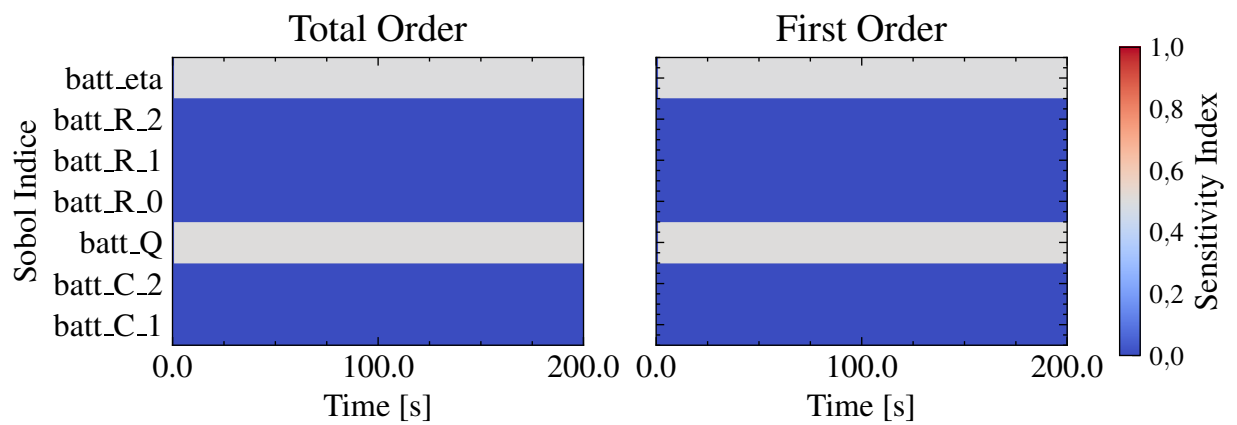
Figura 137 – Índices de Sobol para a saída  $v_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $v_{Batt}$  no caso de 150 A, evidenciando a variação temporal da influência de cada parâmetro.

Figura 138 – Índices de Sobol para a saída  $z_{Batt}$  durante o tempo, com degrau de 150 [A], com 16384 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de sensibilidade global (Sobol) para a saída  $z_{Batt}$  no caso de 150 A, evidenciando a variação temporal da influência de cada parâmetro.

## APÊNDICE E – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DO MOTOR

A análise de sensibilidade do motor é implementada nos *notebooks* <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_steady\_state\_sensitivity.ipynb> e <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_free\_rotor\_step\_sensitivity.ipynb> (CARDOSO, 2026b). No caso do ensaio dinâmico, o *notebook* carrega como entrada os parâmetros do ajuste em regime permanente a partir de <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_steady\_state\_params.json>. Os parâmetros do modelo avaliados e utilizados como referência são os descritos na Tabela 7.

### E.1 Ensaio em regime permanente (fabricante)

**Tabela 19 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf	
motor_i	motor_R_A	S1	0,25	0,01	
		ST	0,25	0,00	
	motor_K_V	S1	0,25	0,00	
		ST	0,25	0,00	
	motor_K_Q	S1	0,25	0,01	
		ST	0,25	0,00	
	motor_B	S1	0,25	0,01	
		ST	0,25	0,00	
	(motor_R_A, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_B)		S2	0,00	0,01
	(motor_K_Q, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01
motor_w	motor_R_A	S1	0,25	0,00	
		ST	0,25	0,00	
	motor_K_V	S1	0,25	0,00	
		ST	0,25	0,00	
	motor_K_Q	S1	0,25	0,00	
		ST	0,25	0,00	
	motor_B	S1	0,25	0,01	
		ST	0,25	0,00	
	(motor_R_A, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_B)		S2	-0,00	0,01
	(motor_K_Q, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01

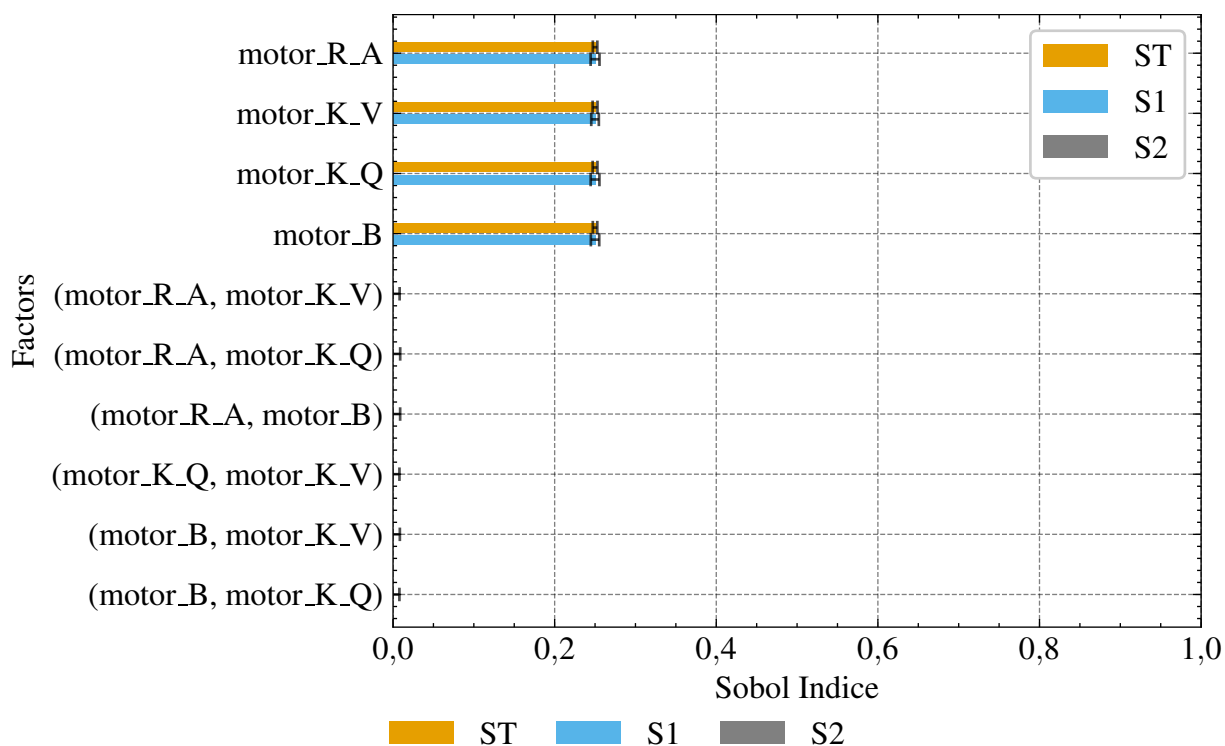
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Tabela 20 – Índices de Sobol em regime permanente

output	factor	metric	value	conf	
motor_i	motor_R_A	S1	0,38	0,01	
		ST	0,38	0,00	
	motor_K_V	S1	0,12	0,00	
		ST	0,12	0,00	
	motor_K_Q	S1	0,38	0,01	
		ST	0,38	0,00	
	motor_B	S1	0,12	0,00	
		ST	0,12	0,00	
	(motor_R_A, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_B)		S2	0,00	0,01
	(motor_K_Q, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01
motor_w	motor_R_A	S1	0,38	0,01	
		ST	0,38	0,00	
	motor_K_V	S1	0,12	0,00	
		ST	0,12	0,00	
	motor_K_Q	S1	0,38	0,01	
		ST	0,38	0,00	
	motor_B	S1	0,12	0,00	
		ST	0,12	0,00	
	(motor_R_A, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01
	(motor_R_A, motor_B)		S2	0,00	0,01
	(motor_K_Q, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_V)		S2	0,00	0,01
	(motor_B, motor_K_Q)		S2	0,00	0,01

Fonte: Elaboração Própria (2026).

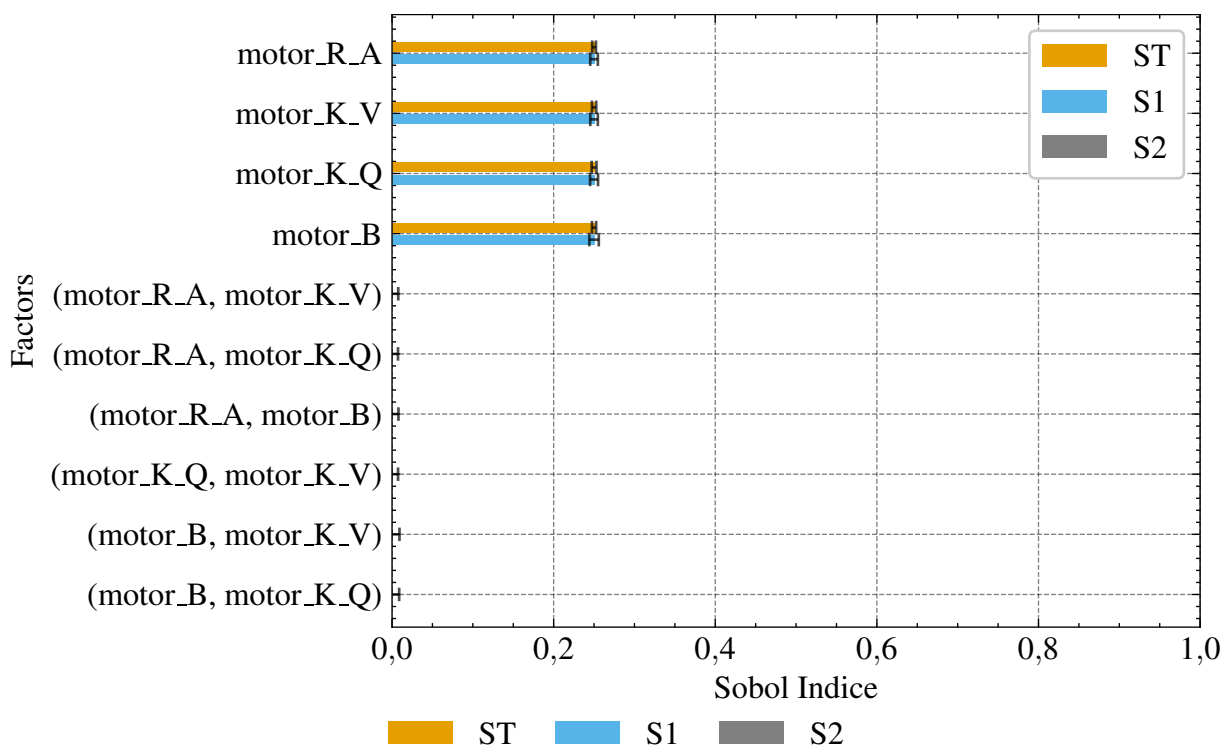
Figura 139 – Índices de Sobol para a saída motor\_i em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $i_{Motor}$  com degrau de 36 V e 0 N·m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

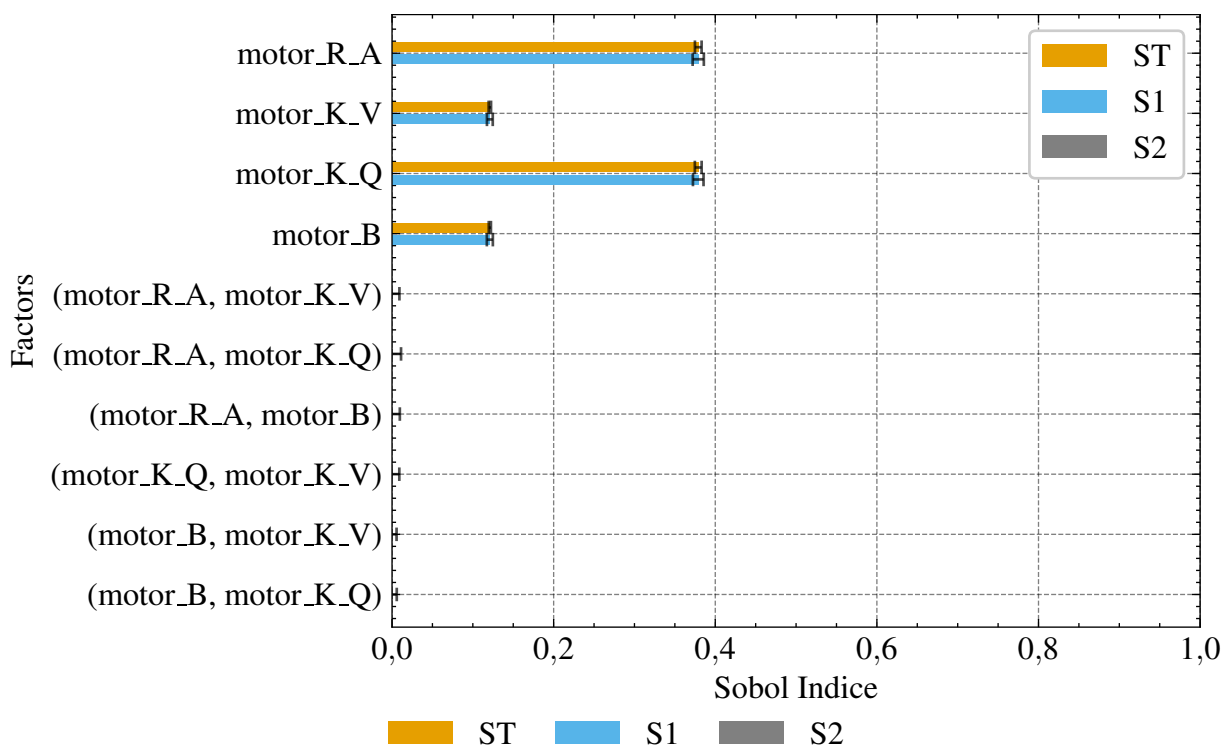
Figura 140 – Índices de Sobol para a saída motor\_w em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $\omega_{Motor}$  com degrau de 36 V e 0 N·m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

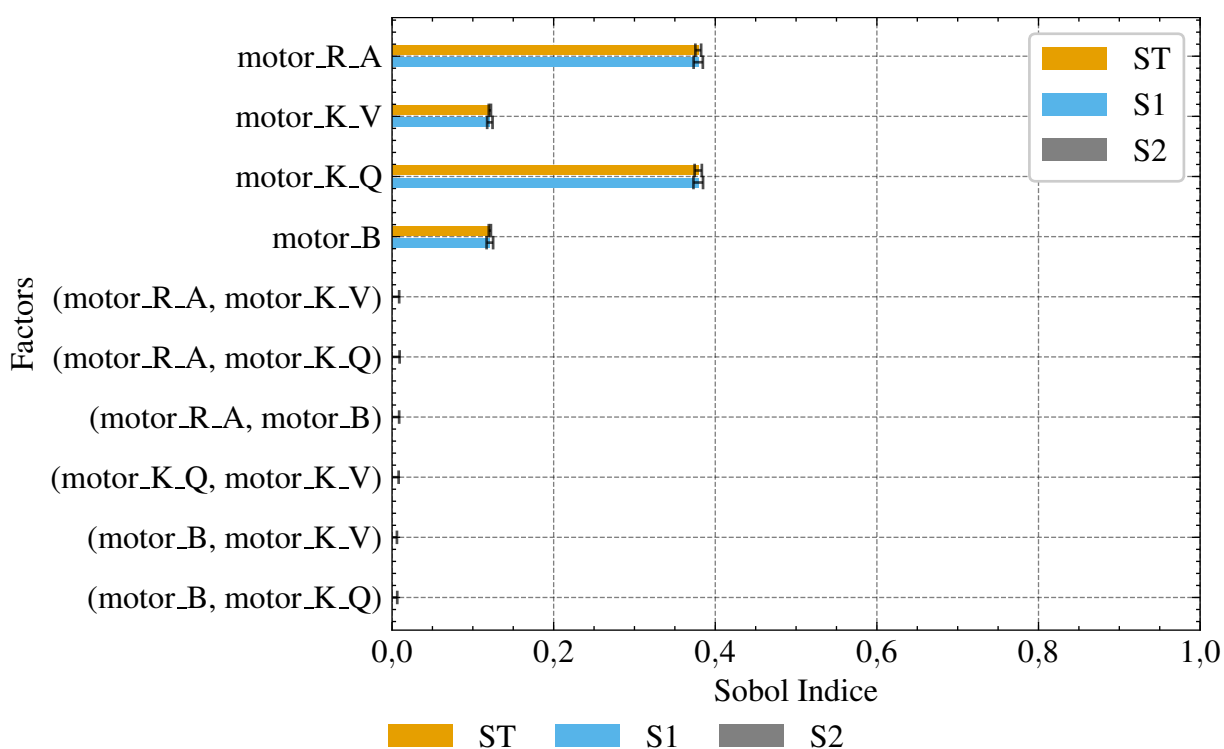
Figura 141 – Índices de Sobol para a saída motor\_i em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $i_{Motor}$  com degrau de 36 V e 10 N·m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

Figura 142 – Índices de Sobol para a saída motor\_w em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $\omega_{Motor}$  com degrau de 36 V e 10 N·m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

## E.2 Ensaio de degrau com eixo livre

**Tabela 21 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf
motor_i	motor_R_A	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_L_A	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_K_V	S1	0,99	0,01
		ST	0,99	0,01
	motor_K_Q	S1	0,01	0,00
		ST	0,01	0,00
	motor_I_r	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_B	S1	0,01	0,00
		ST	0,01	0,00
motor_w	motor_R_A	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_L_A	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_K_V	S1	1,00	0,01
		ST	1,00	0,01
	motor_K_Q	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_I_r	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_B	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00

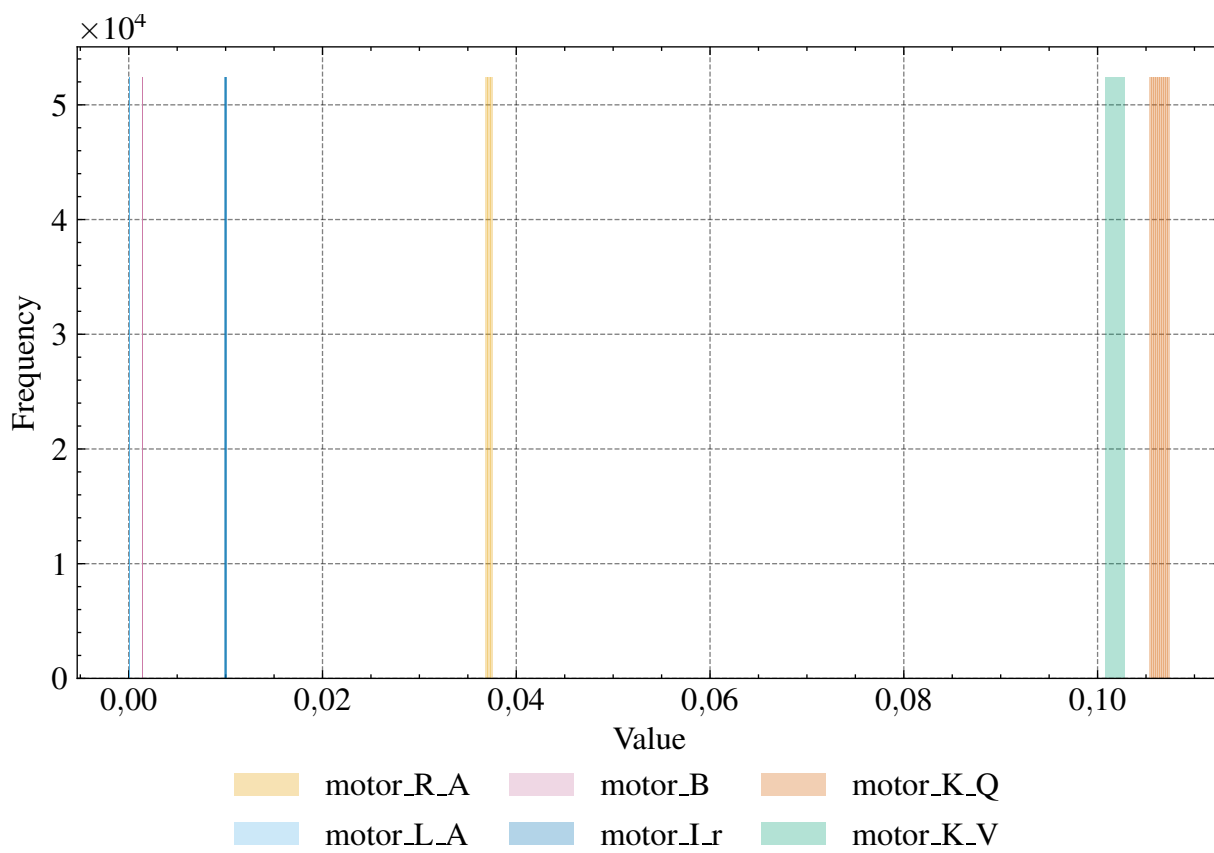
Fonte: Elaboração Própria (2026).

**Tabela 22 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf	
motor_i	motor_R_A	S1	0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	
	motor_L_A	S1	-0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	
	motor_K_V	S1	0,28	0,00	
		ST	0,28	0,00	
	motor_K_Q	S1	0,72	0,01	
		ST	0,72	0,01	
	motor_I_r	S1	0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	
	motor_B	S1	0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	
	motor_w	motor_R_A	S1	0,01	0,00
			ST	0,01	0,00
motor_L_A		S1	0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	
motor_K_V		S1	0,98	0,01	
		ST	0,98	0,01	
motor_K_Q		S1	0,01	0,00	
		ST	0,01	0,00	
motor_I_r		S1	-0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	
motor_B		S1	0,00	0,00	
		ST	0,00	0,00	

Fonte: Elaboração Própria (2026).

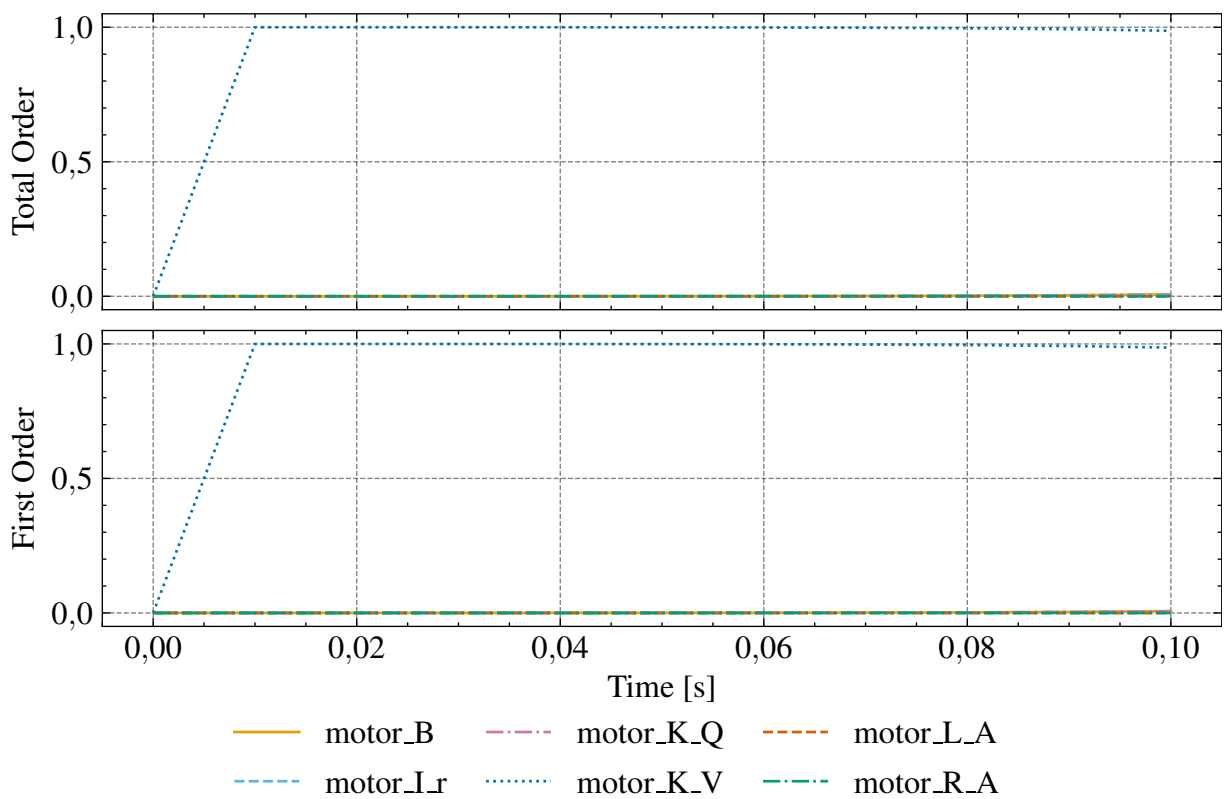
Figura 143 – Distribuição dos valores para cada fator



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Distribuição dos valores amostrados para cada parâmetro do modelo do motor no planejamento da análise de sensibilidade.

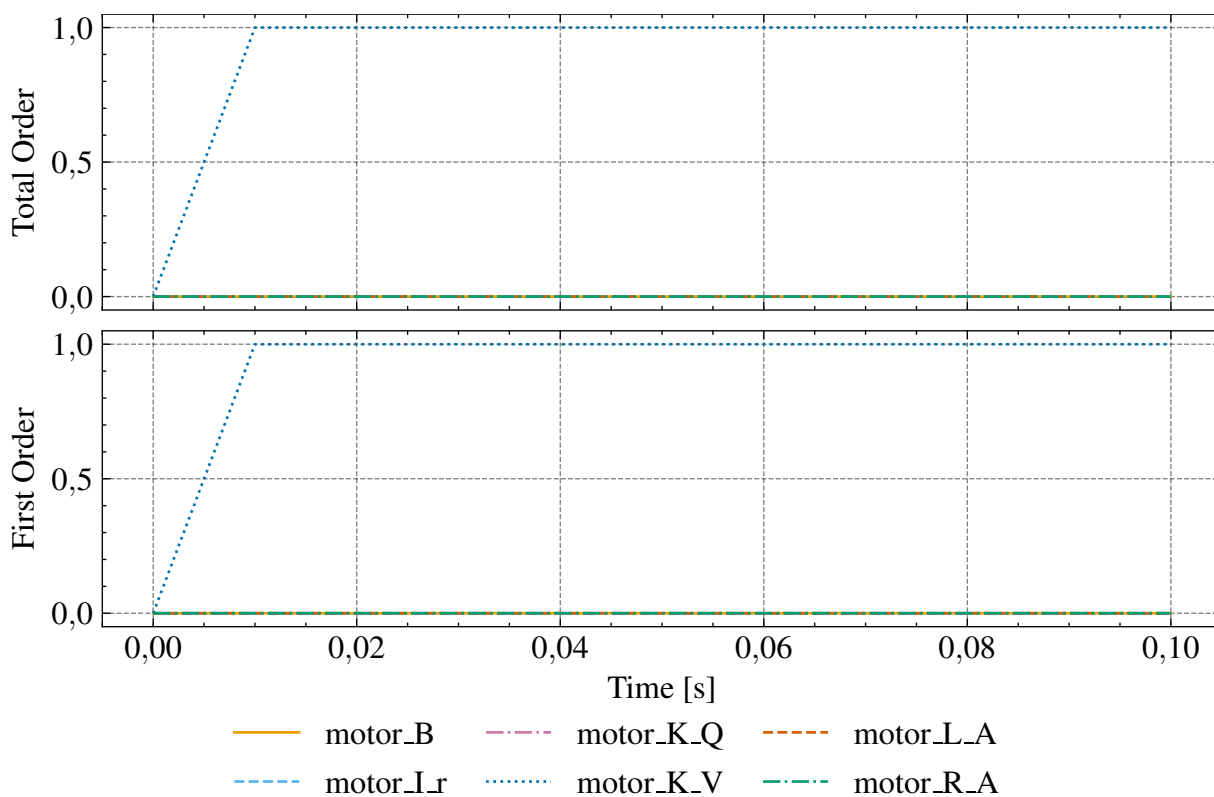
Figura 144 – Índices de Sobol para a saída motor\_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol ao longo do tempo para a saída  $i_{Motor}$ , com degrau de 36 V e 0 N.m. As curvas mostram os índices de primeira e total ordem, evidenciando a evolução da sensibilidade durante o transiente.

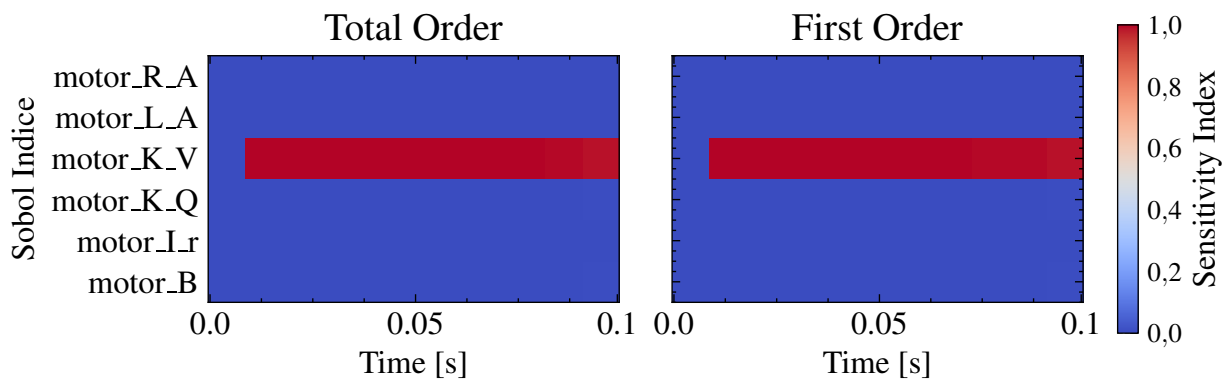
Figura 145 – Índices de Sobol para a saída motor\_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol ao longo do tempo para a saída  $\omega_{Motor}$ , com degrau de 36 V e 0 N.m. As curvas mostram os índices de primeira e total ordem, evidenciando a evolução da sensibilidade durante o transiente.

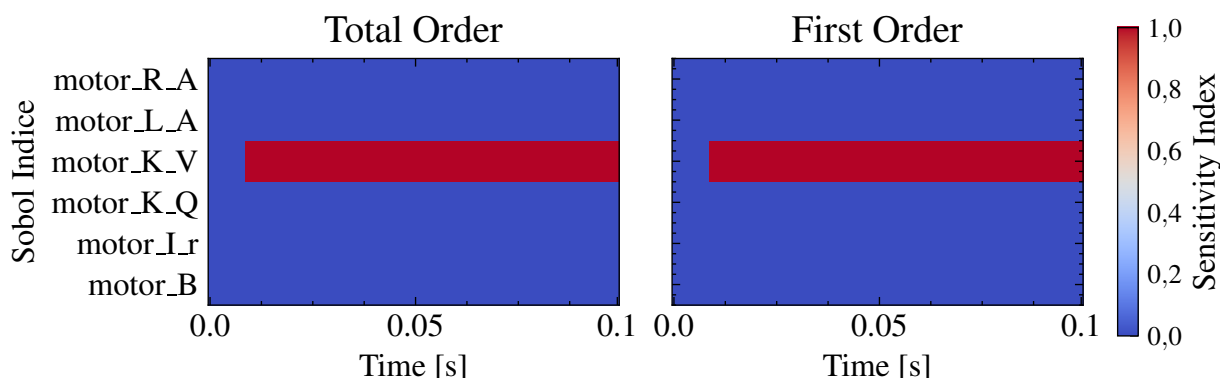
Figura 146 – Índices de Sobol para a saída motor\_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de Sobol para a saída  $i_{Motor}$  ao longo do tempo, com degrau de 36 V e 0 N.m. A figura separa primeira ordem e ordem total, destacando a contribuição temporal de cada parâmetro.

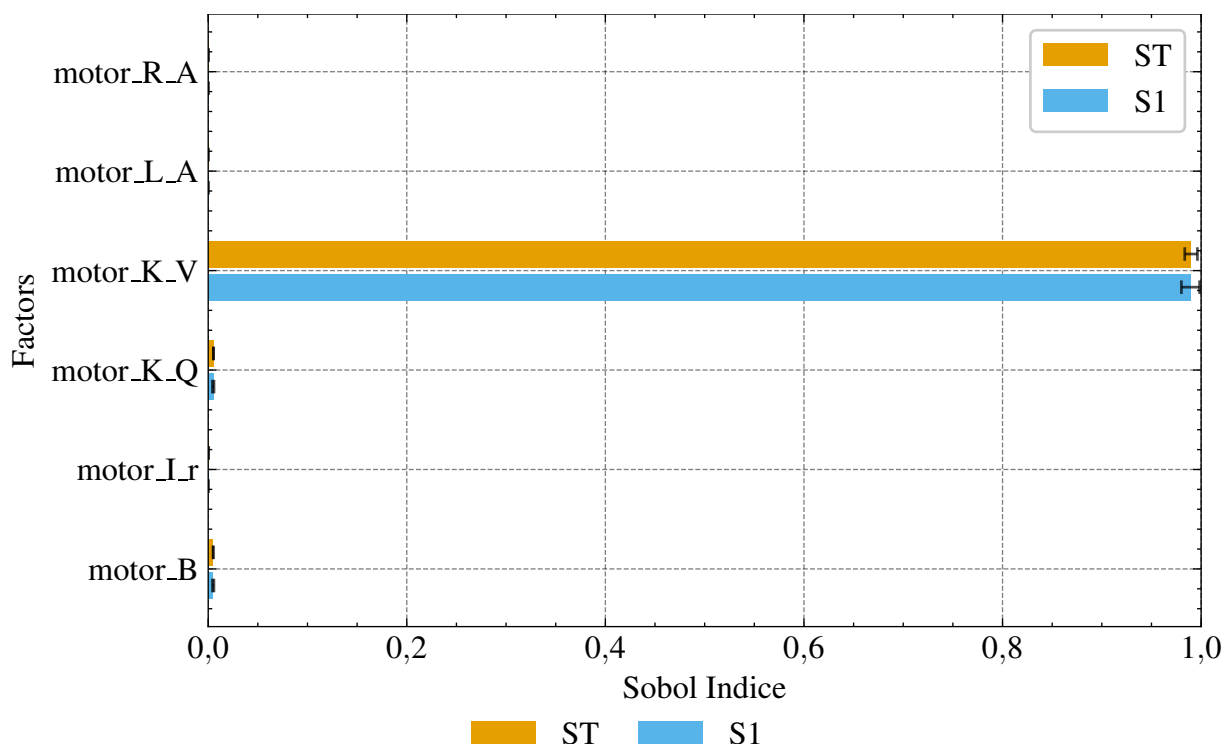
Figura 147 – Índices de Sobol para a saída motor\_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de Sobol para a saída  $\omega_{Motor}$  ao longo do tempo, com degrau de 36 V e 0 N.m. A figura separa primeira ordem e ordem total, destacando a contribuição temporal de cada parâmetro.

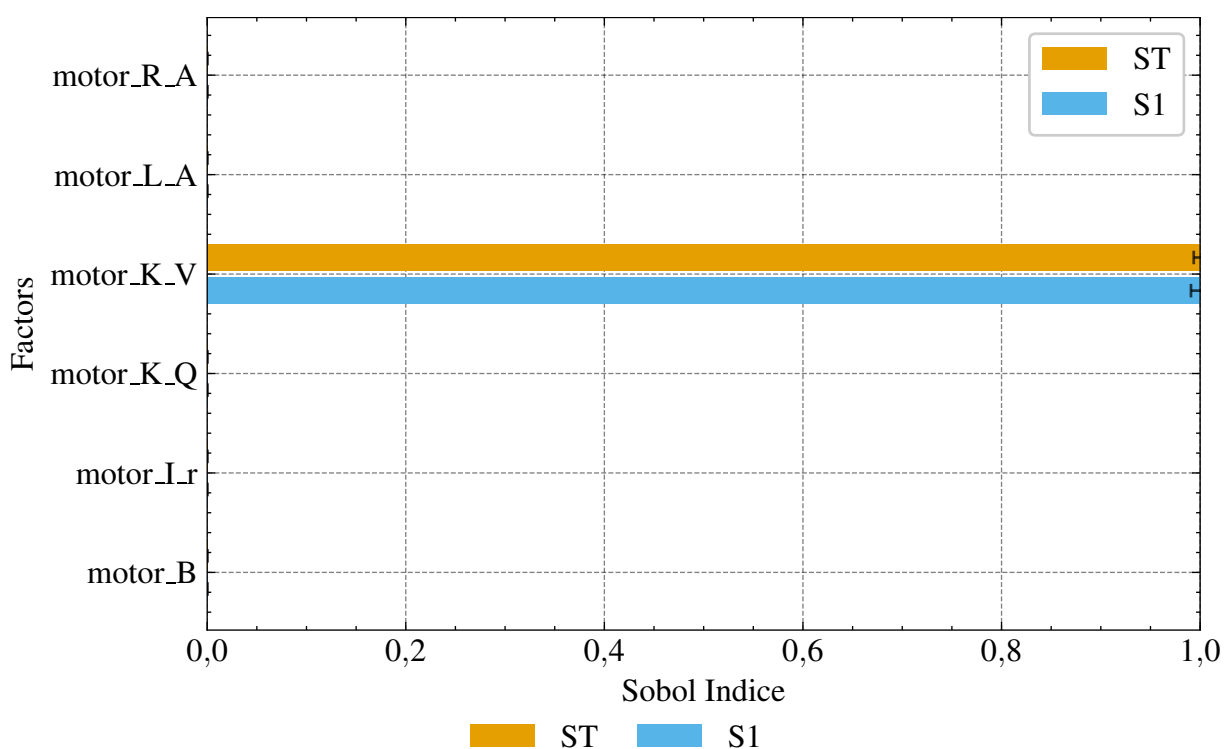
Figura 148 – Índices de Sobol para a saída motor\_i em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $i_{Motor}$  com degrau de 36 V e 0 N.m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

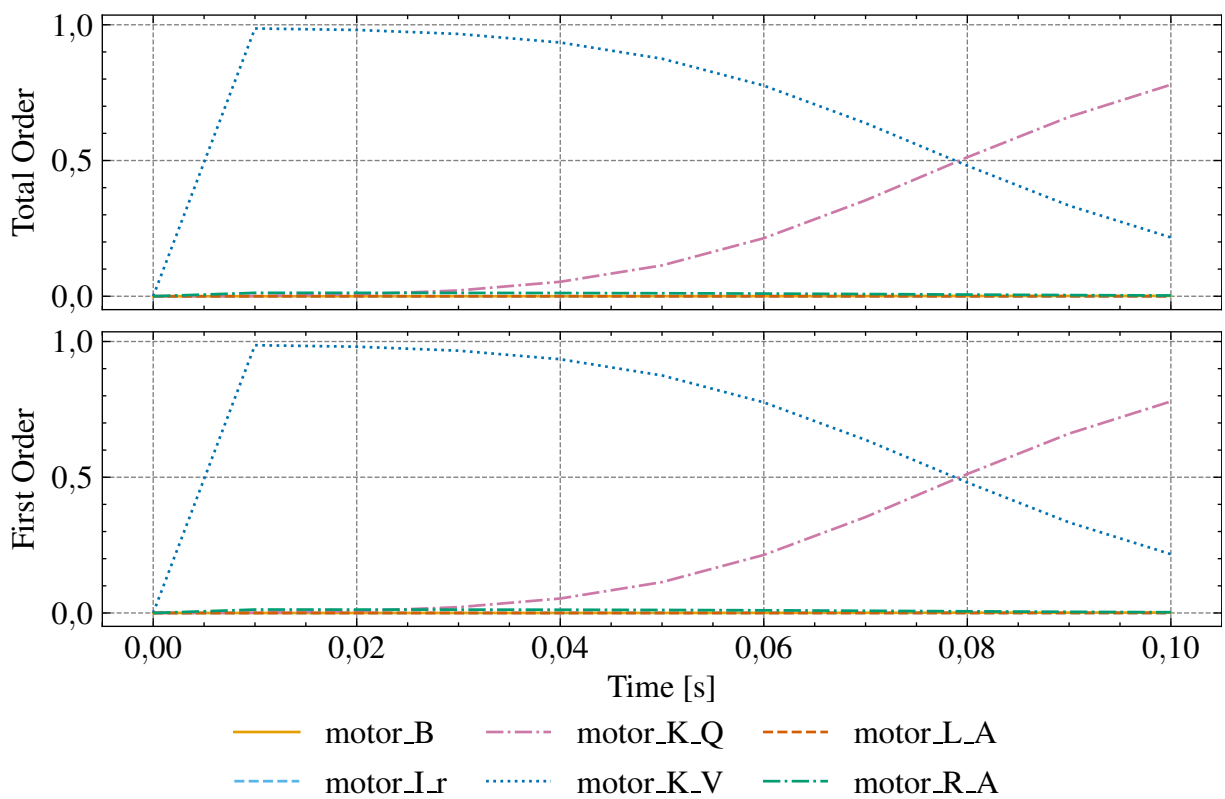
Figura 149 – Índices de Sobol para a saída motor\_w em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 0 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $\omega_{Motor}$  com degrau de 36 V e 0 N·m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

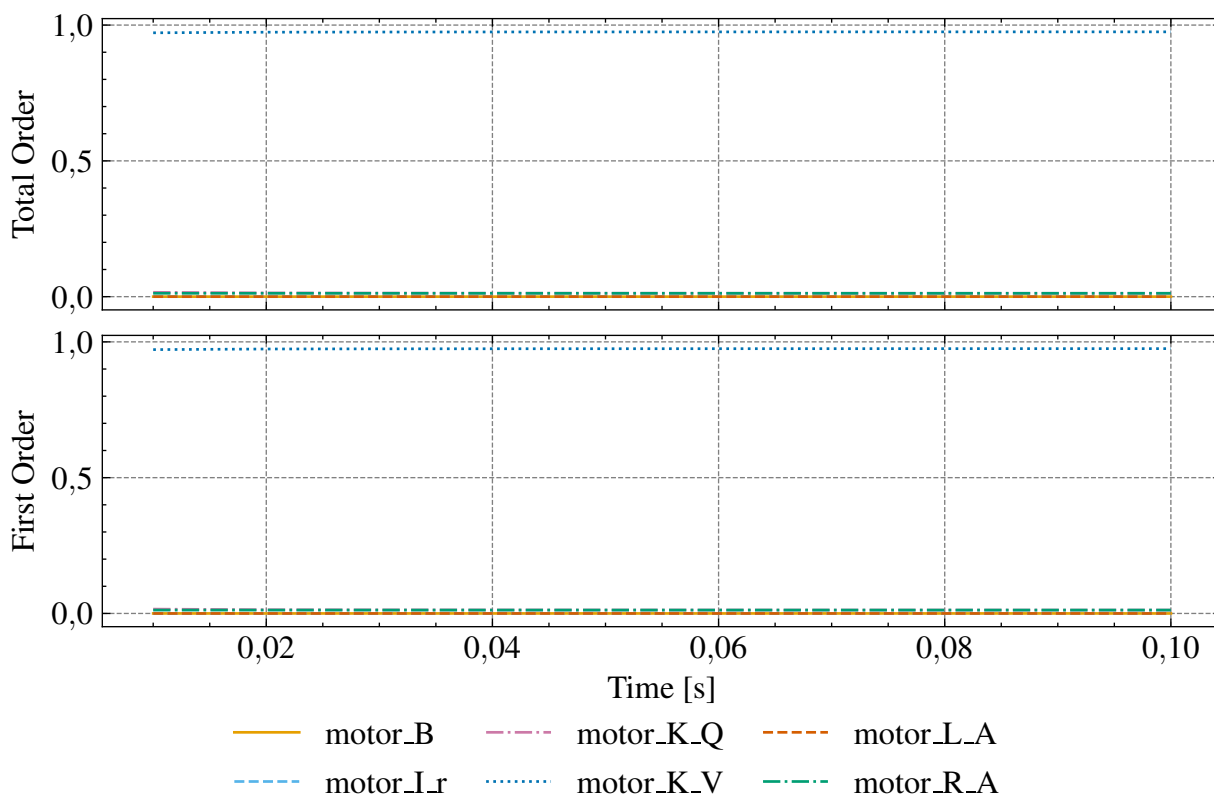
Figura 150 – Índices de Sobol para a saída motor\_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol ao longo do tempo para a saída  $i_{Motor}$ , com degrau de 36 V e 10 N·m. As curvas mostram os índices de primeira e total ordem, evidenciando a evolução da sensibilidade durante o transiente.

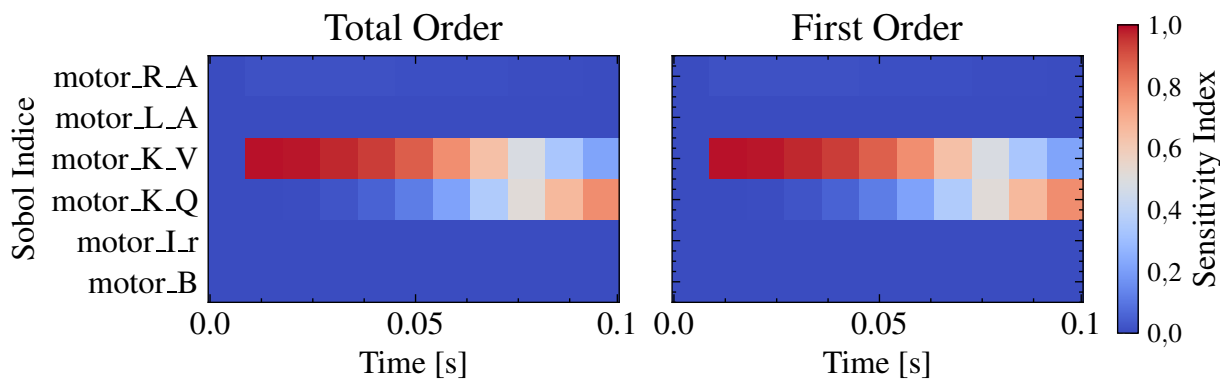
Figura 151 – Índices de Sobol para a saída motor\_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol ao longo do tempo para a saída  $\omega_{Motor}$ , com degrau de 36 V e 10 N.m. As curvas mostram os índices de primeira e total ordem, evidenciando a evolução da sensibilidade durante o transiente.

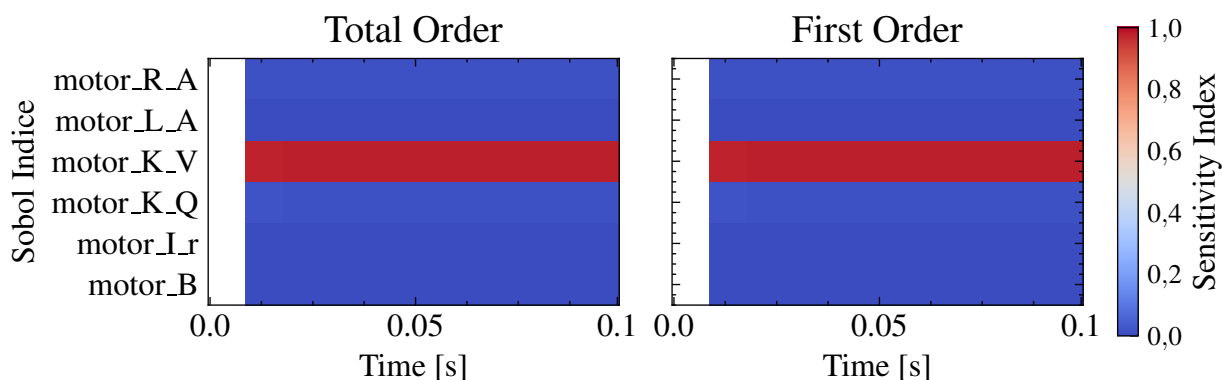
Figura 152 – Índices de Sobol para a saída motor\_i durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de Sobol para a saída  $i_{Motor}$  ao longo do tempo, com degrau de 36 V e 10 N.m. A figura separa primeira ordem e ordem total, destacando a contribuição temporal de cada parâmetro.

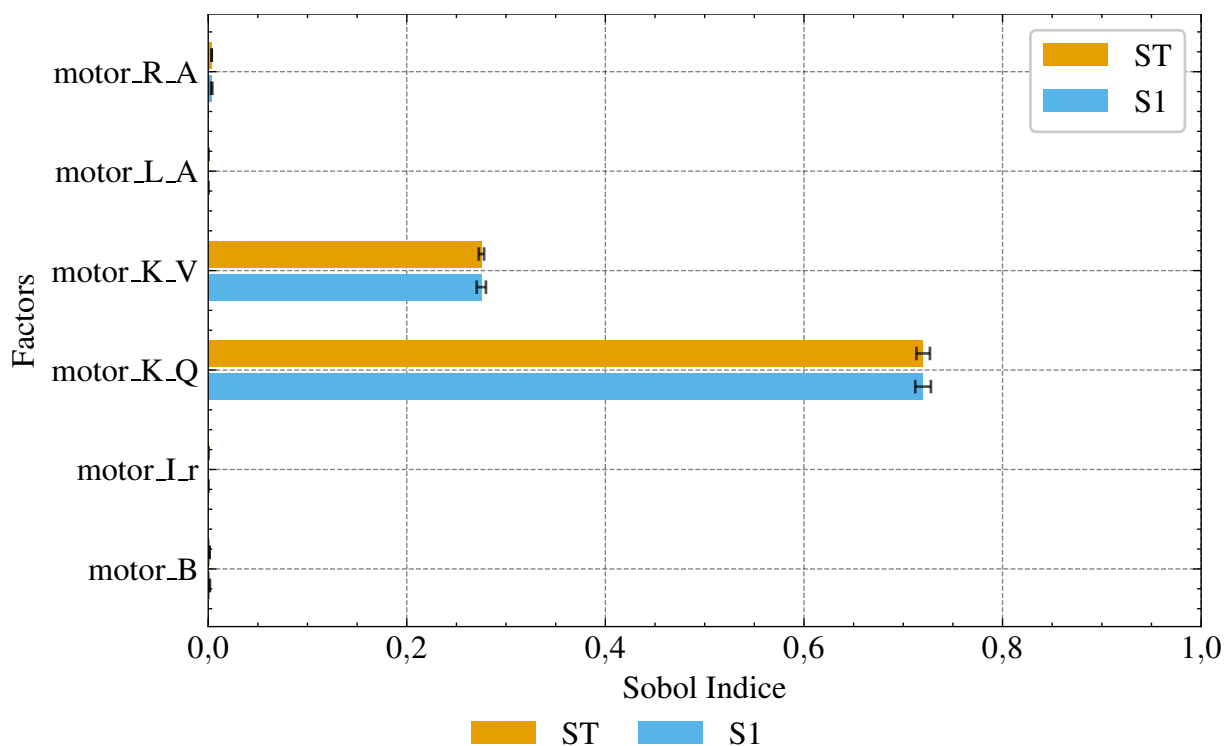
Figura 153 – Índices de Sobol para a saída motor\_w durante o tempo, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de calor dos índices de Sobol para a saída  $\omega_{Motor}$  ao longo do tempo, com degrau de 36 V e 10 N.m. A figura separa primeira ordem e ordem total, destacando a contribuição temporal de cada parâmetro.

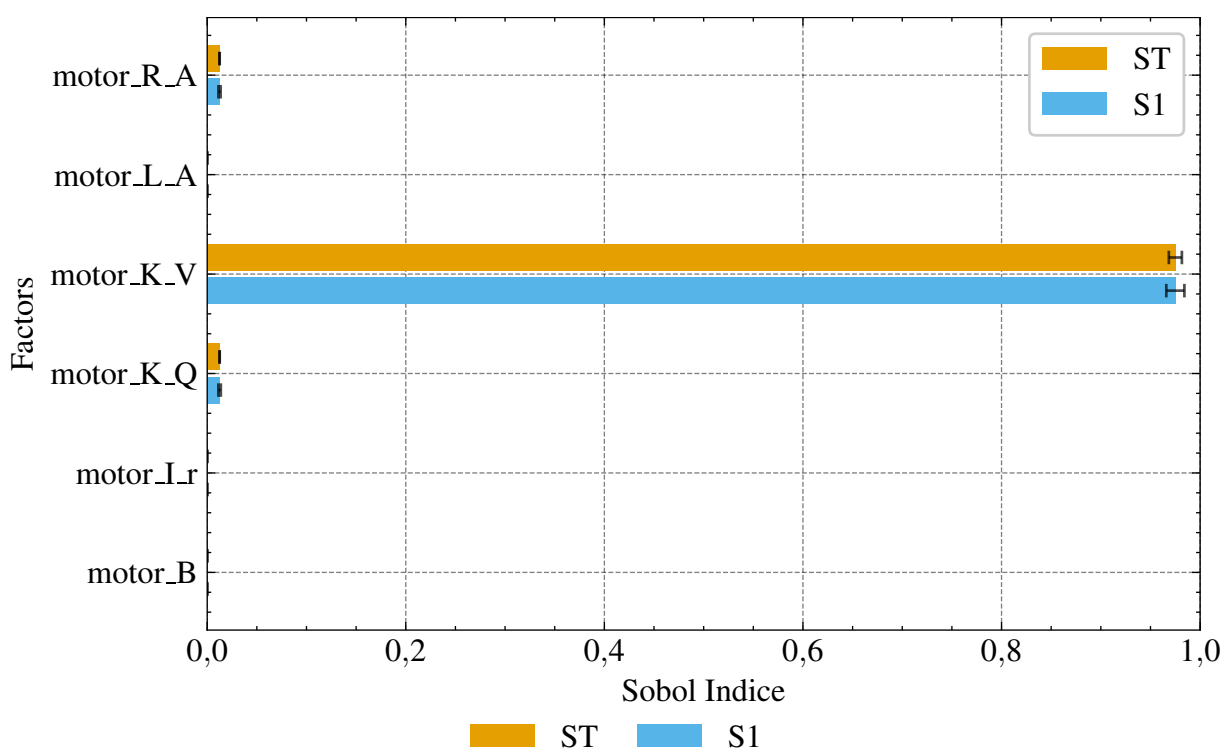
Figura 154 – Índices de Sobol para a saída motor\_i em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $i_{Motor}$  com degrau de 36 V e 10 N.m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

Figura 155 – Índices de Sobol para a saída motor\_w em regime permanente, com degrau de 36 [V] e 10 [Nm], com 65536 amostras



Fonte: Elaboração própria (2026).

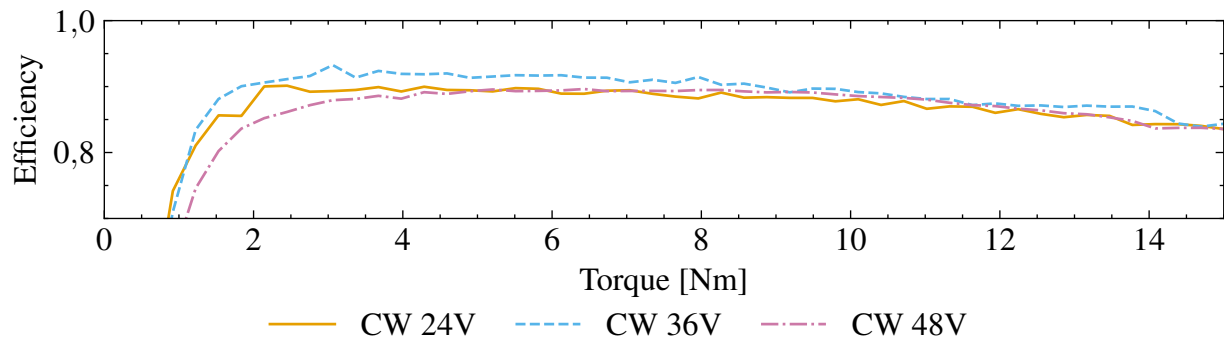
Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) em regime permanente para a saída  $\omega_{Motor}$  com degrau de 36 V e 10 N·m. O gráfico evidencia os parâmetros dominantes na variabilidade da saída em regime.

## APÊNDICE F – RESULTADOS COMPLEMENTARES DO MOTOR

### F.1 Ensaio em regime permanente (fabricante)

As figuras desta seção foram obtidas no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_steady\_state\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

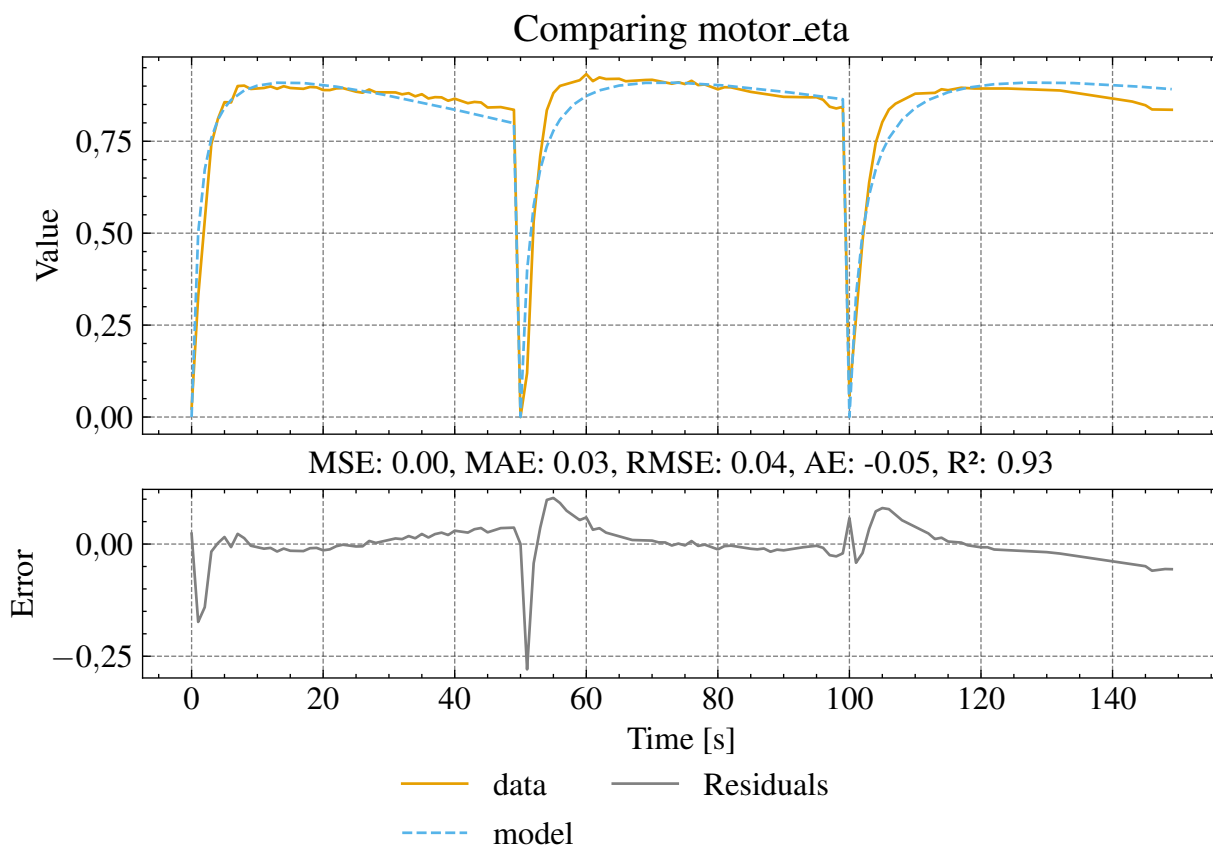
Figura 156 – Dados do fabricante - Eficiência para diferentes tensões



Fonte: Elaboração própria (2026).

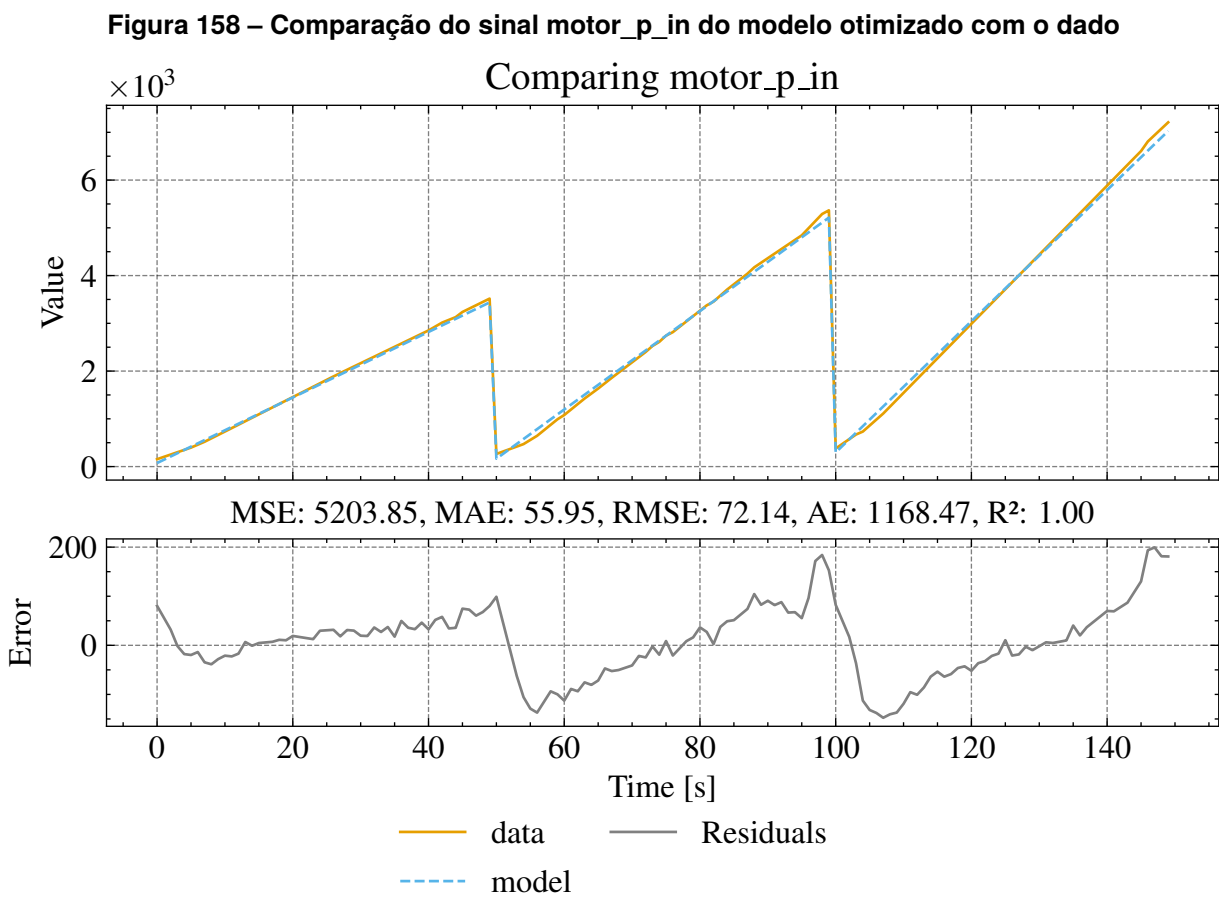
Legenda: Curvas de eficiência do ensaio em regime permanente do motor, comparando os dados de referência do fabricante com a resposta do modelo parametrizado na faixa de operação considerada.

Figura 157 – Comparação do sinal motor\_eta do modelo otimizado com o dado



Fonte: Elaboração própria (2026).

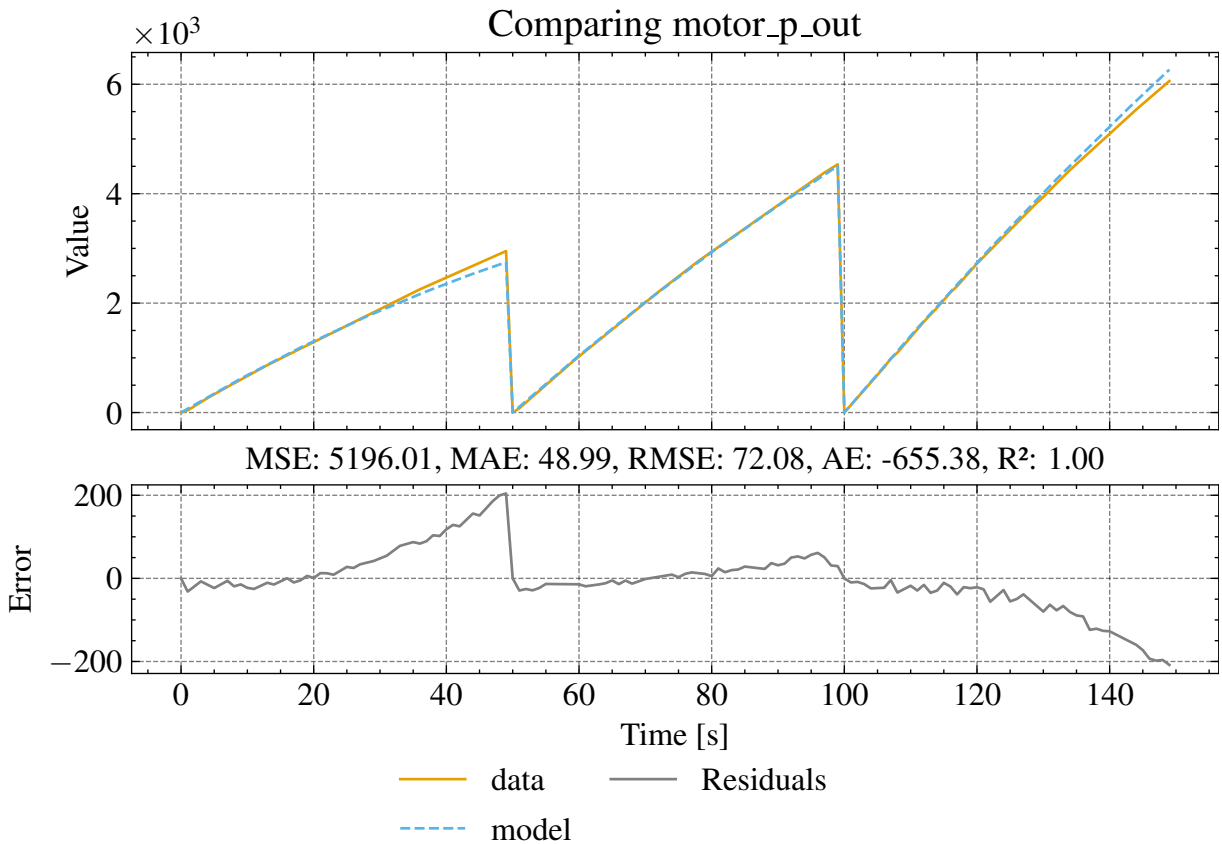
Legenda: Comparação entre a eficiência do motor ( $\eta_{Motor}$ ) medida e a estimada pelo modelo após otimização, incluindo resíduos e métricas de erro para avaliação de aderência.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a potência elétrica de entrada do motor ( $p_{Motor,in}$ ) medida e a estimada pelo modelo após otimização, incluindo resíduos e métricas de erro.

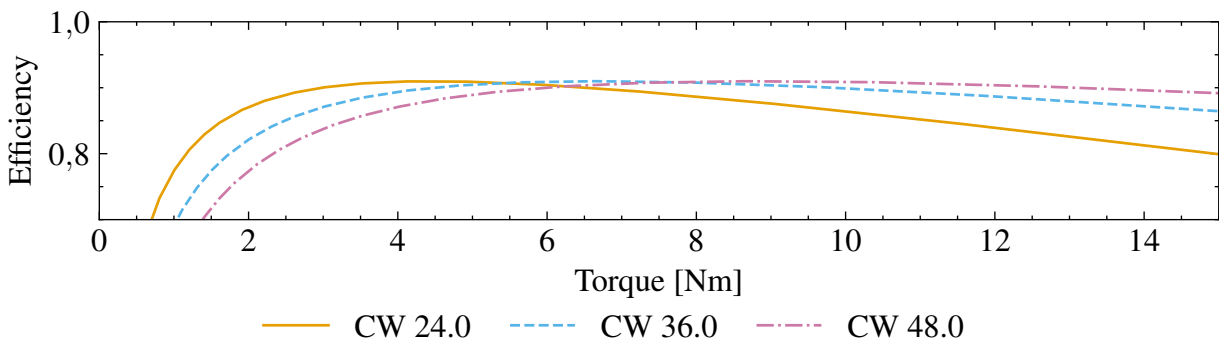
Figura 159 – Comparação do sinal motor\_p\_out do modelo otimizado com o dado



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a potência mecânica de saída do motor ( $p_{Motor,out}$ ) medida e a estimada pelo modelo após otimização, incluindo resíduos e métricas de erro.

Figura 160 – Modelo - Eficiência para diferentes tensões

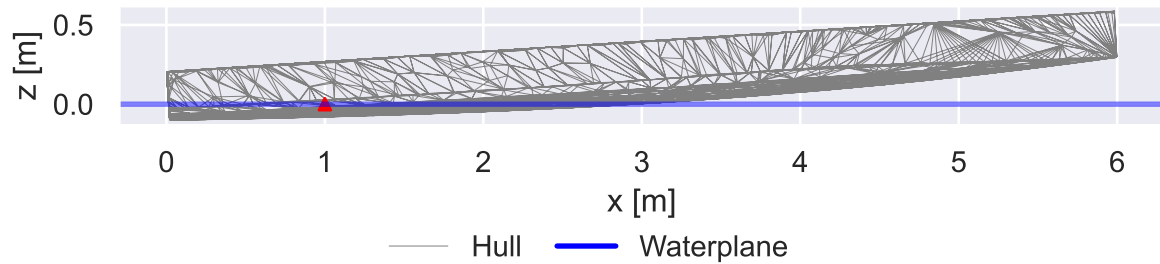


Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Mapa de eficiências previstas pelo modelo do motor em regime permanente, evidenciando a variação de desempenho nas regiões de operação analisadas.

## APÊNDICE G – SIMULAÇÕES HIDROSTÁTICAS COM A GEOMETRIA DO CASCO

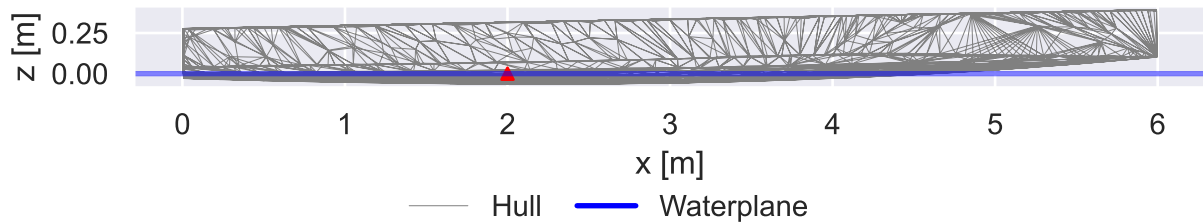
**Figura 161 – Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 1 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 100 kg e aplicação longitudinal em 1 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

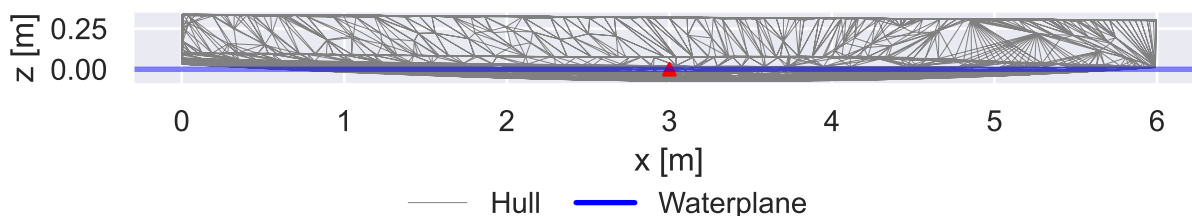
**Figura 162 – Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 2 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 100 kg e aplicação longitudinal em 2 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

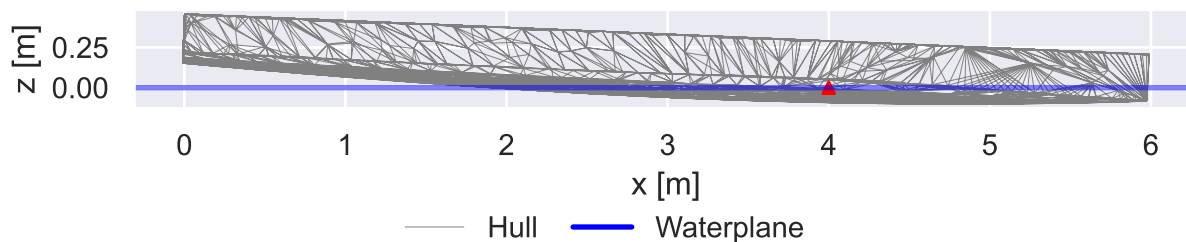
**Figura 163 – Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 3 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 100 kg e aplicação longitudinal em 3 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

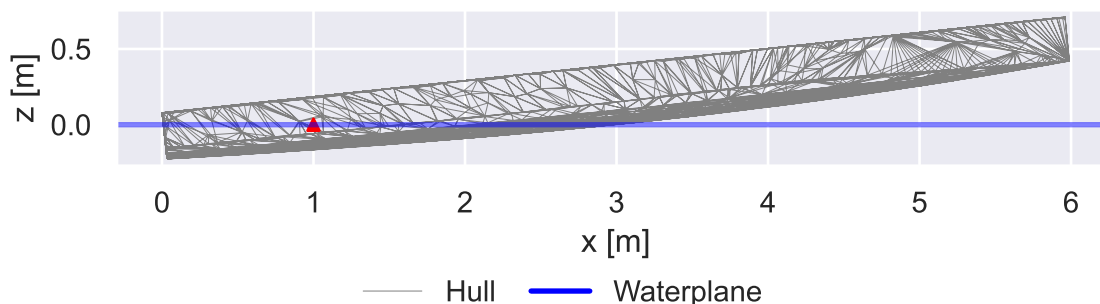
**Figura 164 – Casco em equilíbrio para 100 [kg] em 4 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 100 kg e aplicação longitudinal em 4 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

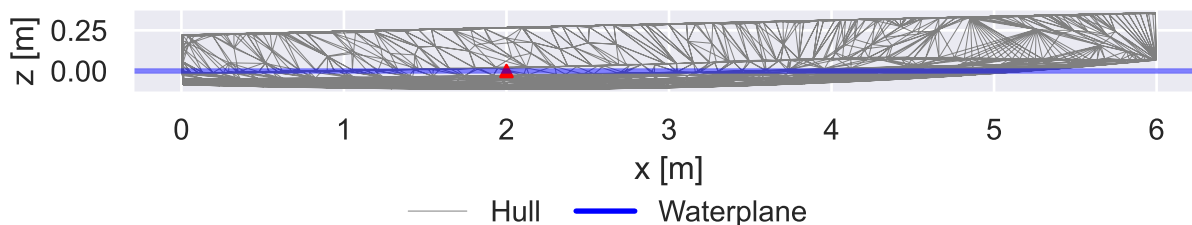
**Figura 165 – Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 1 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 265 kg e aplicação longitudinal em 1 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

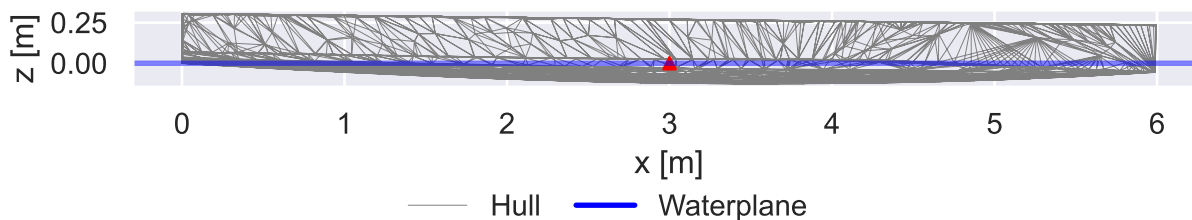
**Figura 166 – Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 2 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 265 kg e aplicação longitudinal em 2 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

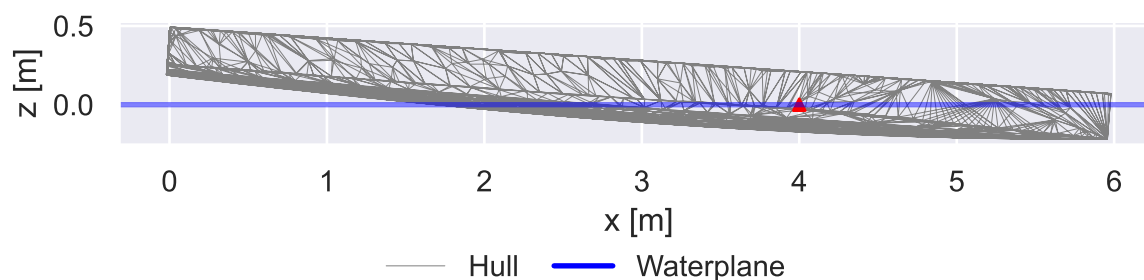
**Figura 167 – Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 3 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 265 kg e aplicação longitudinal em 3 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

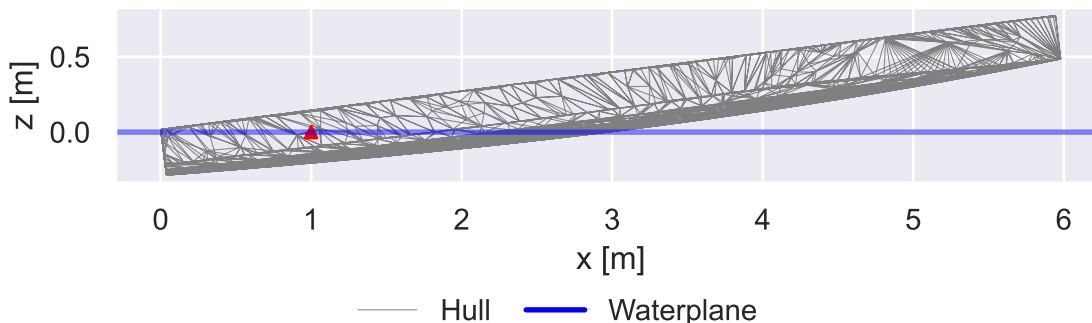
**Figura 168 – Casco em equilíbrio para 265 [kg] em 4 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 265 kg e aplicação longitudinal em 4 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

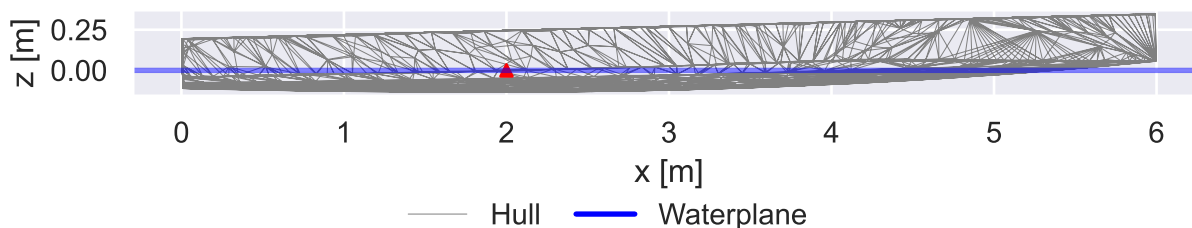
**Figura 169 – Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 1 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 350 kg e aplicação longitudinal em 1 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

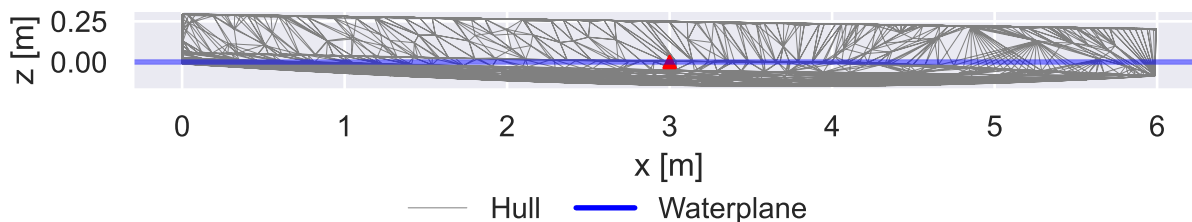
**Figura 170 – Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 2 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 350 kg e aplicação longitudinal em 2 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

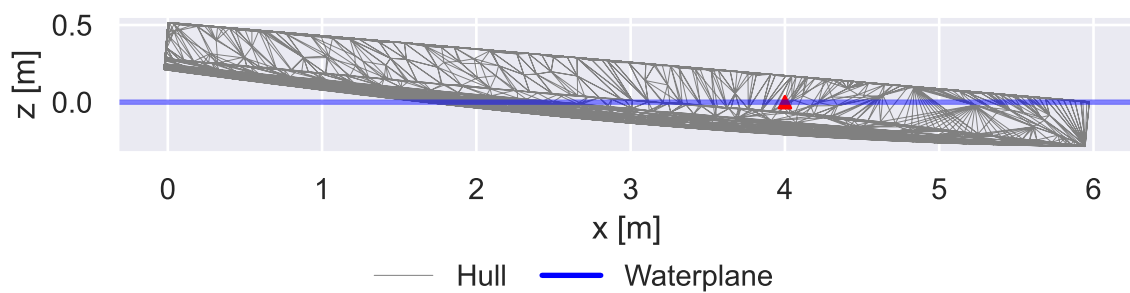
**Figura 171 – Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 3 [m]**



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 350 kg e aplicação longitudinal em 3 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

Figura 172 – Casco em equilíbrio para 350 [kg] em 4 [m]



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Condição hidrostática do casco em equilíbrio para deslocamento de 350 kg e aplicação longitudinal em 4 m. O diagrama mostra a geometria do casco e a linha d'água.

## **APÊNDICE H – PRELIMINA**

Aqui se encontram as capturas de tela do sistema Resistance, da Prelimina (RESISTANCE..., 2020), que, a partir de um modelo CAD tridimensional no formato OBJ, estima a resistência ao avanço da embarcação:

Figura 173 – Captura de tela 1 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma

User selected geometry ▾  
Browse... hull.obj  
**LOAD GEOMETRY**

## Environment

Density (kg/m<sup>3</sup>)

1023

Kinematic viscosity (m<sup>2</sup>/s)

9.05962854349951e-07

Gravity acceleration (m/s<sup>2</sup>)

9.81

## Prepare input

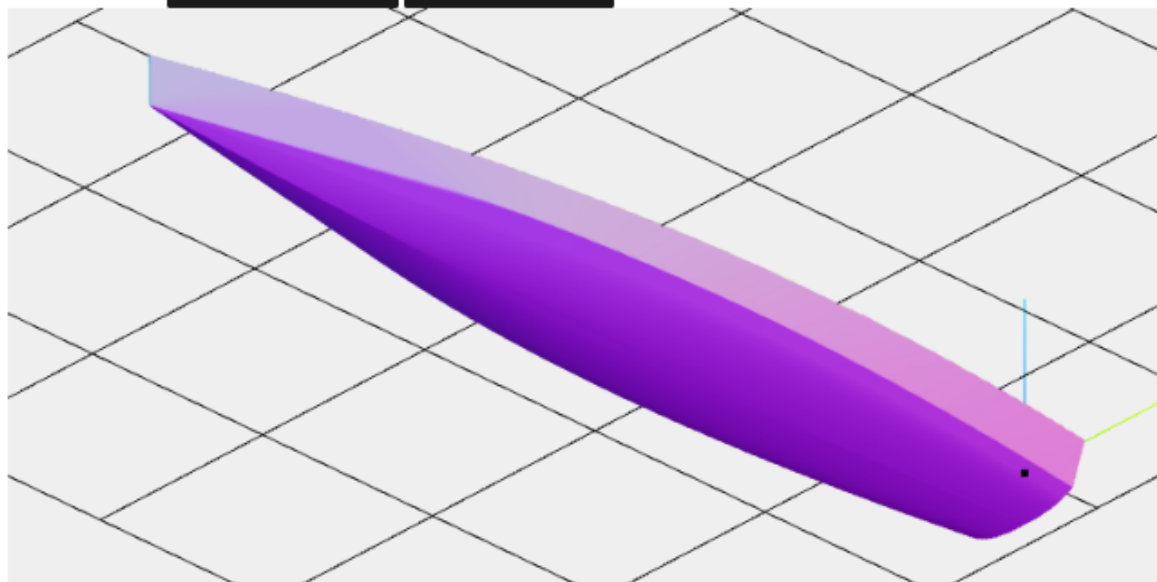
Waterline Z coordinate (m)

-0.27

Demihull?

**PROFILE VIEW**

**FRONT VIEW**



**PREPARE FOR CALCULATION**

Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura de tela 1 da plataforma Prelimina, registrada durante o uso da interface de estimativa de resistência ao avanço a partir do modelo CAD.

**Figura 174 – Captura de tela 2 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma**

### Hull data

Length, waterline	5.991	m
Beam, waterline	0.959	m
Draft	0.109	m
Displaced volume	0.240	m <sup>3</sup>
Displaced mass	0.246	mt
Centre of buoyancy, longitudinal	2.603	m
Centre of buoyancy, vertical	-0.310	m
Wetted area	4.164	m <sup>2</sup>
Waterplane area	4.053	m <sup>2</sup>
Main frame section area	0.072	m <sup>2</sup>
Block coefficient	0.385	
Prismatic coefficient	0.556	
Waterplane coefficient	0.705	
Main section coefficient	0.692	

Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura de tela 2 da plataforma Prelimina, registrada durante o uso da interface de estimativa de resistência ao avanço a partir do modelo CAD.

Figura 175 – Captura de tela 3 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma

## Speed range

Speed min (m/s)

0

**INPUT KNOTS**

Speed max (m/s)

10

**INPUT KNOTS**

Number of steps

1000

## Motions

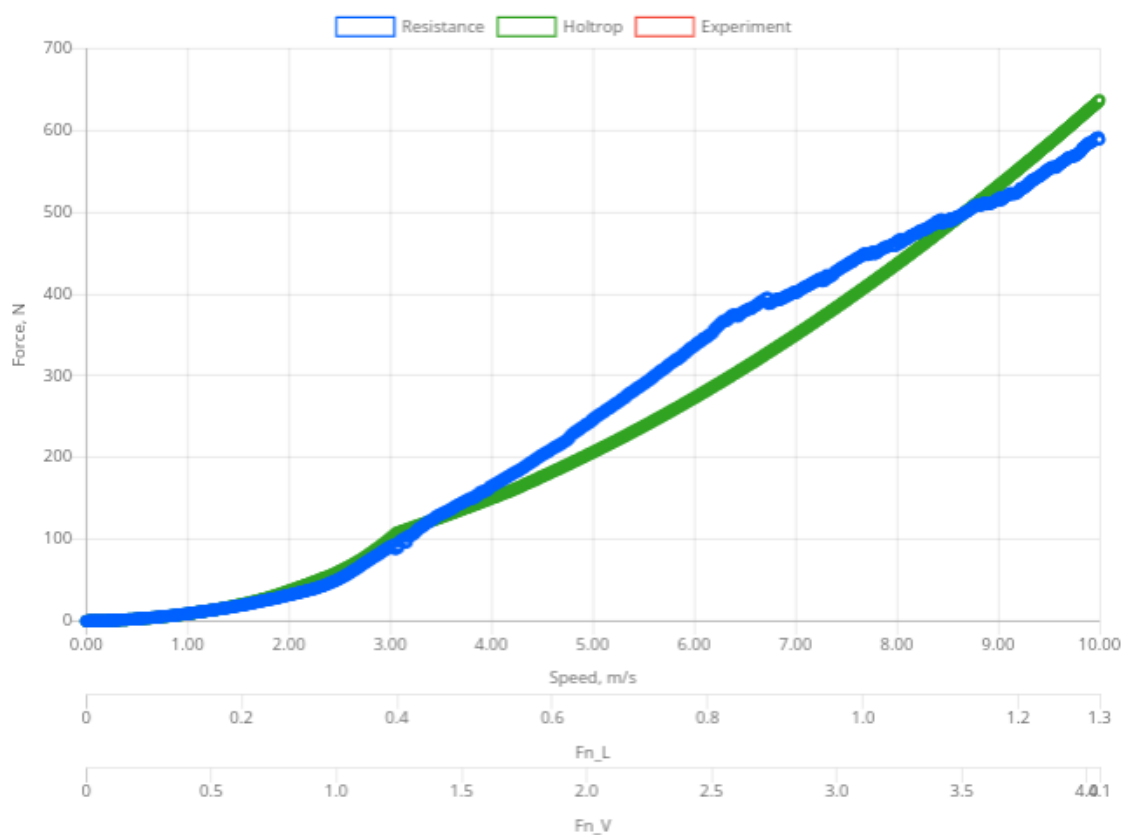
Dynamic trim & sinkage

**CALCULATE RESISTANCE**

Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura de tela 3 da plataforma Prelimina, registrada durante o uso da interface de estimativa de resistência ao avanço a partir do modelo CAD.

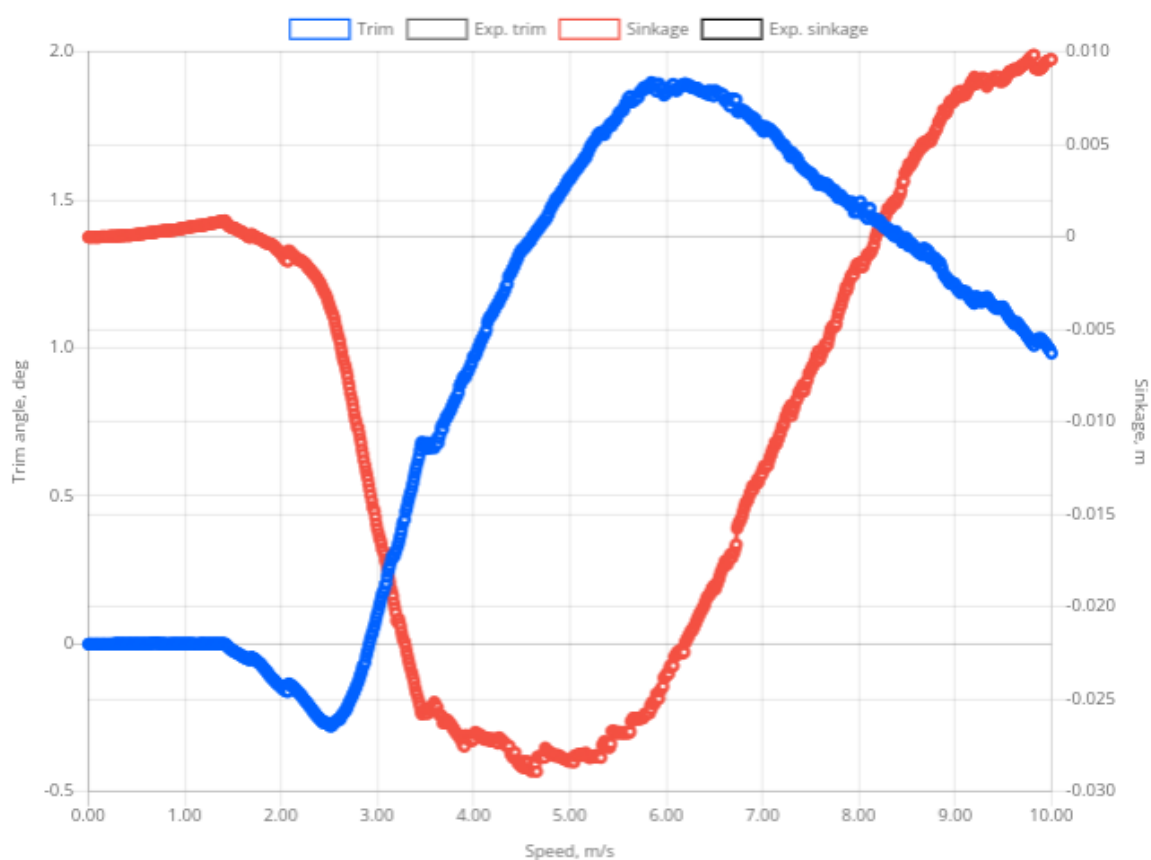
Figura 176 – Captura de tela 4 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura de tela 4 da plataforma Prelimina, registrada durante o uso da interface de estimativa de resistência ao avanço a partir do modelo CAD.

Figura 177 – Captura de tela 5 do website Prelimina, utilizada como registro visual da interface da plataforma



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Captura de tela 5 da plataforma Prelimina, registrada durante o uso da interface de estimativa de resistência ao avanço a partir do modelo CAD.

## APÊNDICE I – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE PROPULSÃO

A análise de sensibilidade da propulsão foi implementada no *notebook* <so larboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_sensitivity.ipynb> (CARDOSO, 2026b). Foram avaliados os mesmos seis parâmetros livres da otimização da propulsão ( $C_{Hull,T}$ ,  $M_{Hull,a}$ ,  $W_{Hull}$ ,  $T_{Hull,ded}$ ,  $I_{Prop,r}$  e  $\eta_{Prop,R}$ ), agregados em cinco grupos: hull\_drag, hull\_added\_mass, wake\_deduction, prop\_inertia e prop\_efficiency.

A tabela a seguir apresenta os índices de Sobol em regime permanente para as saídas do modelo de propulsão.

**Tabela 23 – Índices de Sobol em regime permanente**

output	factor	metric	value	conf
esc_i_in	wake_deduction	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_inertia	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	1,00	0,04
		ST	1,00	0,02
	hull_drag	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	hull_added_mass	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
hull_r_t	wake_deduction	S1	0,63	0,02
		ST	0,72	0,02
	prop_inertia	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,19	0,01
		ST	0,26	0,01
	hull_drag	S1	0,07	0,01
		ST	0,10	0,01
	hull_added_mass	S1	0,01	0,00
		ST	0,02	0,00
hull_u	wake_deduction	S1	0,39	0,02
		ST	0,51	0,02
	prop_inertia	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,12	0,01
		ST	0,17	0,01
	hull_drag	S1	0,29	0,02
		ST	0,47	0,03
	hull_added_mass	S1	0,02	0,01
		ST	0,07	0,01
motor_i	wake_deduction	S1	0,00	0,00

*Continua na próxima página*

output	factor	metric	value	conf
		ST	0,00	0,00
	prop_inertia	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	1,00	0,03
		ST	1,00	0,02
	hull_drag	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	hull_added_mass	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	motor_q_load	wake_deduction	S1	0,00
ST			0,00	0,00
prop_inertia		S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
prop_efficiency		S1	1,00	0,03
		ST	1,00	0,02
hull_drag		S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
hull_added_mass		S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
motor_w	wake_deduction	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_inertia	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	1,00	0,03
		ST	1,00	0,02
	hull_drag	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	hull_added_mass	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
prop_j	wake_deduction	S1	0,70	0,02
		ST	0,81	0,03
	prop_inertia	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,01	0,00
		ST	0,02	0,00
	hull_drag	S1	0,15	0,02
		ST	0,28	0,01
	hull_added_mass	S1	0,01	0,00
		ST	0,04	0,00
prop_k_q	wake_deduction	S1	0,61	0,03
		ST	0,78	0,04
	prop_inertia	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,01	0,00
		ST	0,01	0,00

Continua na próxima página

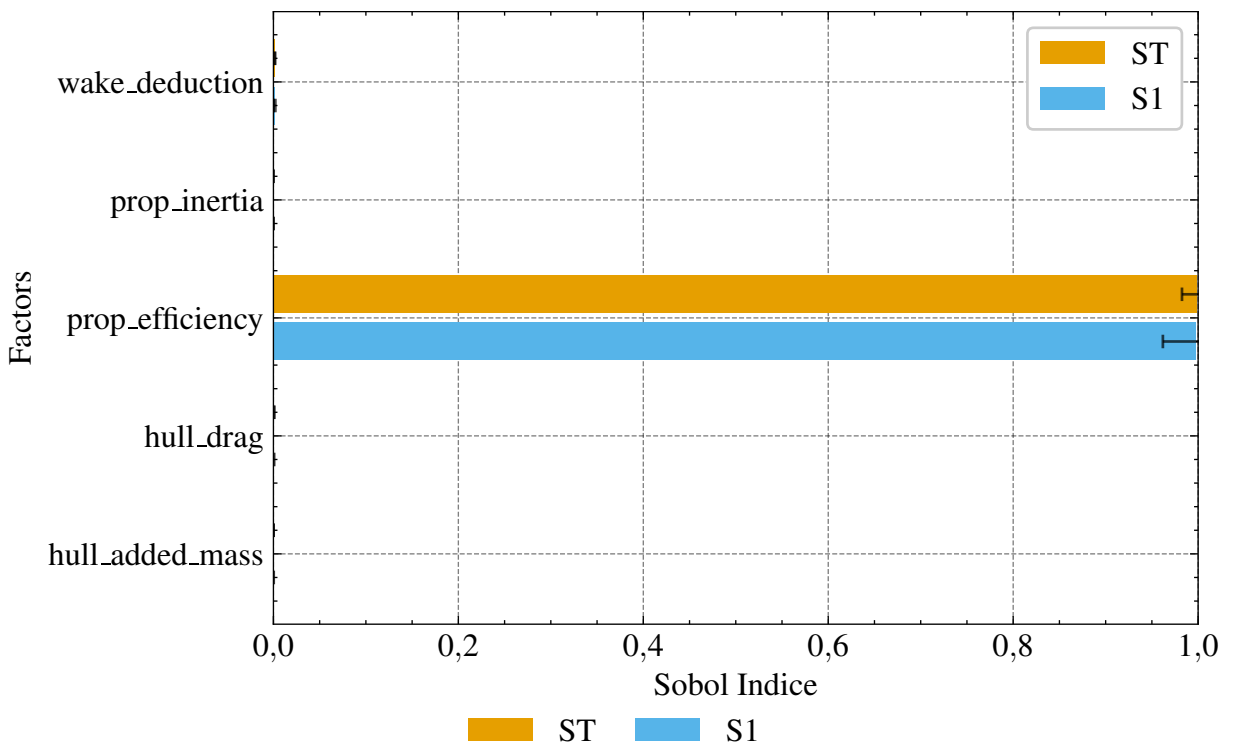
output	factor	metric	value	conf
		ST	0,03	0,00
	hull_drag	S1	0,16	0,02
		ST	0,36	0,03
	hull_added_mass	S1	0,01	0,01
ST		0,07	0,01	
prop_k_t	wake_deduction	S1	0,58	0,03
		ST	0,77	0,04
	prop_inertia	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,01	0,00
		ST	0,03	0,00
	hull_drag	S1	0,17	0,02
		ST	0,39	0,03
	hull_added_mass	S1	0,01	0,01
		ST	0,07	0,01
prop_q	wake_deduction	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_inertia	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	1,00	0,03
		ST	1,00	0,02
	hull_drag	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	hull_added_mass	S1	-0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
prop_t	wake_deduction	S1	0,02	0,00
		ST	0,03	0,00
	prop_inertia	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,96	0,03
		ST	0,97	0,02
	hull_drag	S1	0,01	0,00
		ST	0,02	0,00
	hull_added_mass	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
prop_t_e	wake_deduction	S1	0,71	0,02
		ST	0,78	0,02
	prop_inertia	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	0,21	0,01
		ST	0,28	0,01
	hull_drag	S1	0,00	0,00
		ST	0,01	0,00
	hull_added_mass	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00

*Continua na próxima página*

output	factor	metric	value	conf
		ST	0,00	0,00
prop_w	wake_deduction	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_inertia	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
	prop_efficiency	S1	1,00	0,03
		ST	1,00	0,02
	hull_drag	S1	0,00	0,00
		ST	0,00	0,00
hull_added_mass	S1	-0,00	0,00	
	ST	0,00	0,00	

Fonte: Elaboração Própria (2026).

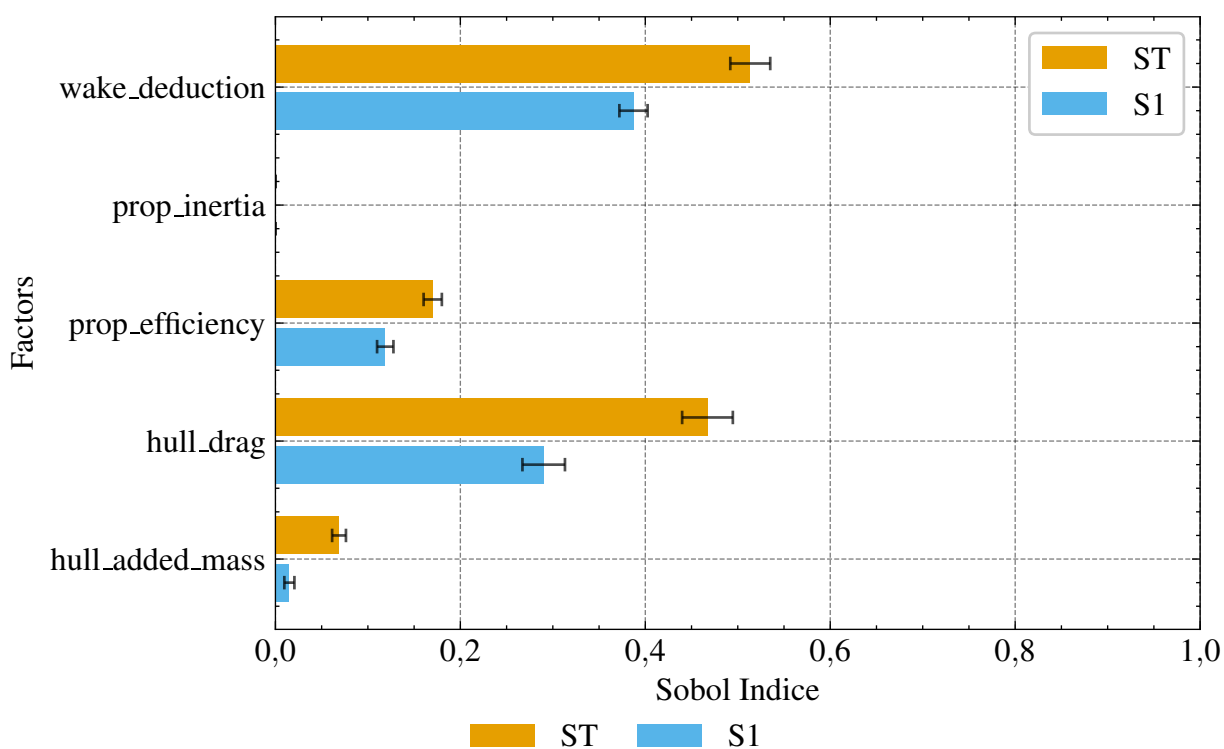
Figura 178 – Índices de Sobol para a saída  $i_{ESC,in}$  em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) para  $i_{ESC,in}$  em regime permanente. O gráfico evidencia o predomínio do grupo prop\_efficiency nessa saída.

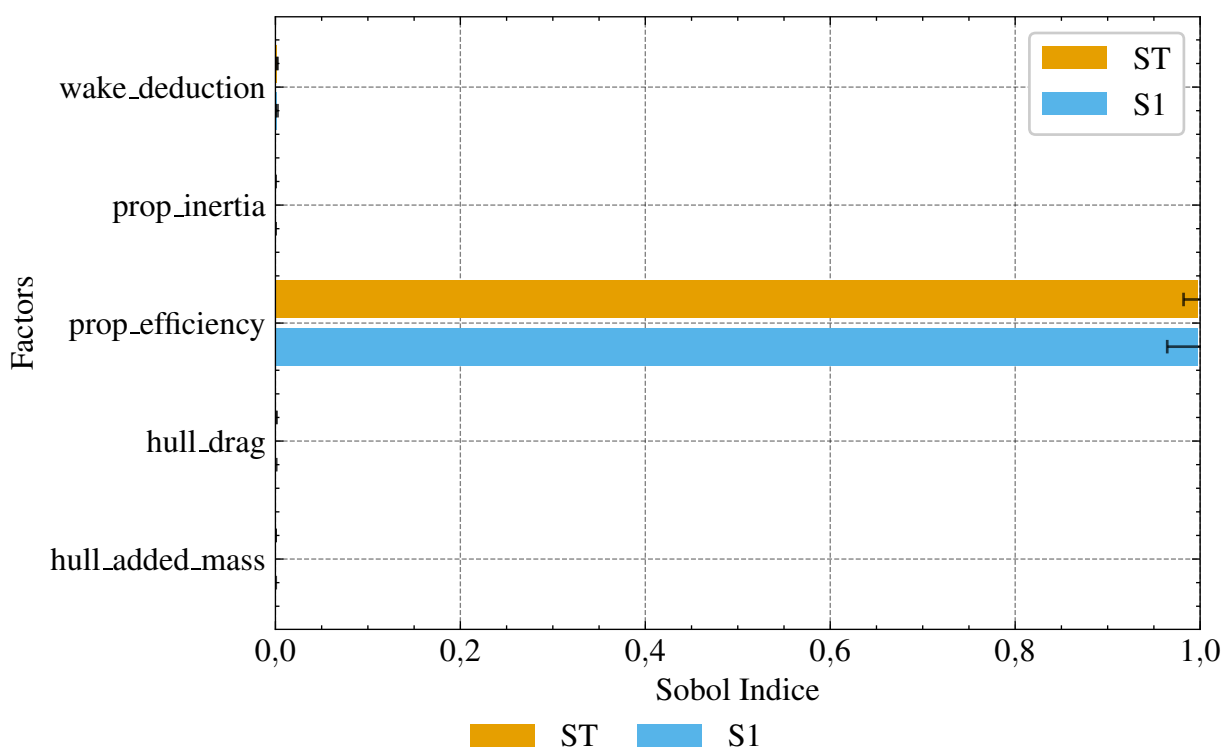
Figura 179 – Índices de Sobol para a saída hull\_u em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) para  $u_{Hull}$  em regime permanente. O gráfico evidencia maior influência dos grupos wake\_deduction e hull\_drag na velocidade do casco.

Figura 180 – Índices de Sobol para a saída motor\_w em regime permanente



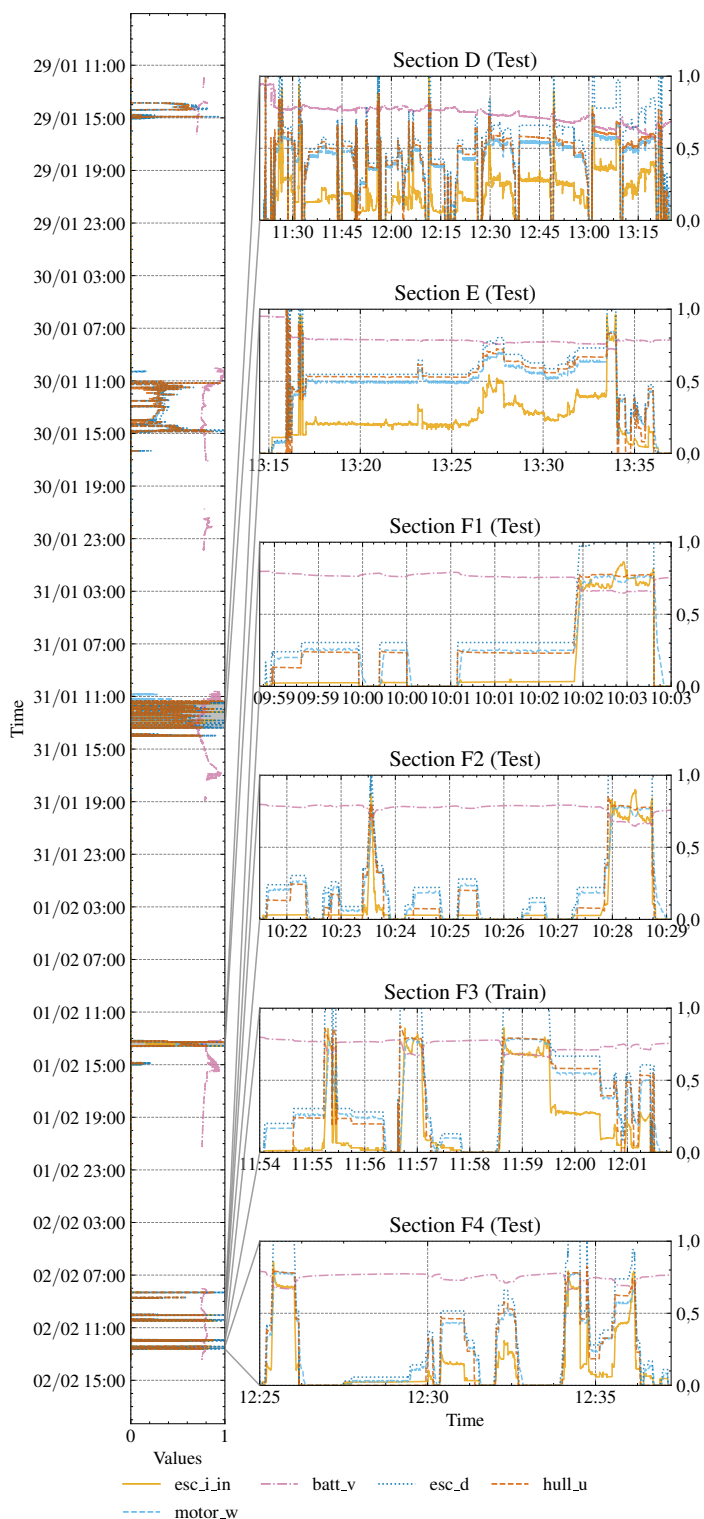
Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Índices de Sobol (primeira ordem e total) para  $\omega_{Motor}$  em regime permanente. O gráfico evidencia o predomínio do grupo prop\_efficiency nessa saída.

## APÊNDICE J – OTIMIZAÇÃO DA PROPULSÃO

As figuras a seguir detalham os resultados do *notebook* <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b). O processo carrega como entrada os parâmetros dos subsistemas descritos na monografia e armazenados em <solarboat\_model/models/2020/generation/generation\_params.json> (Tabela 3), <solarboat\_model/models/2020/motor/me0909\_free\_rotor\_step\_params.json> (Tabela 7), <solarboat\_model/models/2020/esc/mam17\_params.json> (Tabela 6) e a estimativa inicial <solarboat\_model/models/2020/propeller/data/propulsive\_initial\_params.json> (Tabela 9). Como saída, o conjunto de parâmetros da propulsão é exportado para <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_params.json> e os valores consolidados são os apresentados na Tabela 11.

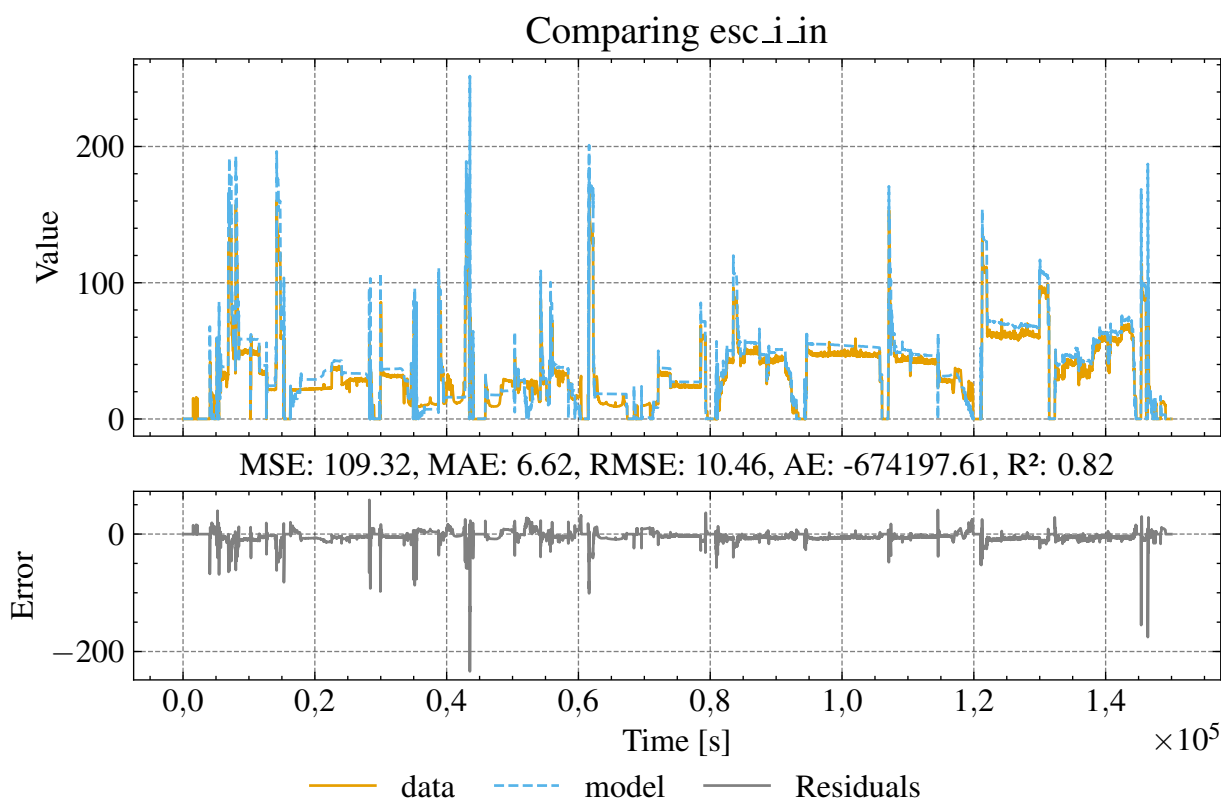
Figura 181 – Conjunto de dados da embarcação durante o DSB de 2019



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Visão geral do conjunto de dados usado na otimização da propulsão, segmentado por seções (D, E, F1–F4). O painel mostra, em escala normalizada, sinais como  $i_{ESC,in}$ ,  $\omega_{Motor}$ ,  $v_{Batt}$ ,  $d_{ESC}$  e  $u_{Hull}$  ao longo do tempo, indicando janelas de treino e teste.

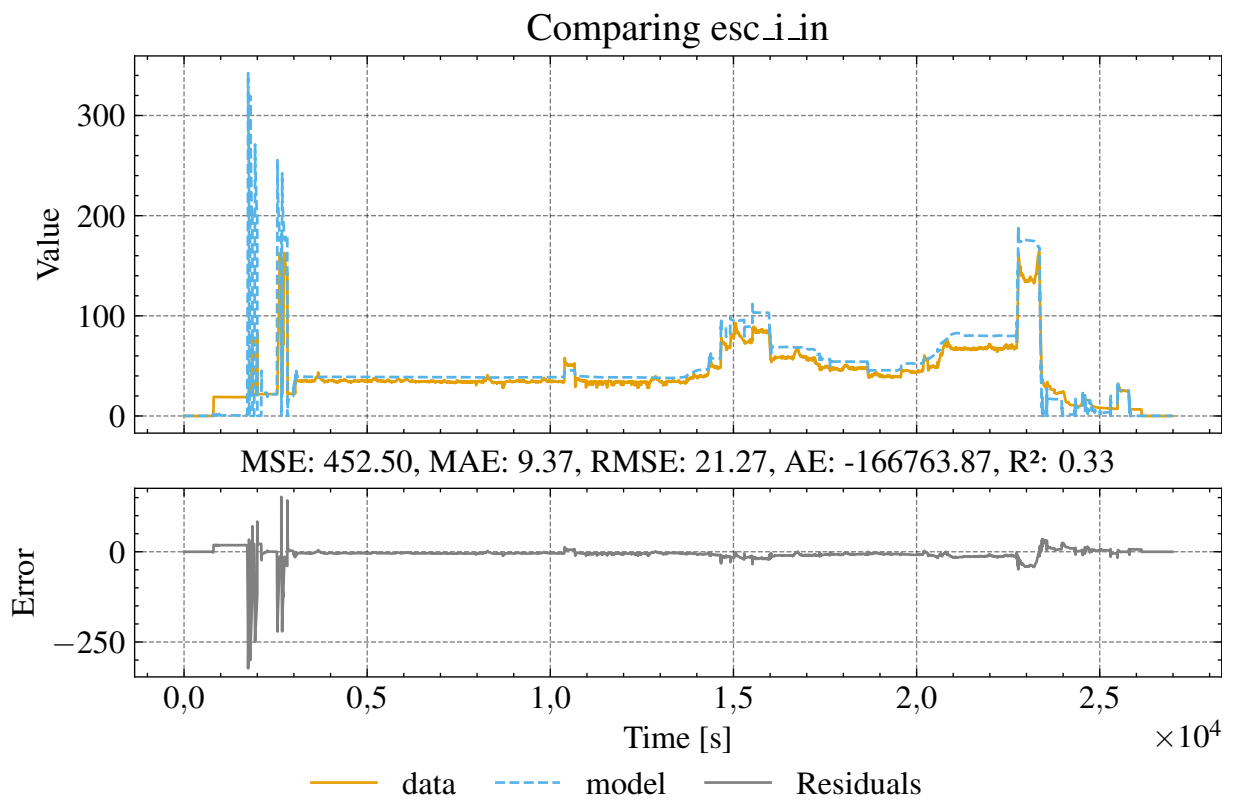
Figura 182 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo otimizado com os dados da seção D



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção D. O gráfico inclui séries temporais, resíduos e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ).

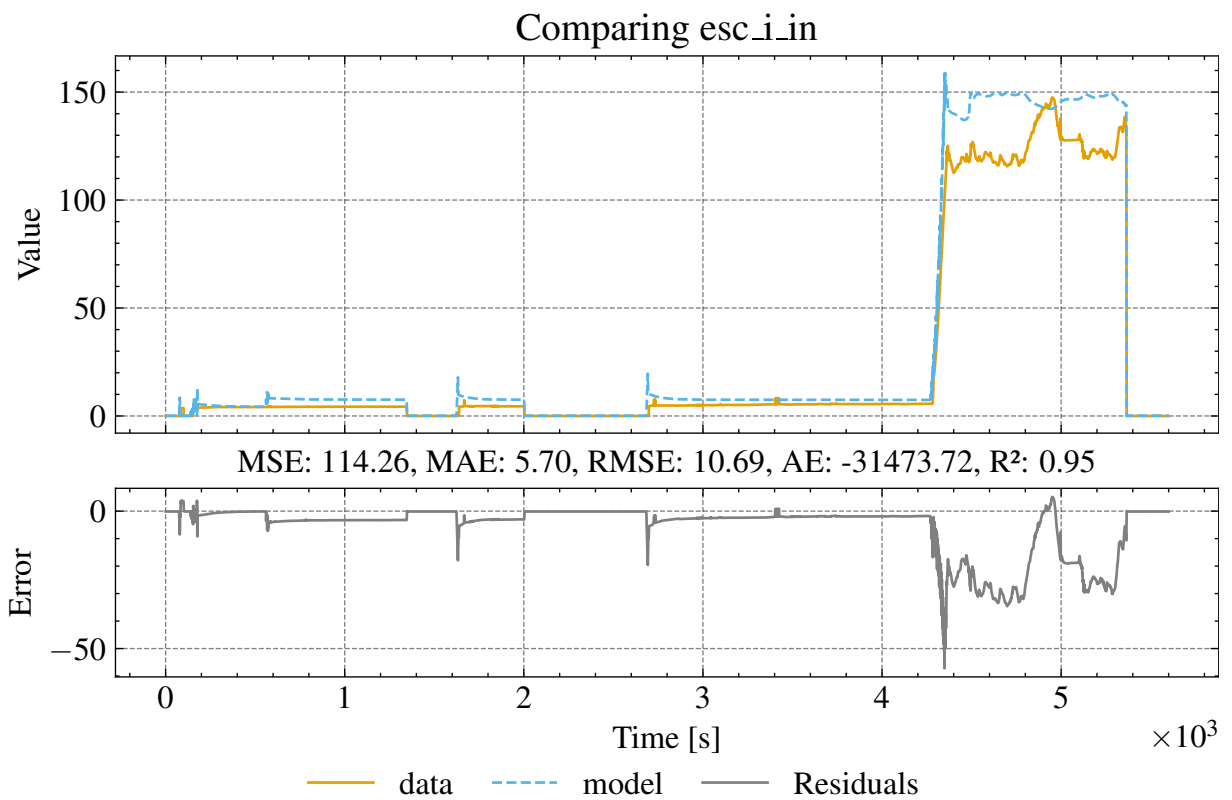
Figura 183 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo otimizado com os dados da seção E



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção E. O gráfico inclui séries temporais, resíduos e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ).

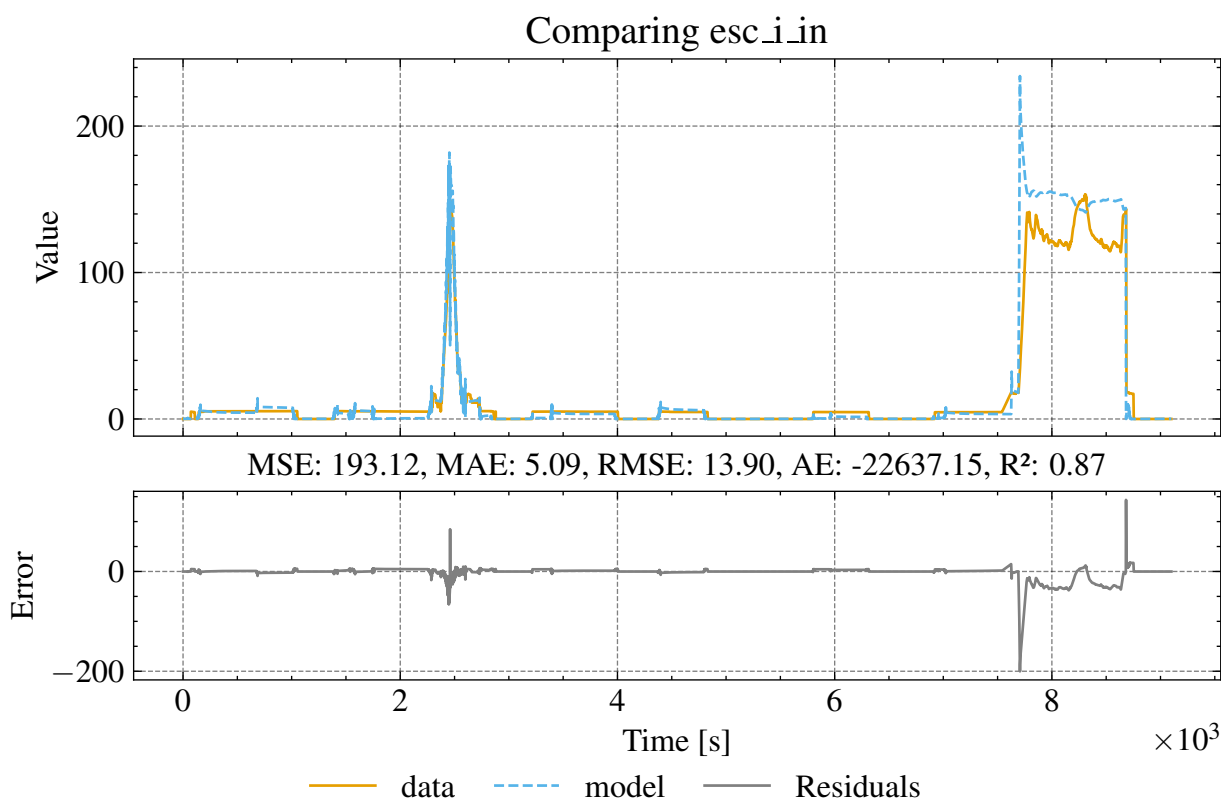
Figura 184 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo otimizado com os dados da seção F1



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F1. O gráfico inclui séries temporais, resíduos e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ).

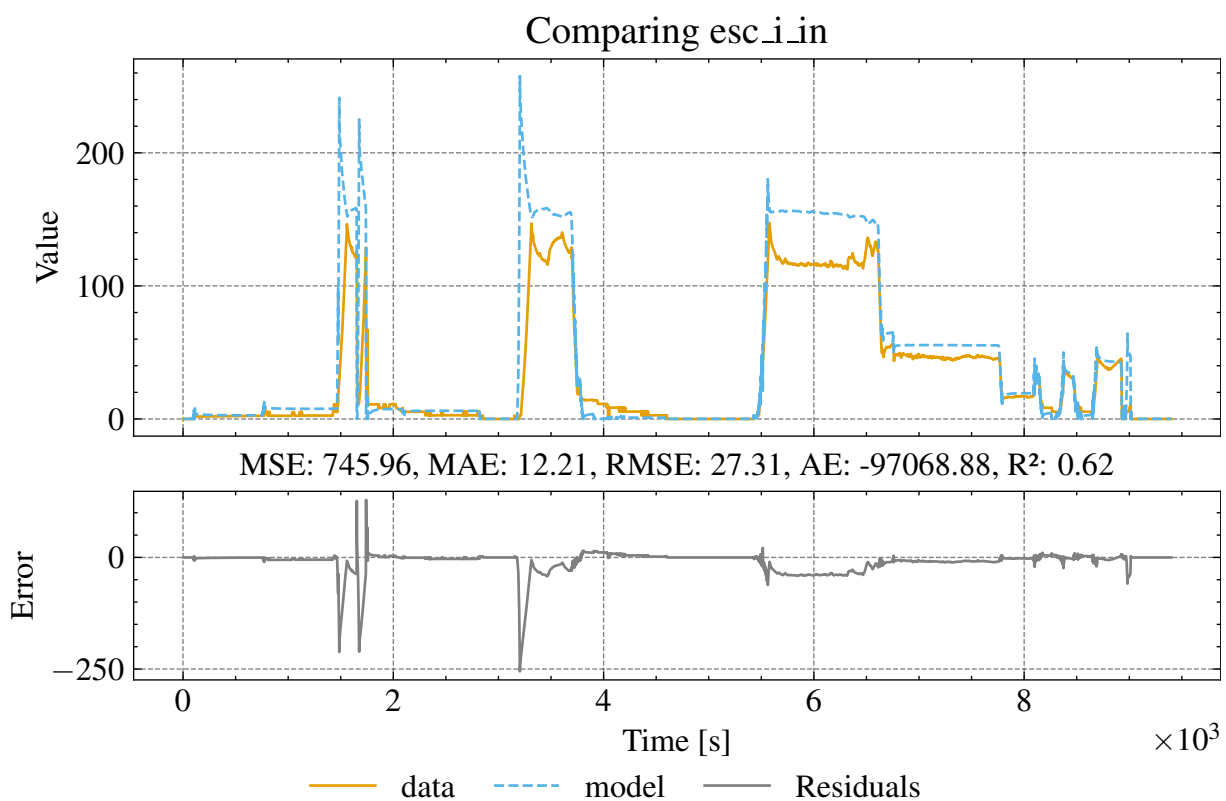
Figura 185 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo otimizado com os dados da seção F2



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F2. O gráfico inclui séries temporais, resíduos e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ).

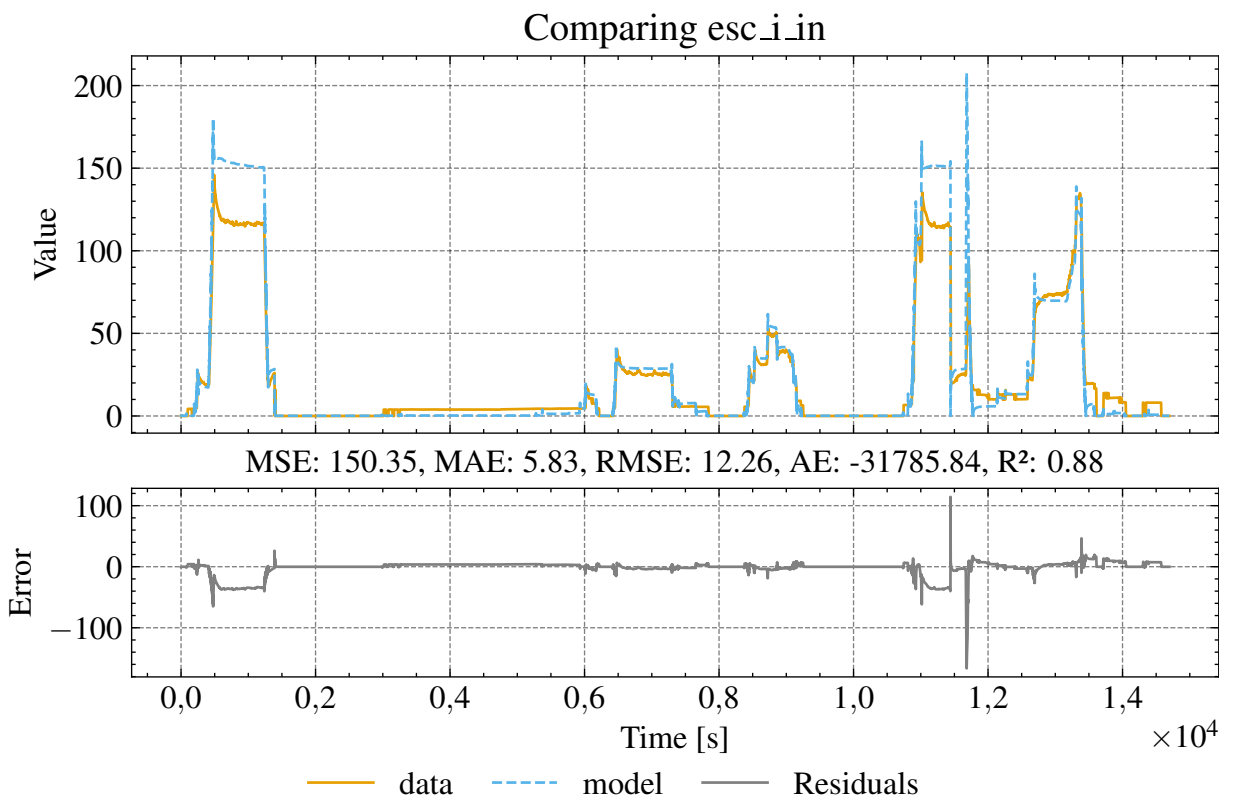
Figura 186 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo otimizado com os dados da seção F3



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F3. O gráfico inclui séries temporais, resíduos e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ).

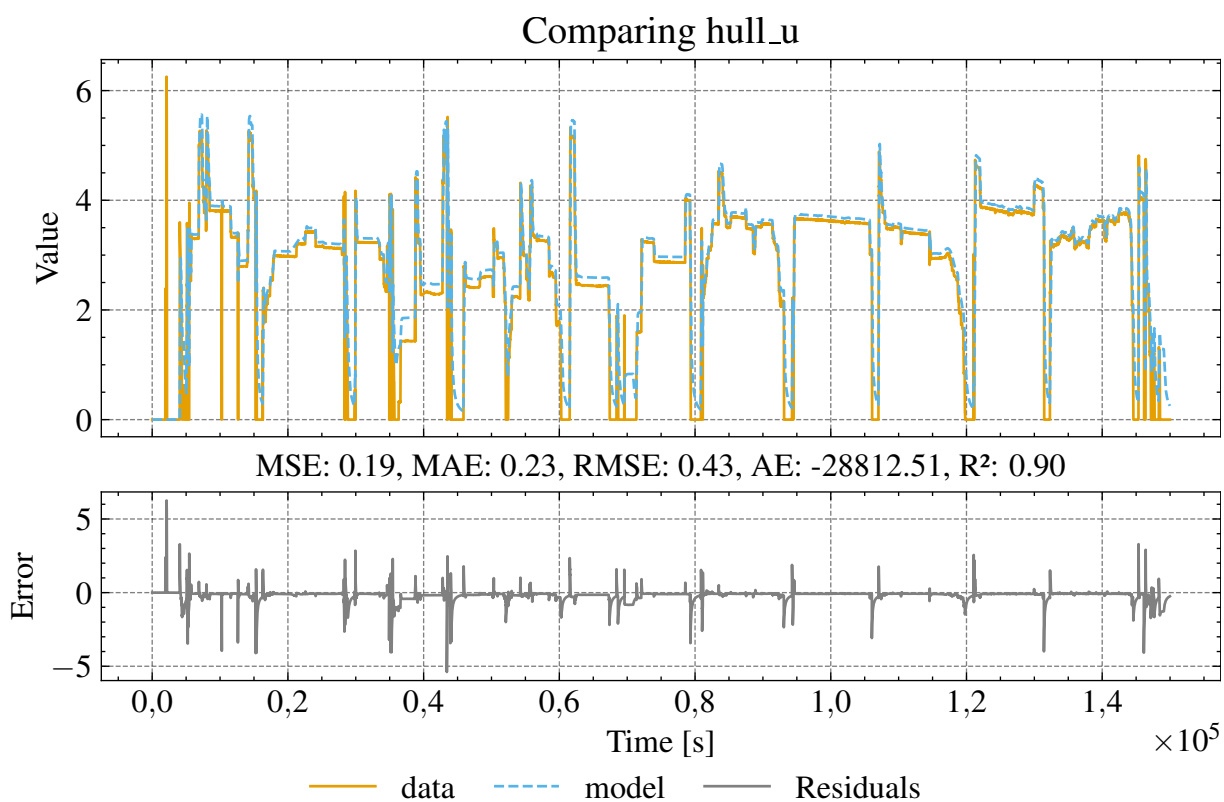
Figura 187 – Comparação do sinal  $i_{ESC}$  do modelo otimizado com os dados da seção F4



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a corrente de entrada do ESC ( $i_{ESC,in}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F4. O gráfico inclui séries temporais, resíduos e métricas de erro (MSE, MAE, RMSE e  $R^2$ ).

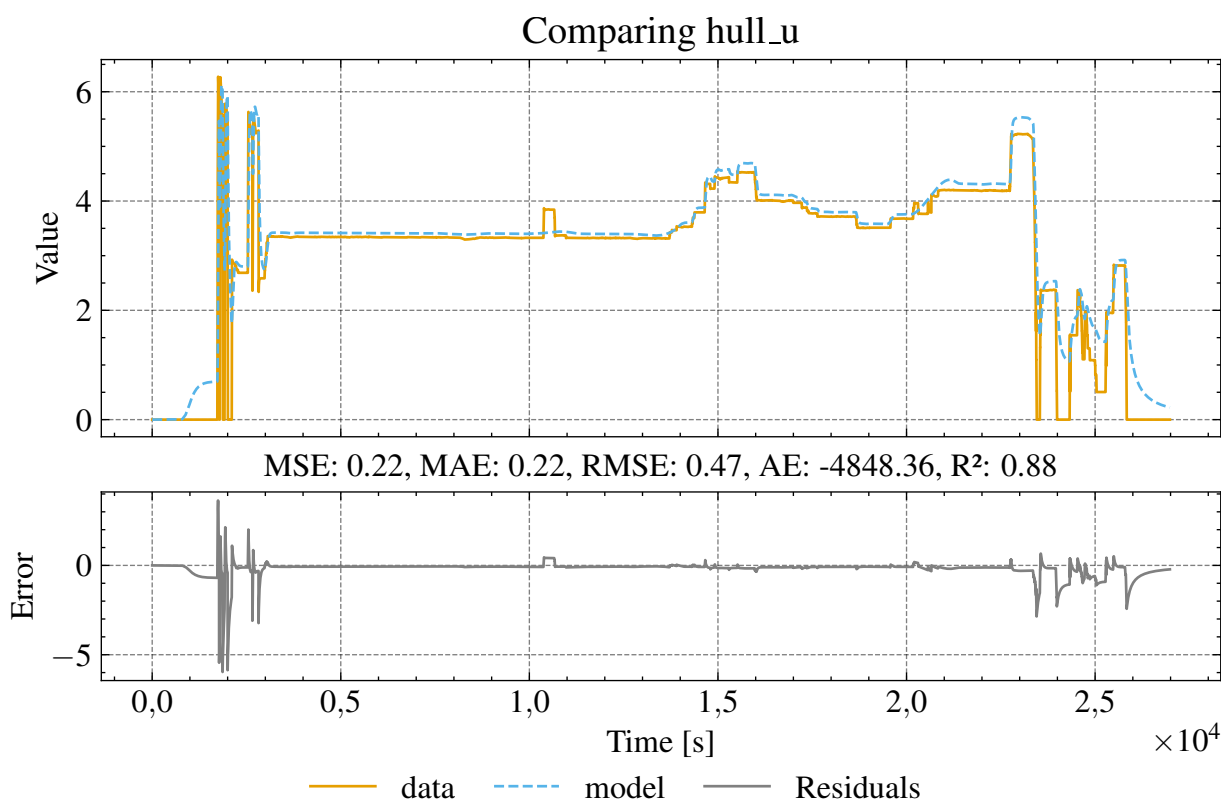
Figura 188 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados da seção D



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção D. A figura mostra as séries no tempo, o painel de resíduos e métricas de ajuste.

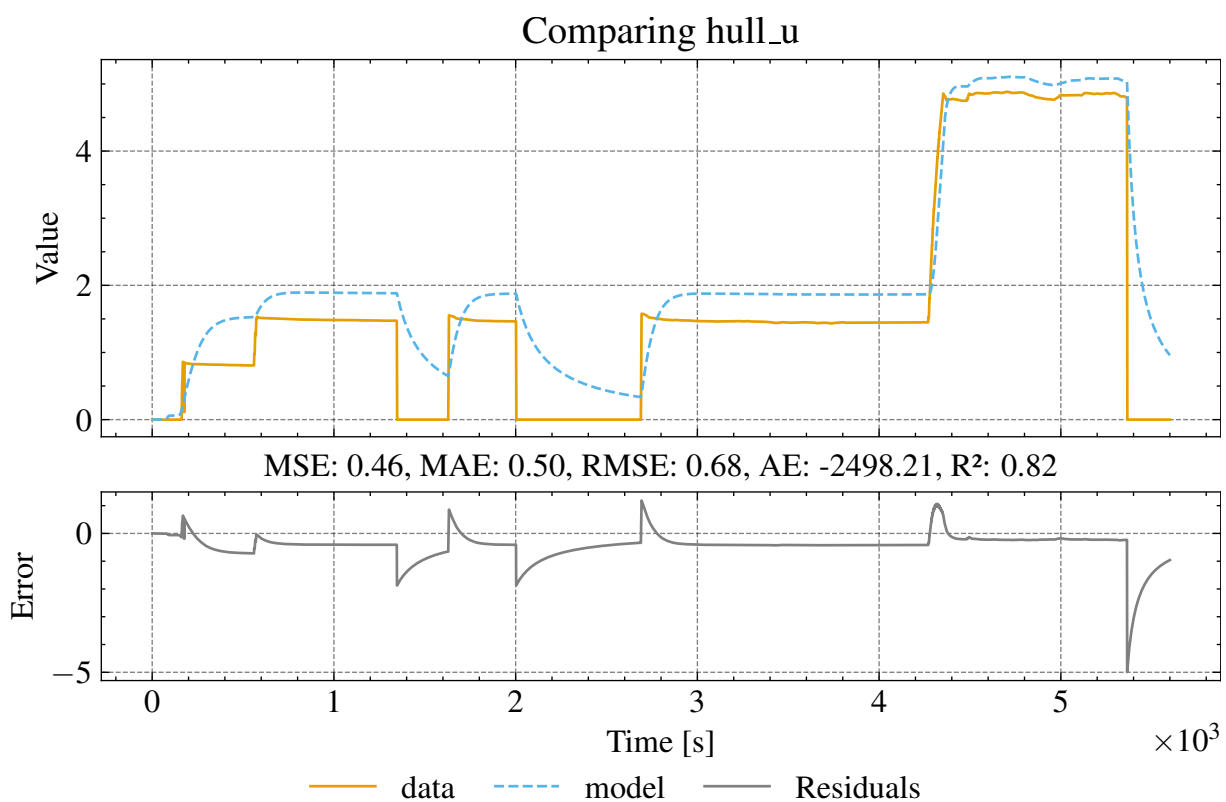
Figura 189 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados da seção E



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção E. A figura mostra as séries no tempo, o painel de resíduos e métricas de ajuste.

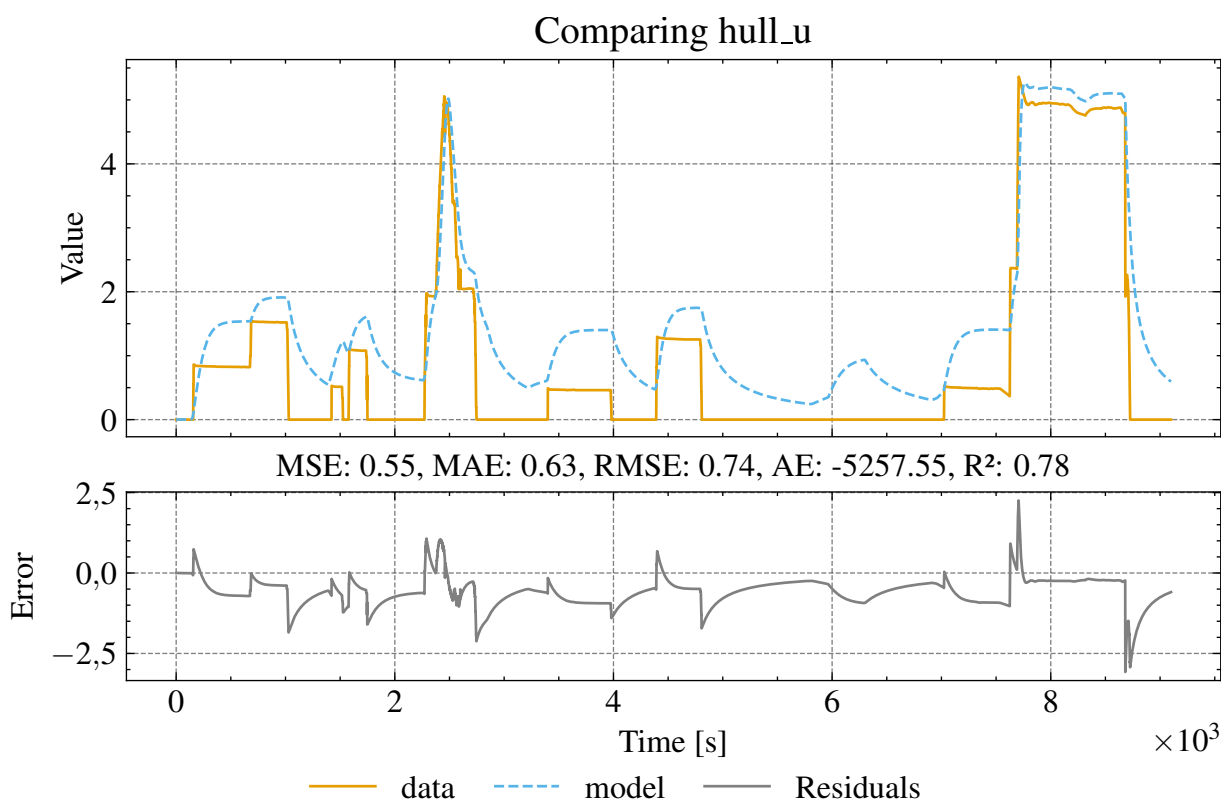
Figura 190 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados da seção F1



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado na seção F1. A figura mostra as séries no tempo, o painel de resíduos e métricas de ajuste.

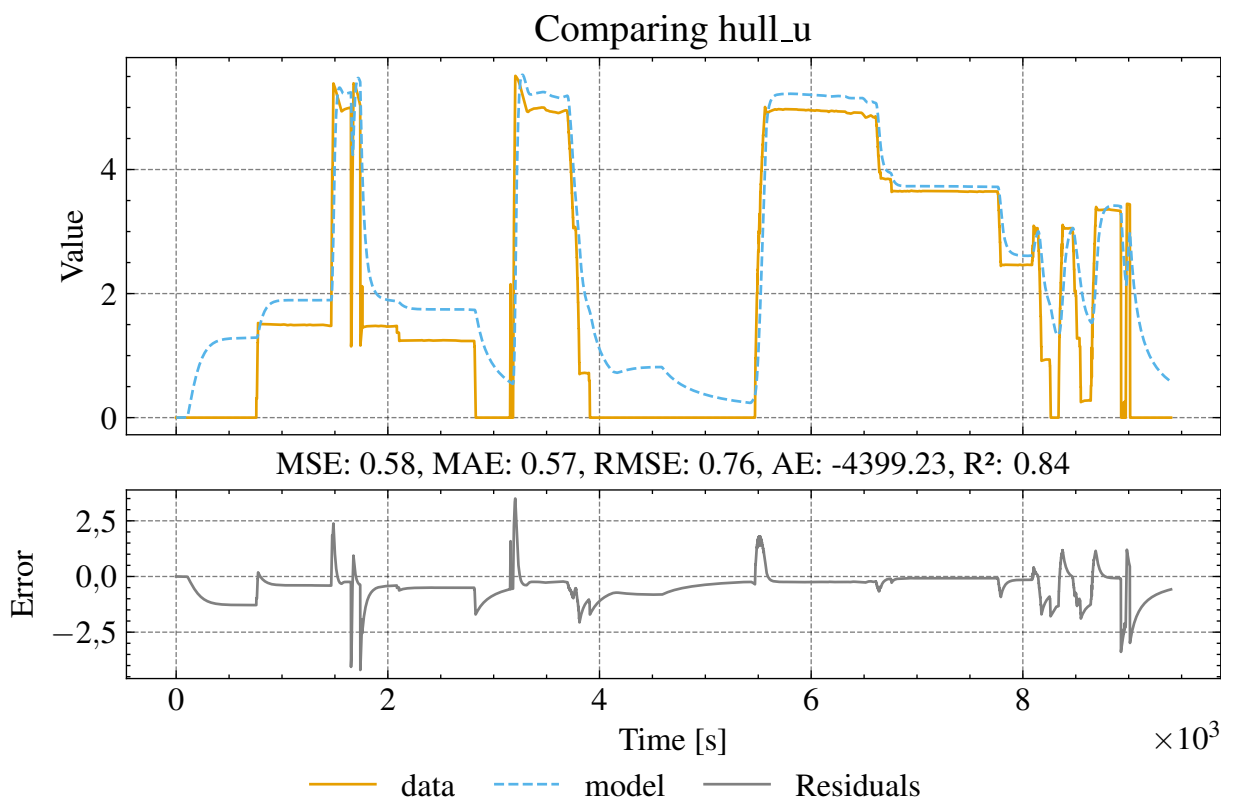
Figura 191 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados da seção F2



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e a prevista pelo modelo otimizado na seção F2. A figura mostra as séries no tempo, o painel de resíduos e métricas de ajuste.

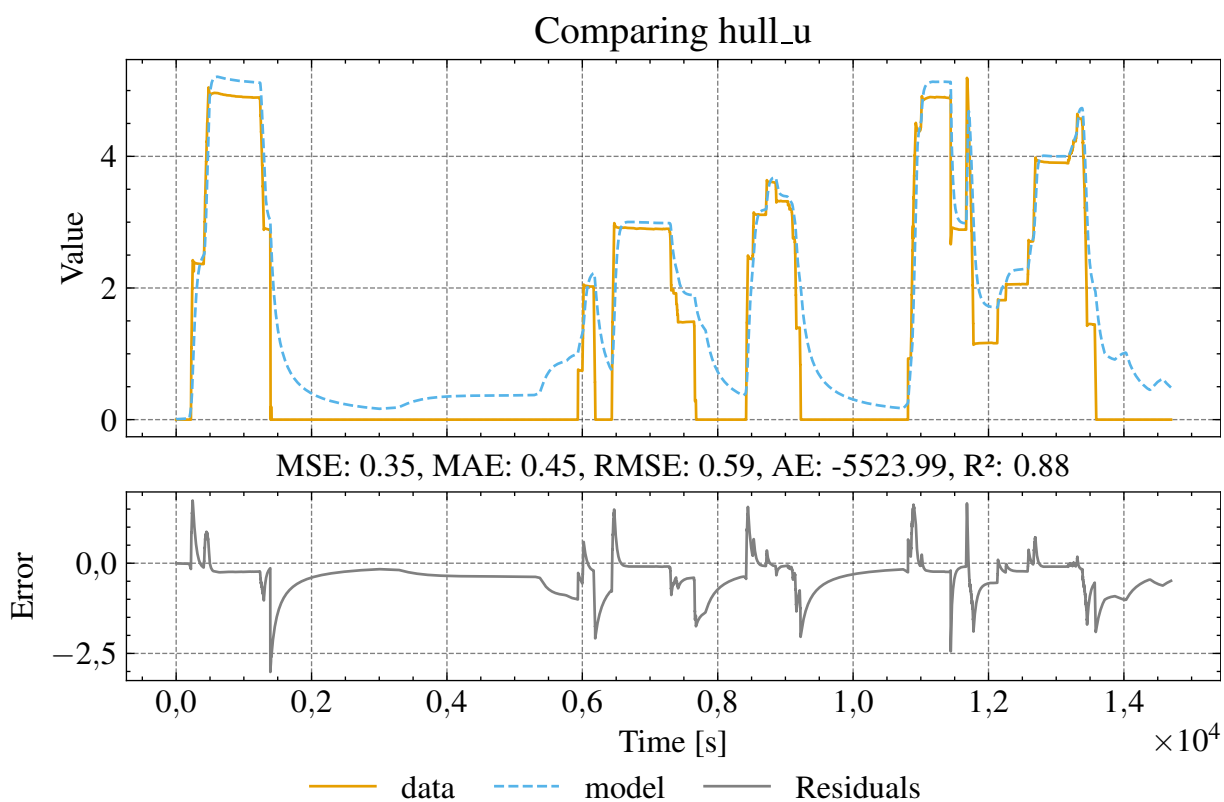
Figura 192 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados da seção F3



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F3. A figura mostra as séries no tempo, o painel de resíduos e métricas de ajuste.

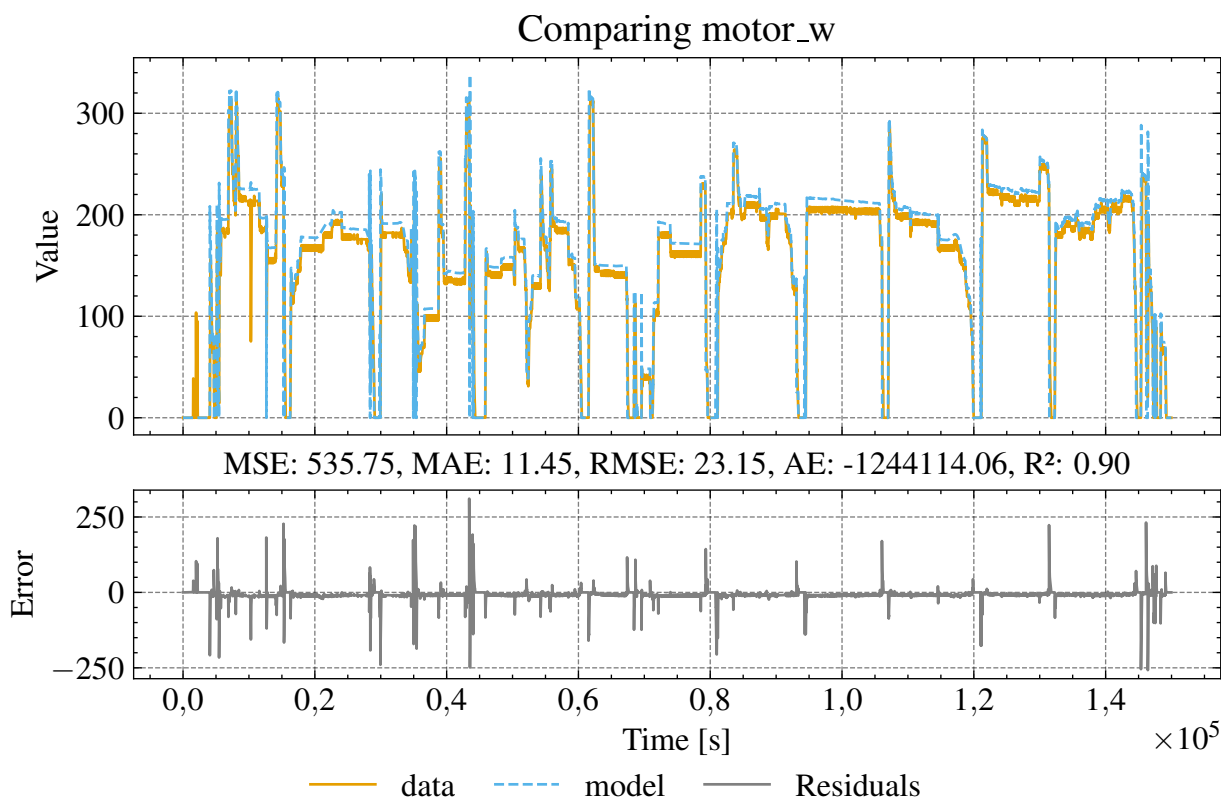
Figura 193 – Comparação do sinal hull\_u do modelo otimizado com os dados da seção F4



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade do casco ( $u_{Hull}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F4. A figura mostra as séries no tempo, o painel de resíduos e métricas de ajuste.

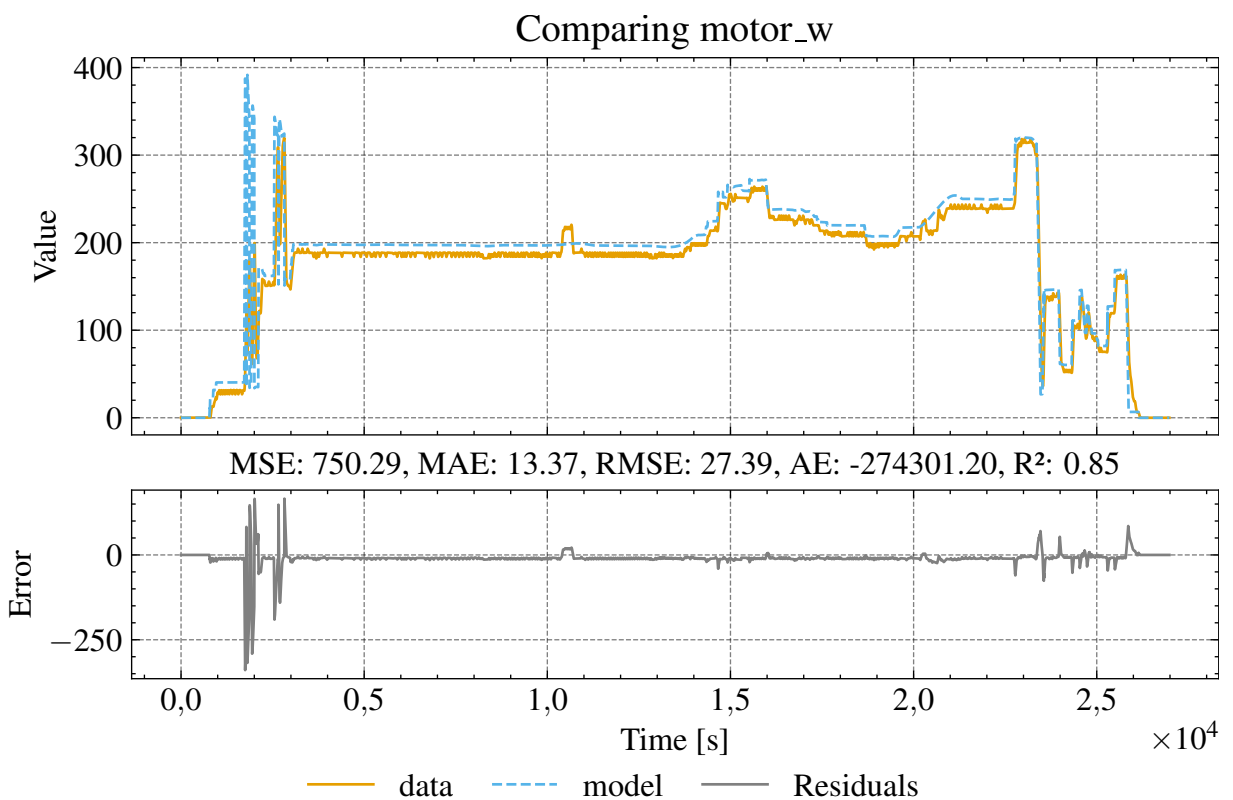
Figura 194 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados da seção D



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção D. São apresentados sinais no tempo, resíduos e métricas de erro para avaliação do ajuste.

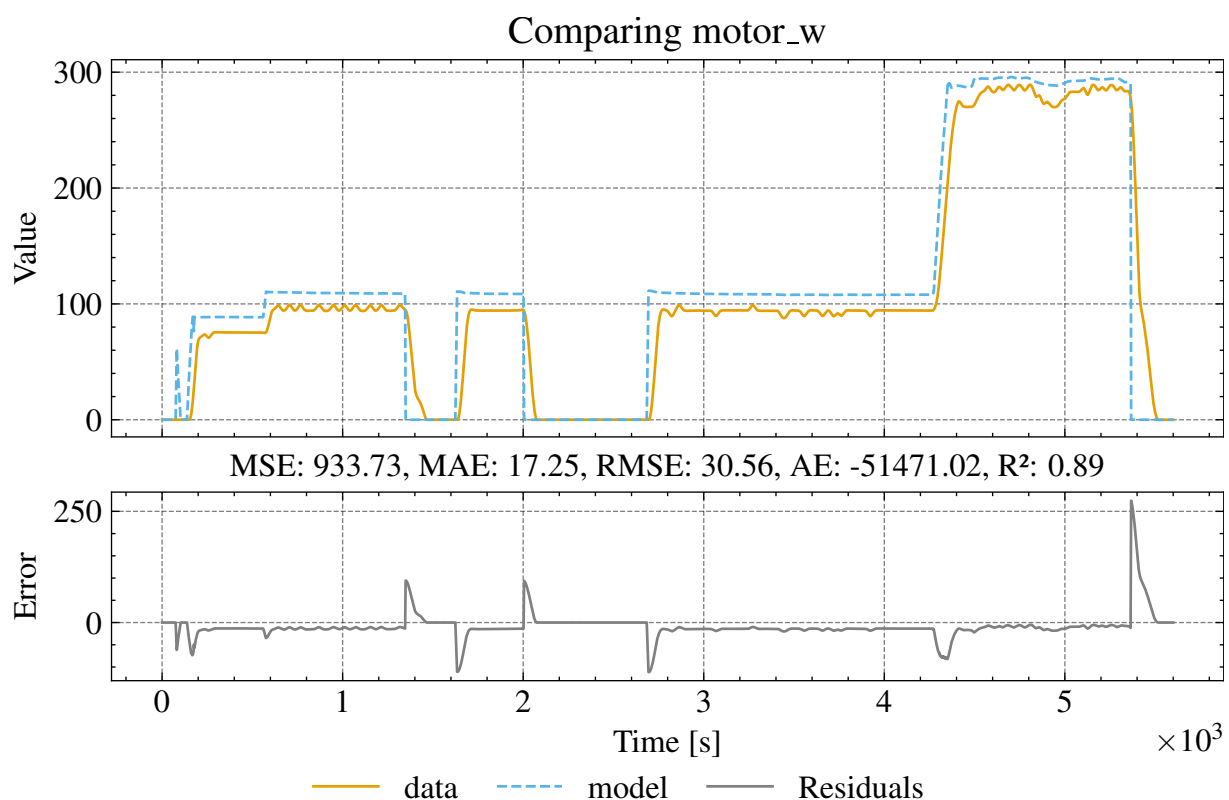
Figura 195 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados da seção E



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção E. São apresentados sinais no tempo, resíduos e métricas de erro para avaliação do ajuste.

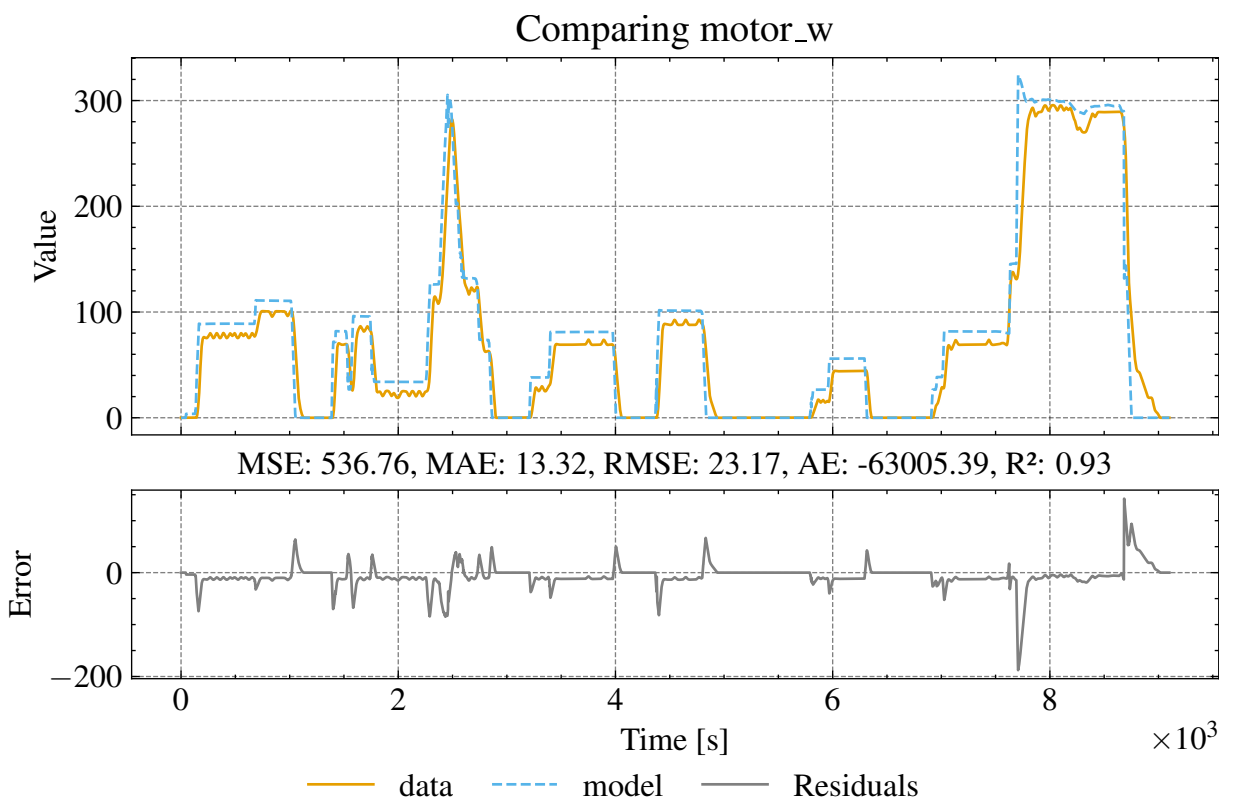
Figura 196 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados da seção F1



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F1. São apresentados sinais no tempo, resíduos e métricas de erro para avaliação do ajuste.

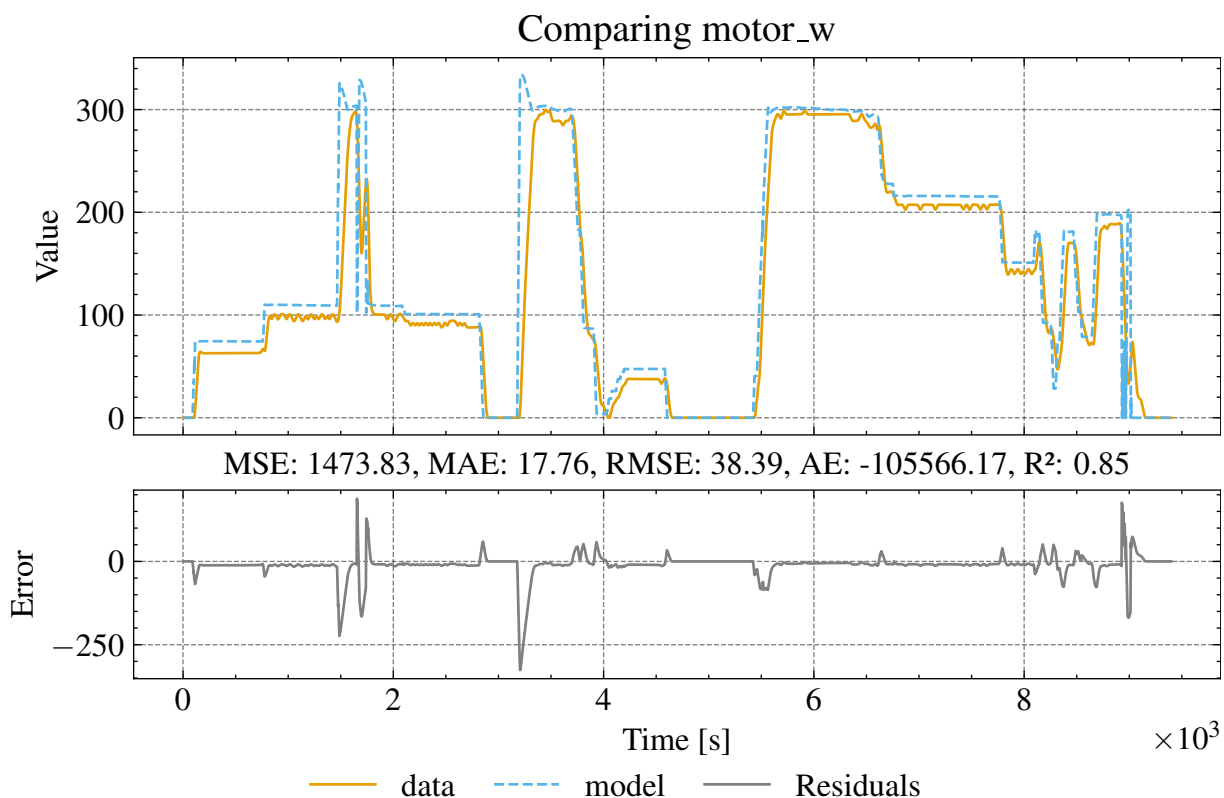
Figura 197 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados da seção F2



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F2. São apresentados sinais no tempo, resíduos e métricas de erro para avaliação do ajuste.

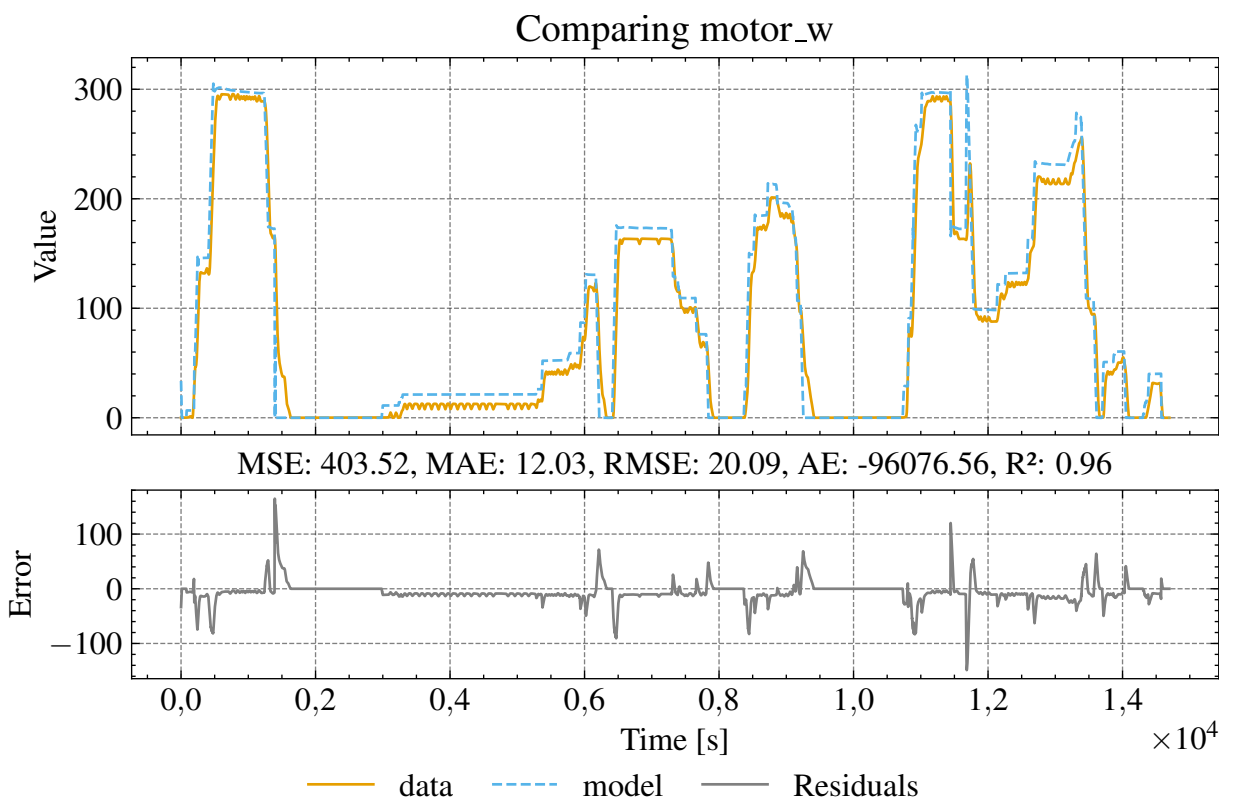
Figura 198 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados da seção F3



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F3. São apresentados sinais no tempo, resíduos e métricas de erro para avaliação do ajuste.

Figura 199 – Comparação do sinal motor\_w do modelo otimizado com os dados da seção F4



Fonte: Elaboração própria (2026).

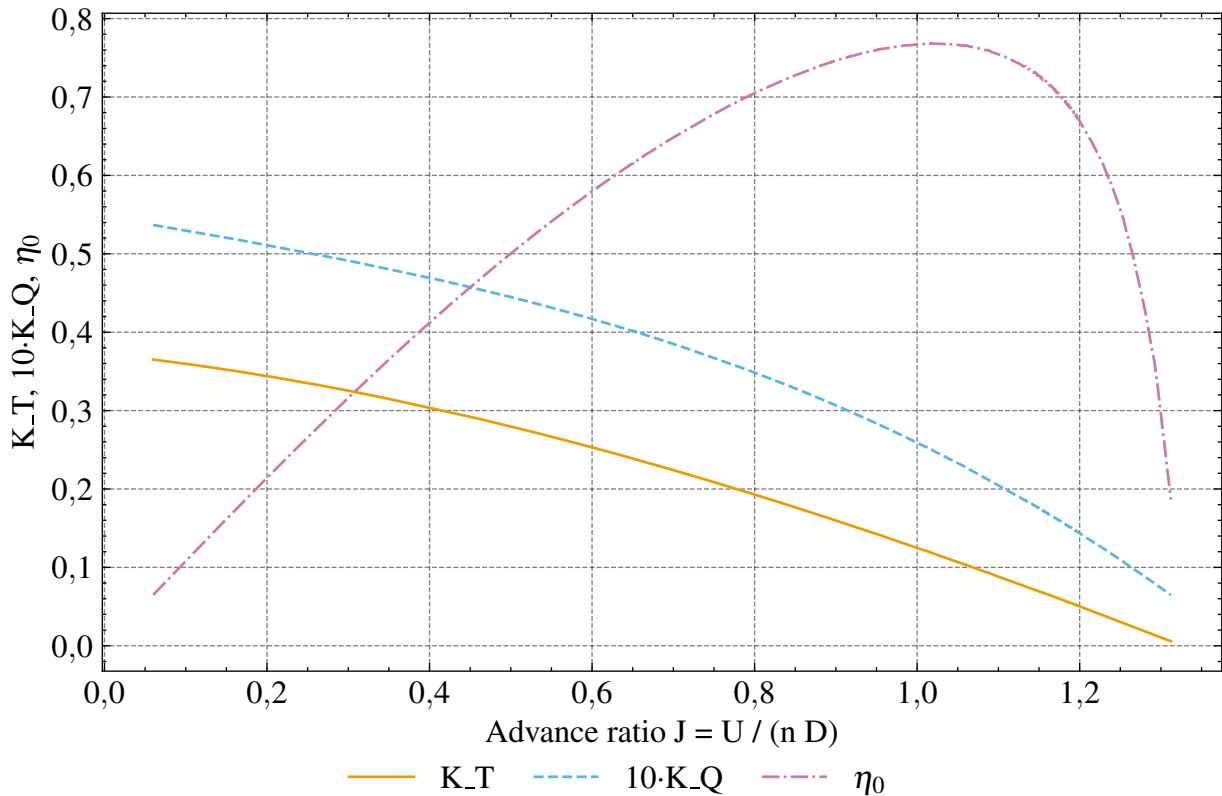
Legenda: Comparação entre a velocidade angular do motor ( $\omega_{Motor}$ ) medida e a predita pelo modelo otimizado na seção F4. São apresentados sinais no tempo, resíduos e métricas de erro para avaliação do ajuste.

## APÊNDICE K – RESULTADOS COMPLEMENTARES DA PROPULSÃO

### K.1 Otimização da propulsão

As figuras desta seção foram obtidas no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_optimization.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

Figura 200 – Desempenho da hélice



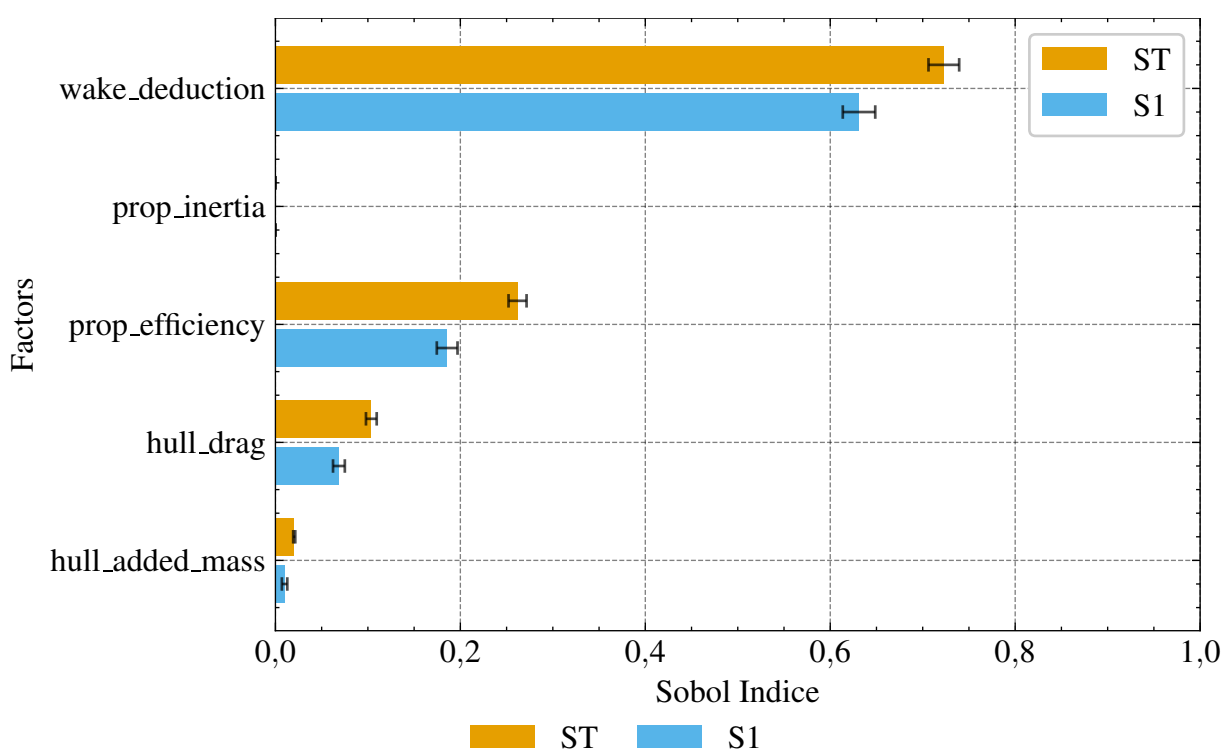
Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Curvas de desempenho da hélice em água aberta obtidas a partir do modelo em regime permanente, apresentando  $K_T$ ,  $10K_Q$  e eficiência  $\eta_0$  em função da razão de avanço  $J$ .

### K.2 Análise de sensibilidade da propulsão

As figuras desta seção foram obtidas no *notebook* <solarboat\_model/models/2020/propulsion/propulsion\_sensitivity.ipynb> (CARDOSO, 2026b).

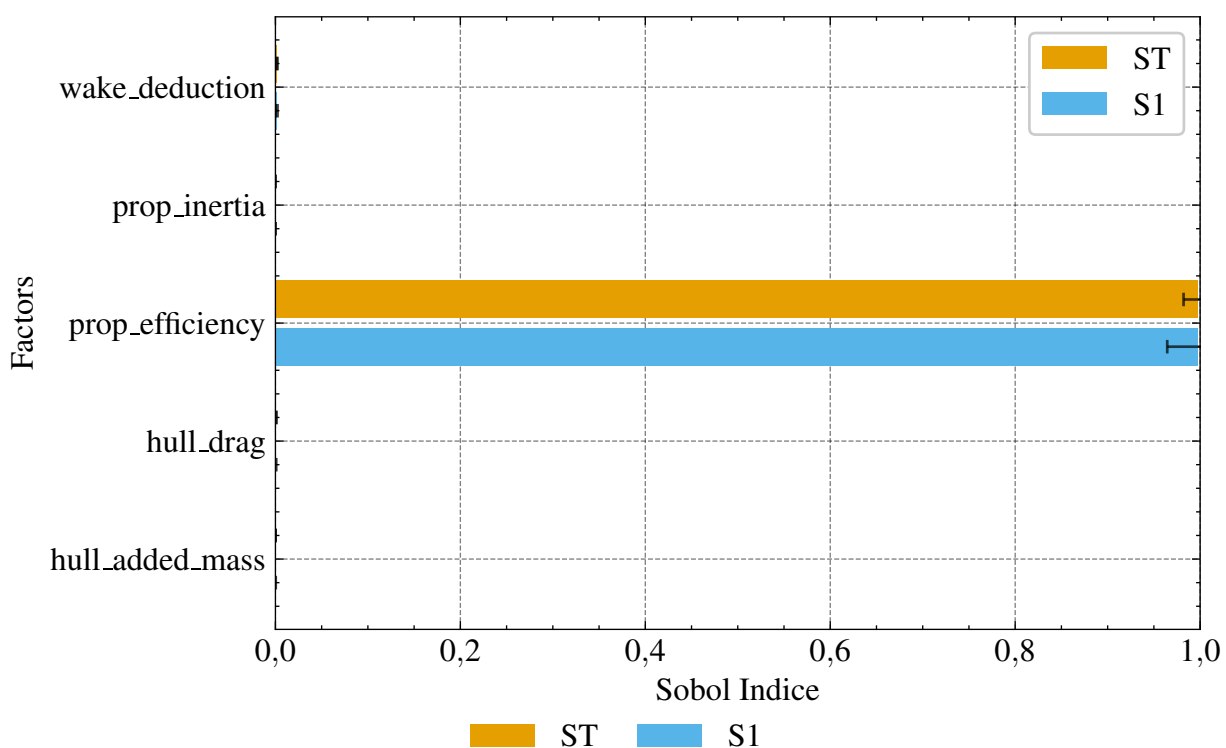
Figura 201 – Índices de Sobol para a saída hull\_r\_t em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $r_{Hull,t}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

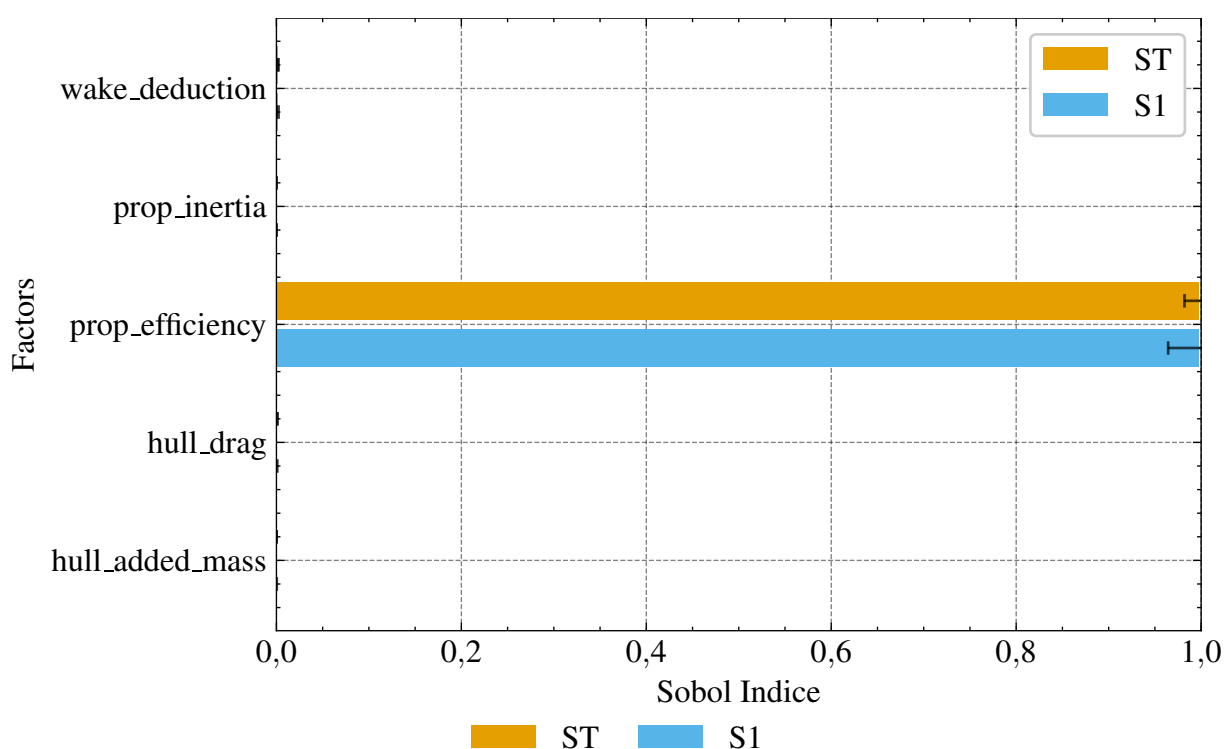
Figura 202 – Índices de Sobol para a saída motor\_i em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $i_{Motor}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

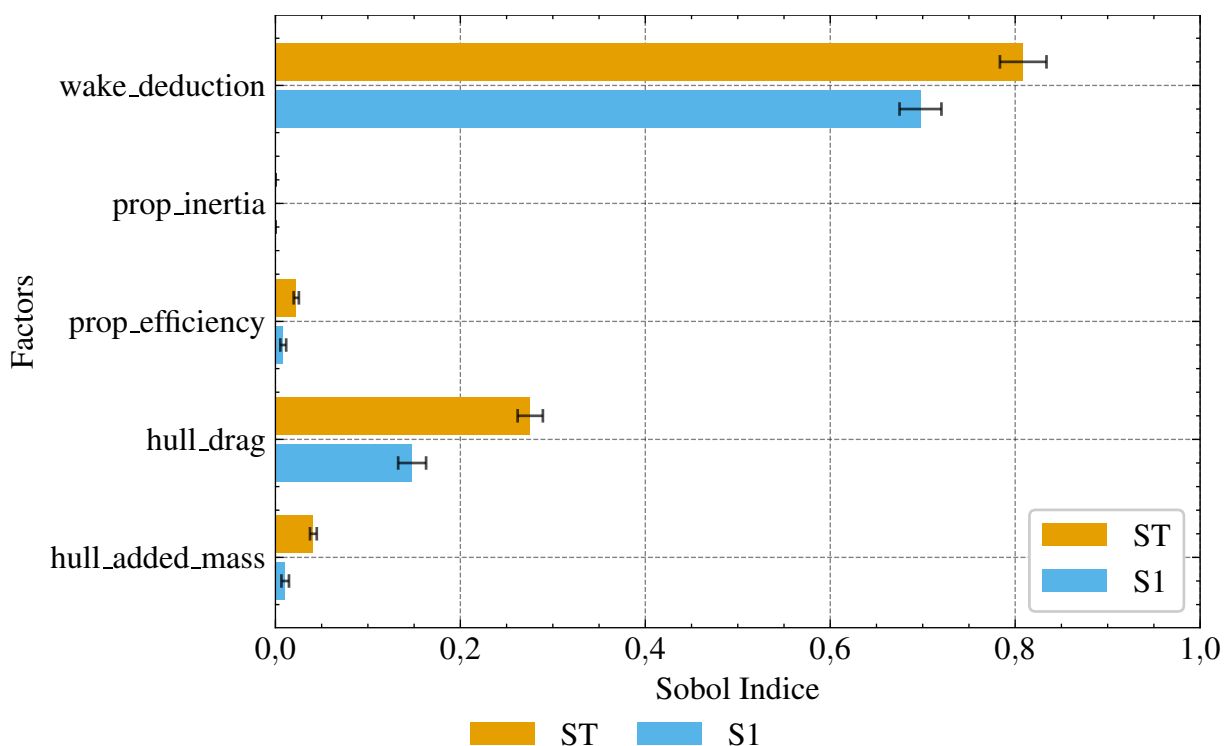
Figura 203 – Índices de Sobol para a saída motor\_q\_load em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $q_{Motor,load}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

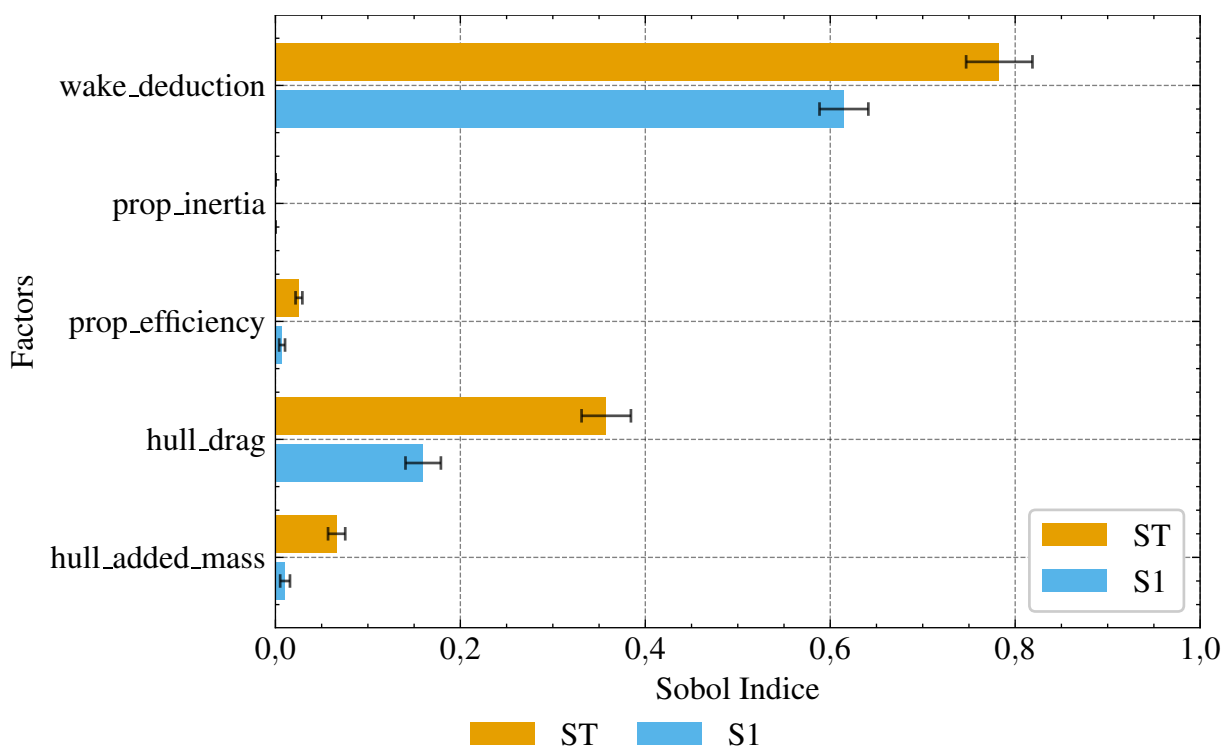
Figura 204 – Índices de Sobol para a saída prop\_j em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $j_{Prop}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

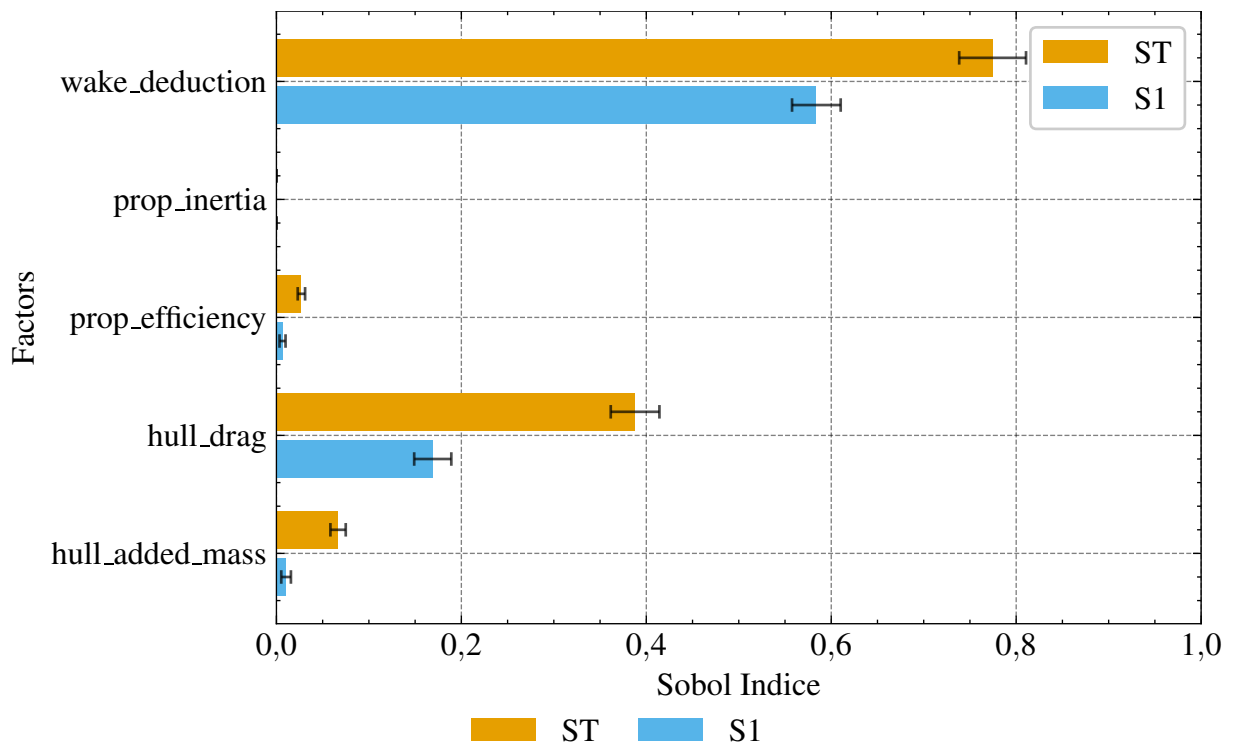
Figura 205 – Índices de Sobol para a saída prop\_k\_q em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $k_{Prop,Q}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

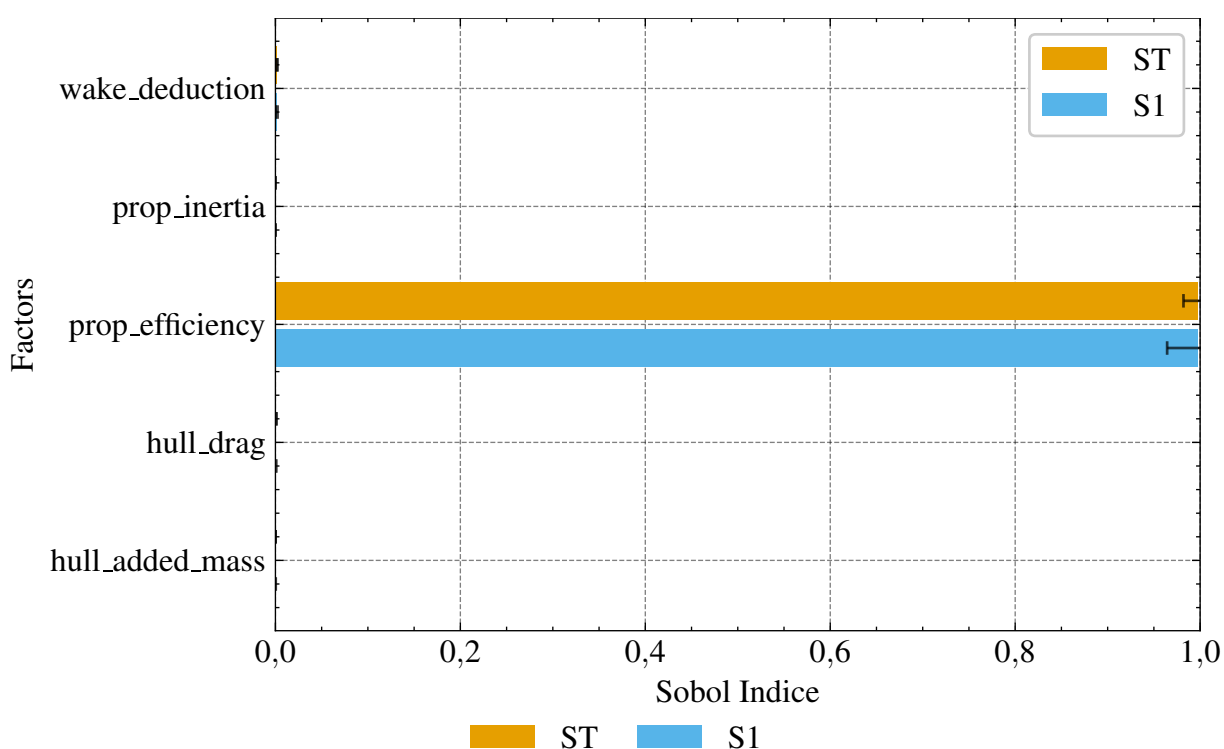
Figura 206 – Índices de Sobol para a saída prop\_k\_t em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $k_{Prop,T}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

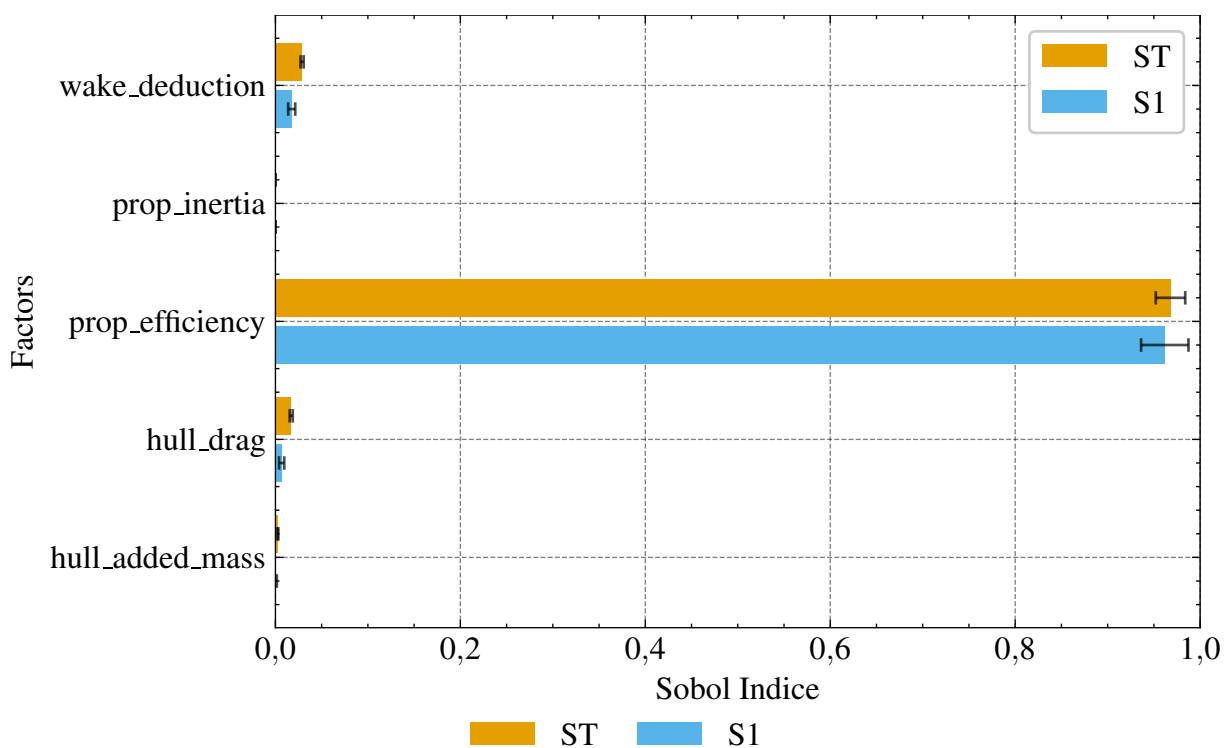
Figura 207 – Índices de Sobol para a saída prop\_q em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $q_{Prop}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

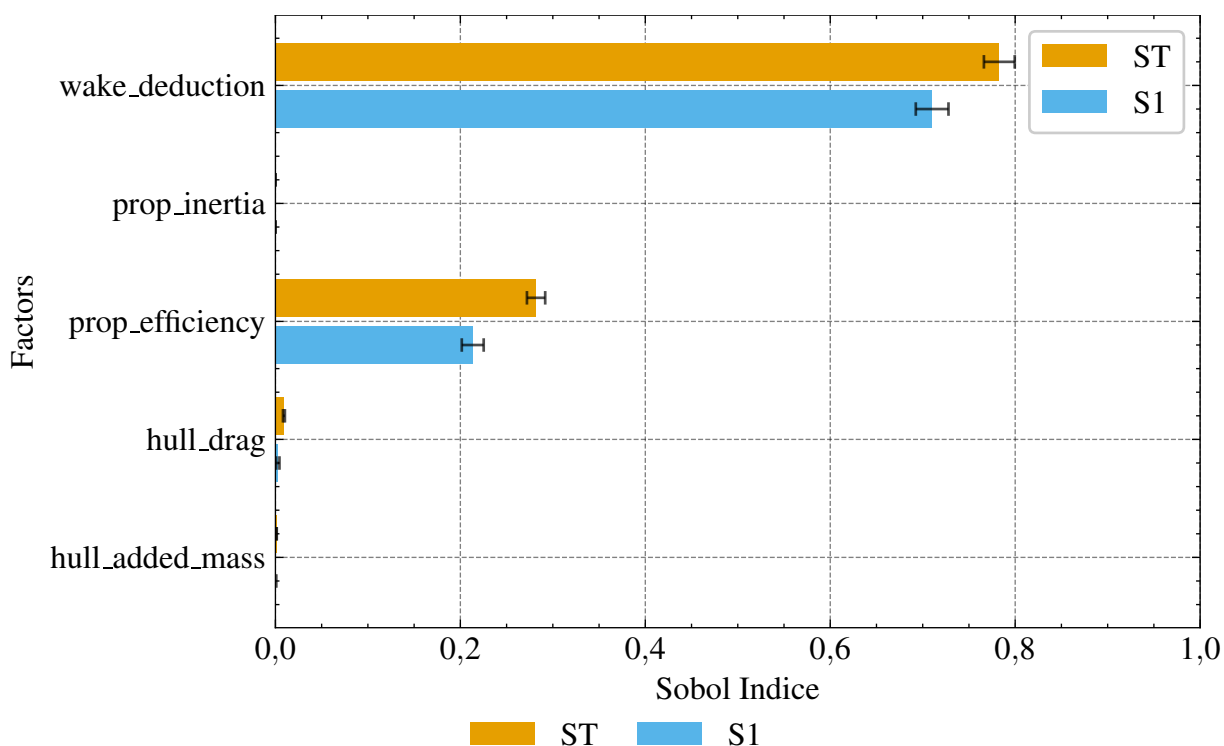
Figura 208 – Índices de Sobol para a saída prop\_t em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $t_{Prop}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

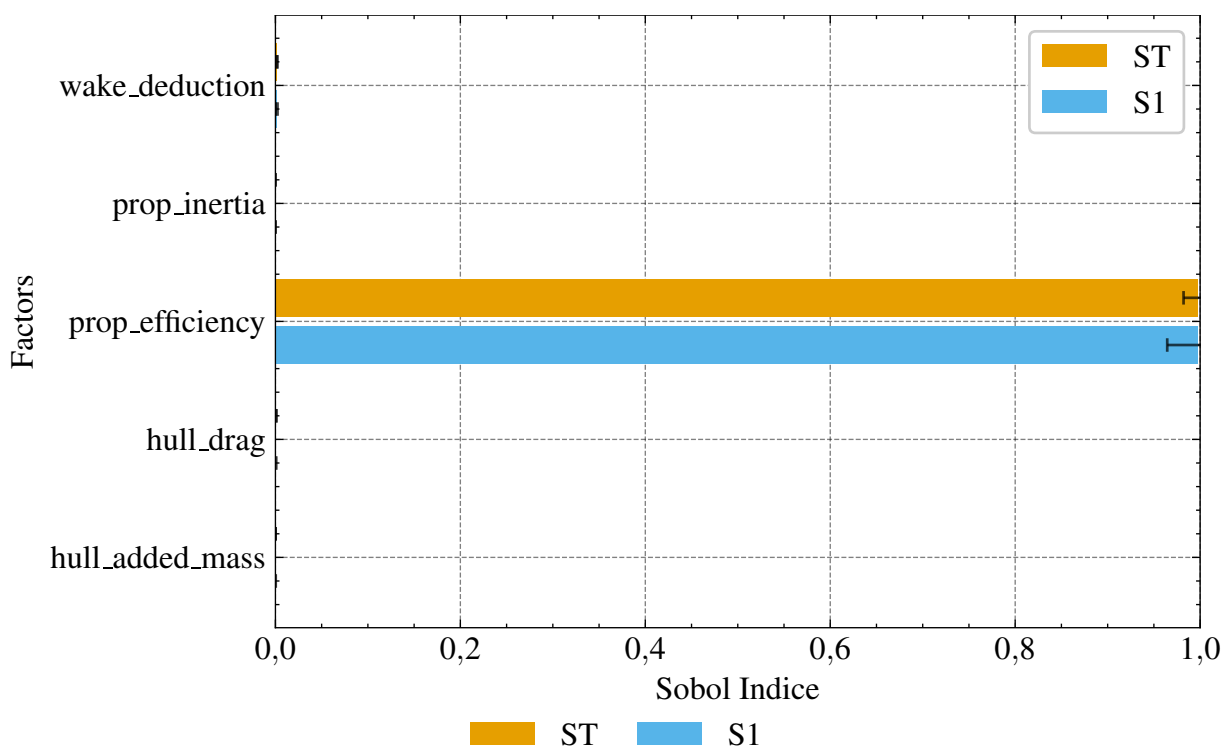
Figura 209 – Índices de Sobol para a saída  $t_{prop,e}$  em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $t_{prop,e}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

Figura 210 – Índices de Sobol para a saída prop\_w em regime permanente



Fonte: Elaboração própria (2026).

Legenda: Análise de sensibilidade global (Sobol) da saída  $\omega_{Prop}$  no modelo de propulsão ao longo do tempo de simulação. São apresentados os índices de primeira ordem ( $S_1$ ) e total ( $S_T$ ) para os grupos de parâmetros definidos no notebook.

## APÊNDICE L – SEÇÕES SEMÂNTICAS DE TREINO E TESTE

As tabelas deste capítulo detalham, para cada parametrização baseada nos dados da competição, as seções semânticas utilizadas, seus intervalos temporais, duração e papel no processo (treino ou teste).

### L.1 Geração

**Tabela 24 – Seções utilizadas na parametrização da geração energética**

Seção	Início	Fim	Duração	Papel	Representação
A	2020-01-29 13:45:00	2020-01-29 16:00:00	02:15:00	Teste	Janela semântica do dia 29/01/2020 (operação da embarcação).
B	2020-01-30 10:00:00	2020-01-30 17:00:00	07:00:00	Teste	Janela semântica do dia 30/01/2020 (operação da embarcação).
D	2020-01-31 10:40:00	2020-01-31 17:20:00	06:40:00	Treino	Janela semântica do dia 31/01/2020, escolhida para calibração.
E	2020-02-01 13:10:00	2020-02-01 16:20:00	03:10:00	Teste	Janela semântica do dia 01/02/2020 (validação).
F	2020-02-02 09:40:00	2020-02-02 12:40:00	03:00:00	Teste	Janela semântica do dia 02/02/2020 (validação).

Fonte: Elaboração própria (2026).

### L.2 Bateria

Tabela 25 – Seções utilizadas na parametrização da bateria

Seção	Início	Fim	Duração	Papel	Representação
D	2020-01-31 10:37:04	2020-01-31 17:24:55	06:47:51	Treino	Evento completo do dia de prova (carga, descarga e sobrecarga).
D12	2020-01-31 10:37:04	2020-01-31 11:24:40	00:47:36	Treino	Carga pré-corrída.
D24	2020-01-31 11:24:40	2020-01-31 13:22:00	01:57:20	Treino	Descarga de corrida (faixa completa).
D23	2020-01-31 11:24:40	2020-01-31 12:58:00	01:33:20	Treino	Descarga de corrida em faixa normal.
D34	2020-01-31 12:58:00	2020-01-31 13:22:00	00:24:00	Treino	Trecho de descarga profunda.
D46	2020-01-31 13:22:00	2020-01-31 17:24:55	04:02:55	Treino	Carga pós-corrída (faixa completa).
D45	2020-01-31 13:22:00	2020-01-31 16:00:00	02:38:00	Treino	Carga pós-corrída sem sobrecarga.
D56	2020-01-31 16:00:00	2020-01-31 17:24:55	01:24:55	Treino	Trecho de sobrecarga pós-corrída.
E	2020-02-01 13:05:00	2020-02-01 16:20:00	03:15:00	Teste	Descarga curta seguida de sobrecarga.
E12	2020-02-01 13:15:00	2020-02-01 13:37:00	00:22:00	Teste	Descarga curta ( 15 min).
E23	2020-02-01 13:15:00	2020-02-01 13:37:00	00:22:00	Teste	Trecho de sobrecarga associado ao evento E.
F1	2020-02-02 08:03:00	2020-02-02 08:22:30	00:19:30	Teste	Trecho curto de carga.
F2	2020-02-02 10:02:15	2020-02-02 10:03:30	00:01:15	Teste	Pulso curto de alta corrente.
F3	2020-02-02 10:21:30	2020-02-02 10:31:00	00:09:30	Treino	Espera + pulso curto + espera + pulso de alta corrente.

Fonte: Elaboração própria (2026).

### L.3 Propulsão

Tabela 26 – Seções utilizadas na parametrização da propulsão

Seção	Início	Fim	Duração	Papel	Representação
D	2020-01-31 11:20:00	2020-01-31 13:25:00	02:05:00	Teste	Recorte manual da seção D para validação da propulsão.
E	2020-02-01 13:14:30	2020-02-01 13:37:00	00:22:30	Teste	Recorte manual da seção E para validação da propulsão.
F1	2020-02-02 09:58:50	2020-02-02 10:03:30	00:04:40	Teste	Recorte manual de transiente curto no dia F.
F2	2020-02-02 10:21:30	2020-02-02 10:29:05	00:07:35	Teste	Recorte manual de transiente de carga no dia F.
F3	2020-02-02 11:54:00	2020-02-02 12:01:50	00:07:50	Treino	Recorte manual escolhido para calibração da propulsão.
F4	2020-02-02 12:25:00	2020-02-02 12:37:15	00:12:15	Teste	Recorte manual final para validação no dia F.

Fonte: Elaboração própria (2026).

## APÊNDICE M – DECLARAÇÃO DE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Somente no último mês, dedicado à verificação e à consolidação do manuscrito, e após a conclusão das etapas metodológicas e de pesquisa e a obtenção dos principais resultados (com exceção do caso de uso), foram utilizados agentes baseados em modelos de linguagem (LLMs) por meio da ferramenta de código aberto `opencode`, com uso dos modelos ChatGPT-5.2 (OpenAI), Gemini 3 (Google) e Claude Opus 4.5 (Anthropic), com o objetivo de melhorar a consistência do texto e apoiar verificações técnicas do equacionamento proposto, com base nas referências fornecidas pelo autor. Todo conteúdo incorporado ao manuscrito foi revisado pelo autor, que mantém responsabilidade integral pelo texto final.

Nessa etapa, após a validação da parte técnica e com aproximadamente 70% do documento escrito, o autor utilizou LLMs para auxiliar o preenchimento e atualização de tabelas, equações e citações nos arquivos  $\text{\LaTeX}$ , de acordo com os resultados dos *notebooks* desenvolvidos pelo autor.

Como uma etapa adicional, o autor utilizou agentes com a finalidade de correção gramatical, ajuste de tonalidade acadêmica, e verificação de citações.