

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* IBIRITÉ
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Lorran Luciano Oliveira Mendes

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA
SIMULAÇÃO E CONTROLE DE TORQUE EM VEÍCULO**

Ibirité - MG
2025

LORRAN LUCIANO OLIVEIRA MENDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA
SIMULAÇÃO E CONTROLE DE TORQUE EM VEÍCULO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Ibirité para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Diego Henrique de Souza Chaves

Ibirité - MG
2025

M538d Mendes, Lorrان Luciano Oliveira.
2025 Desenvolvimento de um modelo computacional para simulação e controle de torque em veículo. [manuscrito] / Lorrان Luciano Oliveira Mendes. – Ibirité: Instituto Federal de Minas Gerais, 2025.

64 f.; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de controle e automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Ibirité, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Diego Henrique de Souza Chaves

1. Simulação (computador). 2. Automóveis – dispositivos de transmissão. 3. Automóveis – consumo de combustíveis. I. Chaves, Diego Henrique de Souza. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Ibirité*. III. Título

CDU 629


Catálogo: Luciana Batista Neves - CRB-6/2000

Lorran Luciano Oliveira Mendes


DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO E CONTROLE DE TORQUE EM VEÍCULO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Ibirité* para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.


Aprovado em: 20/02/2025 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO HENRIQUE DE SOUZA CHAVES**
Data: 03/04/2025 15:38:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Diego Henrique de Souza Chaves - IFMG (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO HENRIQUE BARBOSA DE CARVALHO TA**
Data: 02/04/2025 23:13:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Henrique Barbosa de Carvalho Tavares - IFMG

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS DIAS DA SILVA JUNIOR**
Data: 03/04/2025 12:48:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Carlos Dias da Silva Júnior - IFMG

Dedico esta monografia aos meus amados pais, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar minha profunda gratidão ao meu orientador, Diego Henrique de Souza Chaves, pelo apoio, orientação e dedicação ao longo deste trabalho. Sua experiência e paciência foram essenciais para o desenvolvimento do projeto, e sou verdadeiramente grato por todo o conhecimento e suporte que me ofereceu. Dedico este trabalho à memória da minha querida mãe, Rozeli, cuja presença, amor e ensinamentos continuam a me guiar diariamente. Sua força e dedicação foram fonte constante de inspiração em minha jornada, e carrego comigo tudo o que aprendi com ela; seu amor incondicional e seus conselhos permanecerão para sempre em meu coração. Ao meu pai, Flavinei, agradeço pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Você sempre acreditou em mim, esteve ao meu lado em todos os momentos, ajudando-me a superar desafios e a avançar com determinação. Aos meus irmãos, Luan e Cauã, sou imensamente grato pelo apoio durante minha formação e desenvolvimento. Vocês foram fonte constante de motivação e compreensão, e sinto-me privilegiado por tê-los ao meu lado. À minha noiva, Lorena, expresso minha eterna gratidão pelo carinho, paciência e apoio inabalável. Você esteve ao meu lado em cada etapa deste processo, oferecendo palavras de incentivo nos momentos difíceis e celebrando cada conquista comigo. Seu amor e parceria foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, e sou imensamente grato por tê-la ao meu lado nesta caminhada. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Este estudo propõe o desenvolvimento de um modelo computacional para simulação e controle de torque em um veículo equipado com câmbio automático de nove marchas, operando sob condições com motorista e quatro passageiros. Para atingir este objetivo, foram coletados dados veiculares por meio do sistema *On-Board Diagnostics* (OBD), permitindo a identificação e análise das variáveis para o controle do torque, tais como a rotação do motor, a posição do acelerador e os diferentes componentes do torque. Com base na análise dos dados, foi desenvolvido um modelo computacional que integra controladores PID em malha fechada e em modelo ARX para ajustar a aplicação do torque. As simulações realizadas, por meio do ambiente de modelagem, evidenciaram que a combinação do controlador PID é eficaz para reduzir a discrepância entre o torque requisitado e o torque efetivamente aplicado. Em especial, a configuração denominada PIDARX6 demonstrou o melhor desempenho, apresentando um erro médio (RMSE) satisfatório em relação à curva de consumo mínimo, o que sugere um potencial significativo para a redução do consumo de combustível e a melhoria da eficiência energética do veículo. Dessa forma, o modelo desenvolvido contribui para o aprimoramento do desempenho dos veículos, oferecendo uma ferramenta promissora para a melhoria dos sistemas veiculares em condições reais de operação.

Palavras-chave: Simulação Computacional, Câmbio Automático, Modelagem Veicular, Eficiência Energética.

ABSTRACT

This study proposes the development of a computational model for the simulation and control of torque in a vehicle equipped with a nine-speed automatic transmission, operating under conditions with a driver and four passengers. To achieve this objective, vehicular data was collected through the On-Board Diagnostics (OBD) system, allowing the identification and analysis of the variables for torque control, such as engine rotation, accelerator pedal position, and the different torque components. Based on the data analysis, a computational model was developed that integrates closed-loop PID controllers and an ARX model to adjust the torque application. The simulations conducted in the modeling environment demonstrated that the combination of the PID controller model is effective in reducing the discrepancy between the requested torque and the torque actually applied. In particular, the configuration called PIDARX6 showed the best performance, presenting a satisfactory mean error (RMSE) relative to the minimum consumption curve, which suggests a significant potential for reducing fuel consumption and improving the vehicle's energy efficiency. Thus, the developed model contributes to the enhancement of vehicle performance, offering a promising tool for improving vehicular systems under real operating conditions.

Keywords: Computer Simulation, Automatic Transmission, Vehicle Modeling, Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Potência específica (kW/L) e razão potência-peso (W/kg) ao longo dos anos (1970 a 2010). Fonte da imagem: Adaptado de (Decicco, 2010).	19
Figura 2 – Ilustração simplificada do sistema de transmissão do veículo usado para a coleta dos dados.	26
Figura 3 – Corte longitudinal de um motor 4 cilindros	27
Figura 4 – Exemplo de Câmbio automático	28
Figura 5 – Eixo Cardan	29
Figura 6 – Funcionamento do Diferencial de um veículo.	30
Figura 7 – Mapa de consumo de combustível do motor (OOL).	33
Figura 8 – Sistema de controle em malha aberta.	37
Figura 9 – Sistema de controle em malha fechada.	38
Figura 10 – Resposta temporal de um sistema sem controle e com um controlador PID ajustado.	40
Figura 11 – Motor_Torque_Atual x Tempo	41
Figura 12 – Variação da rotação do motor ao longo do tempo.	42
Figura 13 – Variação do torque mínimo do motor ao longo do tempo.	43
Figura 14 – Torque requisitado do motor ao longo do tempo.	44
Figura 15 – Torque de fricção do motor ao longo do tempo.	45
Figura 16 – Variação da temperatura da água ao longo do tempo.	46
Figura 17 – Mapa de calor de correlação.	47
Figura 18 – Gráfico de dispersão: Saída predita vs. Saída real.	49
Figura 19 – Processo de coleta dos dados a partir do gráfico.	50
Figura 20 – Pontos extraídos do gráfico.	51
Figura 21 – Ajuste polinomial dos pontos extraídos.	52
Figura 22 – Modelo do sistema no Simulink.	53
Figura 23 – Comparação das respostas para todas as configurações de PID.	54
Figura 24 – Comparação do PID 6.	55
Figura 25 – Comparação entre a saída do modelo ARX e o Motor_Torque_Atual para as entradas do sistema.	56
Figura 26 – Diagrama do sistema implementado com novas variáveis de entrada.	57
Figura 27 – Modelo ARX em malha fechada.	58
Figura 28 – Comparação das respostas para todas as configurações de PID com ARX.	58
Figura 29 – Comparação com PIDARX6.	59
Figura 30 – Comparação dos resultados.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de parâmetros coletados	31
Tabela 2 – Correlação direta entre variáveis e o torque real do motor.	47
Tabela 3 – Coeficientes do polinômio ajustado.	51
Tabela 4 – Parâmetros das configurações PID.	53
Tabela 5 – Valores de RMSE dos torques para cada teste de PID.	54
Tabela 6 – Funções de transferência do modelo ARX	56
Tabela 7 – Parâmetros das configurações PID para o modelo ARX.	57
Tabela 8 – Valores de RMSE dos torques para cada teste de PID com ARX.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OBD	<i>On-Board Diagnostics.</i>
CAN	<i>Controller Area Network.</i>
OOL	<i>Optimal Operating Line.</i>
WOT	<i>Wide Open Throttle.</i>
CVT	<i>Continuously Variable Transmission.</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error.</i>
ARX	<i>AutoRegressive with eXogenous input.</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative.</i>
VSP	<i>Vehicle Specific Power.</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Organização do Texto	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	METODOLOGIA	31
3.1	Análise dos Dados	34
3.2	Modelagem	35
<i>3.2.1</i>	<i>Modelos ARX</i>	36
3.3	Controlador	37
<i>3.3.1</i>	<i>Representação no Domínio de Laplace</i>	39
3.4	Ajuste de Parâmetros do Controlador PID	39
4	RESULTADOS	41
4.1	Análise do ajuste da função de transferência	49
4.2	Simulação e controle do modelo de função de transferência	52
4.3	Modelo ARX	55
4.4	Controle PID com modelo ARX	56
5	CONCLUSÃO	61
5.1	Trabalhos Futuros	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, a coleta de dados relevantes sobre a eficiência, qualidade e a vida útil dos veículos tornou-se uma prática consolidada e fundamental na indústria automobilística. À medida que a produção em série de veículos se expandiu e a diversidade de modelos aumentou, as montadoras enfrentaram um desafio significativo: oferecer uma experiência de usuário que alie potência e conforto de maneira harmoniosa e eficiente (Abukhalil *et al.*, 2020).

A busca pela melhor experiência do usuário é, portanto, um foco para as indústrias automobilísticas atuais, que se empenham em melhorar os aspectos relacionados à eficiência do consumo de combustível e ao conforto dos veículos, assegurando que cada modelo oferecido no mercado não apenas atenda, mas crie boas expectativas nos consumidores (Motte; Hong, 2021).

Nessa perspectiva, a missão de um fabricante de automóveis transcende a simples oferta de veículos, envolvendo a criação de uma experiência completa para os clientes. Embora inovações tecnológicas, como a assistência à condução, impulsionem a indústria, a experiência do cliente em todas as circunstâncias permanece como um dos principais desafios na produção em massa de veículos (Abukhalil *et al.*, 2020). Portanto, a integração de novas tecnologias deve ser cuidadosamente equilibrada com um compromisso com o desempenho e a eficiência do veículo, a fim de proporcionar uma melhor experiência ao cliente, garantindo a confiabilidade e a satisfação dos motoristas e passageiros. Isso requer testes com dados precisos e rigorosos, assegurando que a inovação seja sempre aliada à responsabilidade e ao bem-estar do consumidor (Chojnacki; Delattre, 2022).

Ademais, é notável que uma das estratégias mais prevalentes e amplamente adotadas para a coleta de dados provenientes dos sensores veiculares é a instrumentação utilizando o Diagnóstico de Bordo (*On-Board Diagnostics*) — OBD (Silva, 2018). Essa tecnologia estabelece uma conexão direta e precisa com a unidade de controle do motor do veículo, possibilitando a obtenção eficiente e detalhada de informações provenientes de uma variedade de sensores distribuídos pelo veículo (Silva, 2018). Por meio dessa metodologia, torna-se possível capturar não apenas dados isolados, mas uma ampla gama de informações relacionadas ao comportamento e funcionamento do veículo em diferentes condições de uso e ambientes de operação. Os dados obtidos via OBD servem para análises subsequentes, permitindo uma compreensão mais profunda e abrangente do desempenho do veículo e dos sistemas a ele relacionados (Silva, 2018).

Dessa forma, a coleta e análise de dados veiculares emergem como práticas fundamentais para diversos propósitos. Essas informações revelam aspectos importantes sobre o desempenho do veículo e o comportamento do motorista, contribuindo para seu aprimoramento. Na Indústria 4.0, os veículos se integram aos sistemas das manufaturas antes mesmo da montagem, com cada peça e etapa de produção interligadas de forma física e virtual, o que potencializa as projeções e o desenvolvimento de estratégias de gestão eficazes (Silva, 2018). Além disso, os dados têm um potencial significativo para o gerenciamento, possibilitando o planejamento detalhado da frota,

a elaboração de planos de produção precisos e a redução de custos operacionais por meio do monitoramento efetivo e inteligente dos motoristas e veículos (Ferreira, 2023).

No entanto, é importante ressaltar que a coleta precisa de dados veiculares enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito à necessidade de capturar informações de forma completa, sem perdas e garantindo a segurança dos dados (Motte; Hong, 2021). Com a tecnologia atual de instrumentação e comunicação por meio do *Controller Area Network* (CAN), torna-se viável coletar dados online, em tempo real e em grandes volumes, o que amplia a importância de garantir a integridade dessas informações ao longo de todo o processo. É fundamental evitar qualquer tipo de perda de dados, especialmente considerando a natureza crítica das informações veiculares para a segurança e eficiência do tráfego (Motte; Hong, 2021). Além disso, é importante considerar os passos subsequentes à coleta dos dados. Uma análise dos dados relevantes é essencial para garantir que as informações coletadas sejam utilizadas de maneira eficaz. Essa análise permite identificar padrões e tendências que podem orientar decisões e melhorias na instrumentação veicular, contribuindo, assim, para uma condução mais segura e com menor consumo (Motte; Hong, 2021).

A análise de dados se torna uma ferramenta fundamental para melhorar o desempenho e a experiência do usuário com o veículo (Motte; Hong, 2021). Ao utilizar ferramentas de análise de testes e técnicas de leitura de dados, torna-se possível obter uma compreensão profunda e detalhada do comportamento dos veículos. Essa abordagem permite não apenas monitorar o desempenho, mas também identificar áreas onde há potencial para melhorias significativas no consumo e no desempenho veicular (Silva, 2018).

Em resumo, a habilidade de reconhecer e interpretar tendências nos dados coletados é de suma importância, pois possibilita o desenvolvimento de produtos que não apenas oferecem maior conforto aos usuários, mas também são mais seguros e eficientes em suas operações (Motte; Hong, 2021). Dessa forma, a análise de dados configura-se como um elemento fundamental para a inovação contínua e a excelência na entrega de veículos de qualidade (Motte; Hong, 2021).

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral deste trabalho é estudar o desempenho de um veículo por meio de modelagem, simulação e controle de torque baseados em modelos de FT e ARX, com foco na redução do consumo de combustível e na melhoria da eficiência energética. Para isso, serão consideradas condições de operação sob carga máxima (4 passageiros e 1 motorista), buscando garantir que o motor opere em sua faixa de melhor desempenho. A meta é desenvolver estratégias de controle que aliem alto rendimento a baixo consumo, proporcionando desempenho superior mesmo em situações de maior demanda.

Para alcançar esse objetivo, serão analisadas diversas variáveis do comportamento do veículo, de modo a subsidiar o desenvolvimento de um modelo computacional que represente com precisão as condições reais de funcionamento. Esse modelo permitirá identificar e ajustar os parâmetros que influenciam o desempenho do motor, viabilizando a melhoria da eficiência energética e do consumo de combustível.

1.2 Justificativa

Este trabalho é justificado pela necessidade crescente de desenvolver soluções que promovam maior eficiência no setor automotivo. Veículos que operam sob condições de carga máxima frequentemente apresentam desafios como aumento no consumo de combustível, maior desgaste dos componentes e perda de eficiência operacional. Esses fatores não apenas impactam o custo operacional, mas também a confiabilidade e a durabilidade do sistema como um todo.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está organizado de maneira a proporcionar uma compreensão clara do tema abordado, desde a introdução do problema até a apresentação das conclusões obtidas. A estrutura foi definida conforme descrito a seguir:

1. **Introdução:** Apresenta o contexto, a relevância do tema, os objetivos do trabalho e a justificativa para sua realização.
2. **Referencial Teórico:** Discute os conceitos fundamentais e as teorias que sustentam o tema, incluindo uma revisão crítica da literatura pertinente.
3. **Metodologia:** Descreve detalhadamente os procedimentos adotados para a modelagem e análise do sistema, englobando a coleta de dados, as ferramentas utilizadas e as etapas de implementação do modelo computacional.
4. **Resultados e Discussões:** Expõe os resultados obtidos, interpretando-os à luz do referencial teórico e enfatizando os impactos do modelo proposto no desempenho do motor e na eficiência energética do veículo.
5. **Conclusão:** Sintetiza os principais achados do trabalho, avalia o alcance dos objetivos propostos e sugere direções para pesquisas futuras.
6. **Referências:** Apresenta a lista de fontes bibliográficas utilizadas, conforme as normas estabelecidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização dos sistemas, como o CAN e o OBD, tem permitido a realização de estudos sobre o consumo de combustíveis em diversos veículos. Diversos estudos utilizam essas tecnologias para obter dados, analisando variáveis do motor que influenciam o consumo. Essa abordagem possibilita identificar padrões e desenvolver estratégias que visam melhorar o desempenho veicular e reduzir emissões, demonstrando a importância das análises de dados na interface entre a engenharia automotiva e a tecnologia da informação.

Para avaliar o consumo de combustível, foi realizado um estudo que utilizou dados do sistema de diagnóstico a bordo (OBD), considerando parâmetros como a rotação do motor (RPM) e as leituras do sensor de posição do acelerador. Essa abordagem possibilitou o desenvolvimento de modelos preditivos por meio de técnicas de aprendizado de máquina, demonstrando eficácia e contribuindo para a melhoria da eficiência energética dos veículos (Abukhalil *et al.*, 2020).

Em outro estudo, foram investigados o consumo de combustível e as emissões de CO₂ de veículos leves, utilizando dados coletados pelo Governo do Canadá de 2017 a 2021 (Hien; Kor, 2022). O estudo comparou várias marcas e modelos de veículos por meio de análises estatísticas. Foram aplicados modelos estatísticos de tendências e redes neurais para estimar o consumo e as emissões de CO₂. Os resultados mostraram que um dos modelos de regressão obteve até 98,6% de precisão ao utilizar uma única variável de entrada, enquanto alguns modelos alcançaram aproximadamente 75% de precisão com múltiplas variáveis de entrada. A CNN (*Convolutional Neural Network*) também demonstrou potencial, atingindo uma precisão de cerca de 70%. Com esses resultados, o estudo apresentou recomendações importantes para a compreensão do impacto ambiental no setor de transporte (Hien; Kor, 2022).

A integração da OBD com a CAN representa uma capacidade de captura e análise de dados sobre o desempenho dos veículos. Esses sistemas não apenas coletam uma ampla gama de parâmetros, como a velocidade do veículo, o consumo de combustível e a temperatura do motor, mas também oferecem dados detalhados sobre como os motoristas utilizam seus veículos e as condições de tráfego enfrentadas (Chojnacki; Delattre, 2022). Essas informações são importantes para o desenvolvimento de estratégias que visam aprimorar a segurança viária, melhorar a eficiência operacional e antecipar problemas mecânicos antes que se tornem críticos (Chojnacki; Delattre, 2022).

No entanto, com a complexidade crescente da integração entre OBD e CAN, surge a necessidade urgente de garantir a integridade e a segurança desses dados ao longo de todo o ciclo de vida. Desde a coleta inicial até o armazenamento e a análise subsequente, é essencial implementar medidas robustas de proteção. Isso inclui políticas de segurança rigorosas, padrões de criptografia avançados e práticas de gerenciamento de dados éticas (Chojnacki; Delattre, 2022). Ao proteger essas informações sensíveis contra perdas, violações de privacidade e acessos não autorizados, não apenas salvaguardamos a confiança dos usuários na tecnologia automotiva moderna, mas também garantimos que os benefícios potenciais desses dados sejam plenamente re-

alizados, promovendo uma condução mais segura, eficiente e sustentável (Chojnacki; Delattre, 2022).

A coleta precisa de dados veiculares enfrenta desafios significativos, especialmente no que tange à necessidade de capturar informações de forma abrangente e segura. Com a atual tecnologia de instrumentação e comunicação via CAN, a coleta de dados em tempo real e em grande escala torna-se viável, ressaltando a importância crítica de garantir a integridade e a segurança dessas informações ao longo de todo o processo (Abukhalil *et al.*, 2020).

É essencial considerar múltiplas etapas para a coleta de dados, incluindo o armazenamento seguro das informações e uma análise ampla e inteligente dos dados relevantes. Esta análise permite identificar padrões e tendências que podem guiar decisões e aprimorar a tecnologia embarcada nos veículos, contribuindo assim para uma condução mais segura e eficiente (Motte; Hong, 2021).

A revolução da Indústria 4.0 está remodelando diversos setores econômicos, incluindo o automotivo, por meio da integração de tecnologias de coleta, processamento e análise de dados. No contexto específico de plataformas de feedback para veículos inteligentes, essas tecnologias têm se mostrado importantes para a melhoria contínua do desempenho dos automóveis e para aprimorar a experiência do usuário (Silva, 2018).

Os resultados destacam a viabilidade e a eficácia dessas plataformas na coleta de dados detalhados sobre o comportamento veicular em condições variadas de uso. A análise e o desenvolvimento de tecnologias automotivas contribuem para melhorias na segurança, na eficiência energética, na manutenção preventiva e na satisfação do cliente (Silva, 2018). Em suma, veículos inteligentes representam um avanço significativo na era da Indústria 4.0, promovendo a convergência entre a tecnologia digital e a indústria automotiva para um futuro mais conectado, eficiente e adaptável às necessidades dos usuários modernos (Silva, 2018).

Os dados disponíveis também podem representar um recurso de alto potencial para o gerenciamento estratégico das frotas industriais, permitindo não apenas o planejamento minucioso dos veículos, mas também a elaboração de planos de produção precisos (Ferreira, 2023). Por meio do monitoramento e da análise da forma de utilização dos veículos, é possível aprimorar seu desempenho, o que contribui significativamente para a redução dos custos operacionais. Esse enfoque integrado aprimora a eficiência das operações diárias da empresa, ao mesmo tempo em que fortalece sua capacidade de se adaptar rapidamente às mudanças e demandas dinâmicas do mercado (Ferreira, 2023). Integrando diferentes processos e departamentos por meio de sistemas e tecnologias, a empresa consegue melhorar suas operações, promovendo uma melhor alocação de recursos e coordenação entre equipes (Ferreira, 2023).

Em um estudo, foi apresentada uma estrutura geral para a exploração de dados, fundamentada em um processo de tratamento e análise. Nesse trabalho, foram empregados métodos que demonstram aplicações para a compreensão do problema, incorporando conceitos extraí-

dos de dados de veículos com o objetivo de criar um modelo preditivo a partir de medições. Os resultados evidenciaram a precisão e a efetividade na previsão de danos (Kihm; Miu; Bonato, 2022).

No desenvolvimento dos motores ao longo do tempo, duas métricas fundamentais para avaliar sua eficiência e desempenho são a potência específica e a razão potência-peso. Essas métricas fornecem informações sobre como a tecnologia dos motores evoluiu para atender às crescentes demandas por desempenho e eficiência, especialmente em indústrias como a automotiva (Decicco, 2010). A potência específica refere-se à quantidade de potência que um motor pode gerar por unidade de volume. Uma maior potência específica indica que um motor é capaz de gerar mais potência sem aumentar proporcionalmente seu tamanho, o que é importante para aplicações em automóveis. Por outro lado, a razão potência-peso, expressa em W/kg , mede a potência que um motor pode fornecer em relação ao seu peso. Um motor com uma alta razão potência-peso é mais eficiente, pois consegue gerar mais potência com menos peso, o que é especialmente importante em veículos que precisam de alta mobilidade e eficiência de combustível (Decicco, 2010).

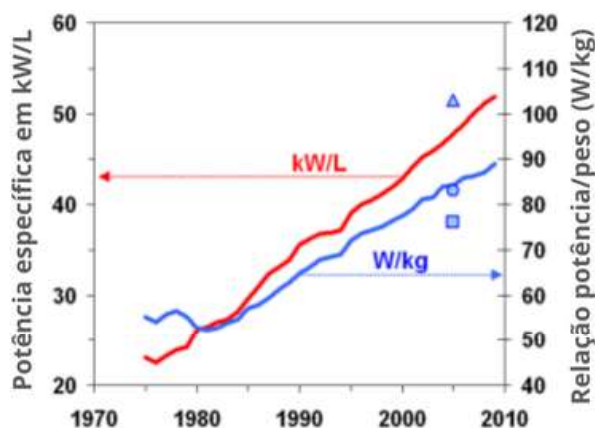


Figura 1 – Potência específica (kW/L) e razão potência-peso (W/kg) ao longo dos anos (1970 a 2010). Fonte da imagem: Adaptado de (Decicco, 2010).

Na figura 1, a curva vermelha representa a evolução da potência específica (kW/L), enquanto a curva azul mostra a razão potência-peso (W/kg). O círculo indica carros sedãs de desempenho médio, o quadrado se refere às caminhonetes e o triângulo representa os sedãs de alto desempenho. Ambas as curvas apresentam um crescimento ao longo do período analisado, o que reflete os avanços nas tecnologias de motores durante as décadas. Inicialmente, na década de 1970, as melhorias na potência específica foram relativamente modestas (Decicco, 2010). No entanto, a partir da década de 1980, observa-se um aumento mais acentuado. Esse crescimento pode ser atribuído a inovações em materiais e processos de fabricação, como o uso de ligas metálicas mais leves e resistentes, bem como ao avanço das tecnologias de combustão interna e

sobrealimentação. Essas inovações permitiram a criação de motores menores e mais potentes, aumentando assim a potência específica (Decicco, 2010).

Da mesma forma, a razão potência-peso também apresentou um crescimento contínuo, embora de forma mais gradual. Esse aumento reflete os esforços para reduzir o peso dos motores, mantendo ou aumentando sua potência, o que é essencial para melhorar a eficiência de combustível e o desempenho global dos veículos (Decicco, 2010). A análise das tendências de desenvolvimento de motores ao longo de várias décadas destaca a importância dessas melhorias tecnológicas para atender às exigências do mercado por veículos mais eficientes, potentes e ambientalmente sustentáveis (Decicco, 2010).

Os veículos híbridos elétricos automáticos enfrentam o desafio de realizar processos eficientes enquanto mantêm um controle preciso da velocidade do motor. O tempo necessário para que a resposta atinja e permaneça estável deve ser breve, para que a velocidade do motor se ajuste rapidamente à demanda, o que impacta diretamente na economia de combustível e na dirigibilidade (Hong *et al.*, 2016). Ademais, a precisão do controle deve garantir que os erros permaneçam dentro de uma faixa aceitável, enquanto a estabilidade deve prevenir oscilações indesejadas durante o processo (Hong *et al.*, 2016).

Para melhorar a eficiência veicular dos HEVs (*Hybrid Electric Vehicles*), o controle da velocidade do motor é realizado por meio do acelerador e do ajuste do avanço de ignição. Um modelo em estudo foi aplicado em testes que compararam as características de torque com dados reais, demonstrando que os resultados apresentaram o comportamento esperado (Hong *et al.*, 2016). As simulações mostraram uma redução significativa na oscilação dos controles de abertura do acelerador e do avanço de ignição, além de uma maior estabilidade na velocidade do motor durante as trocas de marcha (Hong *et al.*, 2016).

Outros estudos utilizaram modelagem veicular para diversas demandas, como a supressão do ripple em veículos elétricos. Para alcançar esse objetivo, foi empregado um observador de perturbações para estimar as interferências causadas pela carga da estrada. Esse modelo é, então, utilizado para estimar o ripple de torque, o qual é ajustado no comando de torque para cancelar suas interferências (Yoon; Castaño; Voulgaris, 2023).

Dessa forma, o estudo conseguiu atenuar as vibrações causadas pelo ripple de torque. Além disso, a aplicação proposta demonstrou um desempenho superior na redução das vibrações, em comparação com a abordagem tradicional. Graças ao processo de estimativa, o sistema foi capaz de se adaptar a mudanças nos parâmetros, conforme evidenciado pelos resultados das simulações realizadas utilizando um modelo de veículo elétrico (Yoon; Castaño; Voulgaris, 2023).

A escolha da marcha em veículos com transmissão manual afeta o nível de ruído, as emissões de poluentes e a eficiência do veículo. Utilizando dados coletados em um ambiente controlado com um veículo de teste, por meio do OBD, que permitiram obter parâmetros como

velocidade, RPM e taxa de fluxo de combustível, um estudo avaliou o impacto da seleção da marcha sobre o nível de pressão sonora e as emissões poluentes (Macedo *et al.*, 2022). Foi identificado que a escolha da marcha tem um efeito mais pronunciado em baixas velocidades, enquanto, em velocidades mais altas, a influência da marcha sobre o ruído é mínima (Macedo *et al.*, 2022).

A análise dos dados revelou que variáveis como a *Vehicle Specific Power* (VSP), o RPM do motor e a carga do motor são fatores importantes na previsão da marcha selecionada. Utilizando técnicas de análise estatística, os pesquisadores puderam identificar padrões e relações entre essas variáveis. Esses modelos ajudam a entender como diferentes torques afetam o desempenho do veículo em termos de ruído e emissões (Macedo *et al.*, 2022).

Os resultados também sugerem que o modelo desenvolvido pode ser útil para criar ferramentas que orientem os motoristas sobre a seleção da marcha ideal, visando reduzir o consumo de combustível e minimizar o impacto ambiental. Futuras pesquisas poderão explorar diferentes tipos de motorização e condições de direção, além de desenvolver estratégias de troca de marchas para melhorar o conforto e a eficiência dos veículos (Macedo *et al.*, 2022).

O sistema de transmissão de dupla embreagem é descrito pelas variáveis angulares do motor, da caixa de câmbio e das rodas, bem como pela diferença de ângulos, considerando a relação de transmissão constante i_c . Os torques do motor e das duas embreagens, assim como o torque de carga do veículo, são considerados entradas do sistema. Neste contexto, os torques das embreagens necessários para uma mudança de marcha ideal constituem o foco principal (Golkani *et al.*, 2017).

O objetivo é definir uma função e impor algumas restrições, de modo que o desconforto do passageiro e as perdas de potência, causadas pelo impulso da velocidade angular da caixa de câmbio e pela dissipação nas embreagens, sejam suavizados. Também é necessário garantir que os torques do motor e das embreagens variem a uma taxa aceitável do ponto de vista prático e que a dissipatividade das embreagens, exigida do ponto de vista mecânico, seja cumprida (Golkani *et al.*, 2017).

Modelos para melhorar o diagnóstico de sistemas de propulsão em veículos, utilizando tecnologias de comunicação, têm se destacado. Essas tecnologias permitem a transmissão eficiente de dados e atualizações de software. Um estudo também ressalta a importância da potência computacional dos veículos e da aquisição de dados. As unidades de controle eletrônico modernas podem processar dados complexos em tempo real, e a computação em nuvem contribui para o gerenciamento de grandes volumes de dados (Guardiola *et al.*, 2021).

A proposta incluiu um sistema de diagnóstico conectado que utiliza uma infraestrutura descentralizada para aprimorar o diagnóstico dos veículos. Parte do software de diagnóstico é executada no veículo, enquanto outra parte é processada na nuvem (Guardiola *et al.*, 2021). Isso permite atualizações de software e diagnósticos mais flexíveis, o que melhora a eficiência

e reduz a necessidade de testes dispendiosos, além de possibilitar ajustes e melhorias contínuas no desempenho dos veículos com base nos dados coletados (Guardiola *et al.*, 2021).

Apesar dessa complexidade, a aplicação de controladores mostrou-se uma ferramenta eficaz para aprimorar o desempenho. A abordagem não apenas alcançou um equilíbrio mais eficaz entre economia e torque, mas também demonstrou um desempenho superior ao controlador ECU tradicional (Gaiselmann *et al.*, 2022). Essa pesquisa sugere que os métodos podem oferecer avanços significativos na melhoria dos sistemas de transmissão automática, proporcionando melhorias notáveis em comparação com métodos convencionais e estabelecendo um novo padrão para a troca de marchas em veículos modernos (Gaiselmann *et al.*, 2022).

Observa-se uma evolução significativa e princípios fundamentais que são essenciais para a compreensão dos sistemas de transmissão atuais. Essa evolução inclui o progresso nos sistemas de dentes de engrenagem, conversores de torque e embreagens, bem como transmissões automatizadas e automáticas, que desempenham papéis importantes na transmissão eficiente de potência e no funcionamento suave dos veículos (Naunheimer *et al.*, 2021).

O desenvolvimento das caixas de câmbio e de seus componentes proporciona uma visão abrangente das interações entre diferentes sistemas automotivos e seus efeitos no desempenho global dos veículos, bem como das tecnologias embarcadas em seu desenvolvimento (Naunheimer *et al.*, 2021).

A seleção das relações de transmissão e a compatibilidade entre motor e transmissão são estratégias para determinar as relações de transmissão adequadas para diferentes condições, bem como para a variação de relação em transmissões continuamente variáveis (Naunheimer *et al.*, 2021). Essa análise mostra como as escolhas de transmissão afetam o desempenho do veículo, incluindo velocidade máxima, capacidade de subida e consumo de combustível, fornecendo parâmetros para elaborar sistemas de transmissão que atendam às diversas necessidades do mercado (Naunheimer *et al.*, 2021).

Ademais, a análise de dados veiculares permite prever a probabilidade de gravidade das lesões em acidentes de trânsito, levando em conta as diferenças entre veículos. Foi desenvolvido um modelo que avalia como variáveis, tais como as características do motorista, tipo de veículo, distância percorrida e condições do acidente, influenciam a probabilidade de lesões leves, incapacitantes ou fatais. O modelo considera a variação das lesões entre diferentes acidentes e motoristas, capturando variações não observadas por meio de parâmetros aleatórios (Atombo; Smith, 2024).

Para garantir a precisão dos resultados, a comparação dos modelos foi realizada separadamente para veículos automáticos e manuais. Os testes mostraram que modelar separadamente os dois tipos de veículos resulta em um ajuste melhor dos dados, evidenciando a importância de considerar as diferenças específicas entre os tipos de transmissão ao analisar os dados (Atombo; Smith, 2024).

A pesquisa sobre o controle de transmissões automáticas tem avançado, com foco na melhoria do conforto dos passageiros e na durabilidade dos componentes. Em um estudo, os autores investigam como o torque e a eficiência podem ser melhorados (Nezhadali; Eriksson, 2015). Constatou-se que a duração das trocas e as oscilações são fatores críticos. Os estudos revelam que o controle eficaz dos elementos envolvidos no sistema é essencial para reduzir desconfortos e melhorar a eficiência das transmissões automáticas (Nezhadali; Eriksson, 2015).

Além disso, os modelos cinemáticos dos conjuntos planetários nas transmissões automáticas são importantes. Eles abordam o uso das pressões hidráulicas como sinais de controle para compreender melhor as dinâmicas das trocas de marcha. No estudo, a abordagem foi ampliada para alcançar os melhores resultados em cada troca de marcha (Nezhadali; Eriksson, 2015).

Em um estudo, foi projetado um modelo composto por 3.356 pontos de dados coletados, abrangendo condições operacionais de 1.000 a 4.500 RPM e níveis de carga variando entre as marchas. As entradas incluem faísca, pedal de aceleração e Vct (Variable Camshaft Timing). Adicionalmente, foram incluídas variáveis ambientais e operacionais menos diretamente relacionadas, mas essenciais para uma previsão precisa em um amplo espectro de condições (Zeng *et al.*, 2020). Entre elas estão a temperatura dos gases de exaustão, que indica a eficiência da combustão e as condições térmicas; a pressão barométrica, que afeta a densidade do ar admitido no motor; a temperatura do ar de admissão, que influencia a mistura ar-combustível; a temperatura do líquido de arrefecimento, que reflete o estado térmico geral do motor; e a umidade relativa, que pode alterar a densidade do ar e, conseqüentemente, a qualidade da combustão. Todas essas variáveis foram normalizadas no intervalo de 0 a 1 para garantir que os dados fossem tratados de forma consistente, evitando problemas de escalas diferentes que poderiam comprometer o desempenho do modelo (Zeng *et al.*, 2020).

A saída do modelo foi o torque do motor, medido em Newton-metro (Nm). A previsão do torque é um desafio devido à natureza complexa e não linear das interações no motor, mas também é uma métrica essencial para avaliar a eficiência e a capacidade de resposta do sistema (Zeng *et al.*, 2020). O modelo foi treinado usando técnicas de inteligência artificial, que atribuem pesos aleatórios aos neurônios na camada oculta. Essa abordagem se destacou por sua velocidade de treinamento e capacidade de generalizar bem, mesmo com um grande volume de dados. Durante o treinamento, foi conduzida uma validação cruzada em dez divisões, o que permitiu ajustar os parâmetros de maneira sistemática e evitar sobreajuste. O número de neurônios na camada oculta foi determinado por experimentos, resultando em 32. Após o treinamento, o modelo foi testado com um conjunto de dados para avaliar sua capacidade de generalizar. Os resultados demonstraram precisão, com um raiz do erro médio quadrático (RMSE) de aproximadamente 9 Nm, representando apenas 2,7% do torque médio, e um coeficiente de correlação de 0,9981, indicando uma forte correspondência entre os valores previstos e os observados (Zeng *et al.*, 2020).

Além disso, o estudo introduziu uma abordagem de ponderação para ajustar o modelo

a condições operacionais específicas. Áreas de interesse, como baixa rotação e carga média — mais frequentes em ciclos de teste padronizados, como UDDS e HWFET — receberam maior peso durante o treinamento. Isso resultou em uma redução significativa do RMSE, com melhorias de até 6 Nm nessas áreas, sem comprometer a precisão global do modelo (Zeng *et al.*, 2020). A ponderação foi implementada por meio de uma matriz de pesos, na qual os pontos de dados mais relevantes para a aplicação receberam valores mais altos, permitindo que o modelo se concentrasse em melhorar a previsão nessas condições. O estudo demonstrou que a combinação da técnica ELM com a abordagem de ponderação oferece uma solução eficiente e flexível para prever o torque do motor. Essa metodologia é especialmente útil para aplicações práticas, como a melhoria da eficiência, o controle de motores e o diagnóstico de falhas (Zeng *et al.*, 2020). O modelo desenvolvido não só reduziu o tempo e o esforço necessários para validar motores em diferentes condições, como também demonstrou potencial para ser adaptado a diversos cenários operacionais, tornando-se uma ferramenta importante para a indústria automotiva. O trabalho destaca o potencial de futuras melhorias no algoritmo ELM, as quais podem aumentar ainda mais a precisão, explorar aplicações em sistemas mais avançados e integrar soluções para diagnósticos em tempo real, abrindo caminho para avanços na eficiência e no desempenho de motores automotivos modernos (Zeng *et al.*, 2020).

O estudo utilizou três variáveis de entrada principais para o modelo de Redes Neurais Artificiais (RNA): o avanço do ponto de ignição (SA – *Spark Advance*), a posição da borboleta do acelerador (TP – *Throttle Position*) e a velocidade do motor (N – *Engine Speed*). As saídas esperadas do modelo foram o BSFC (*Brake Specific Fuel Consumption*) e o torque do motor. O processo teve início com a coleta de dados experimentais em um motor Fiat Tofas 131 de 1400 cc, em condições controladas (Togun; Baysec, 2010b). O avanço do ponto de ignição foi inicialmente ajustado para valores de 0°, 5° e 10° de ângulo do virabrequim, que são representativos das configurações comuns do motor. A posição da borboleta variou entre 50%, 75% e 100%, enquanto a velocidade do motor foi medida em uma faixa de 1500 a 3500 RPM, com incrementos de 250 RPM. Para cada combinação dessas entradas, o torque e o BSFC foram medidos utilizando equipamentos especializados, como transdutores de pressão, analisadores de gases de escape e dinamômetros. Essas medições forneceram um total de 81 conjuntos de dados, representando uma ampla gama de condições operacionais do motor (Togun; Baysec, 2010b).

Para treinar o modelo de RNA, os 81 conjuntos de dados foram divididos em dois grupos: 63 para treinamento e 18 para teste. A rede neural foi configurada com uma camada oculta, contendo 13 neurônios para prever o torque e 15 para o BSFC. O algoritmo de retropropagação ajustou os pesos, minimizando o erro entre as saídas previstas e os valores experimentais. Funções de ativação sigmoid foram usadas para introduzir não-linearidade ao modelo (Togun; Baysec, 2010b). Os dados de entrada foram normalizados para melhorar o desempenho. Após o treinamento, o modelo foi avaliado com os dados de teste, mostrando alta precisão com coeficientes de correlação próximos de 1. Os erros médios percentuais absolutos (MAPE) foram baixos: 0,2912% para o torque no treinamento e 1,74% nos testes, e 1,0186% para o BSFC no

treinamento e 2,7588% nos testes, indicando que o modelo é confiável para prever ambas as variáveis (Togun; Baysec, 2010b).

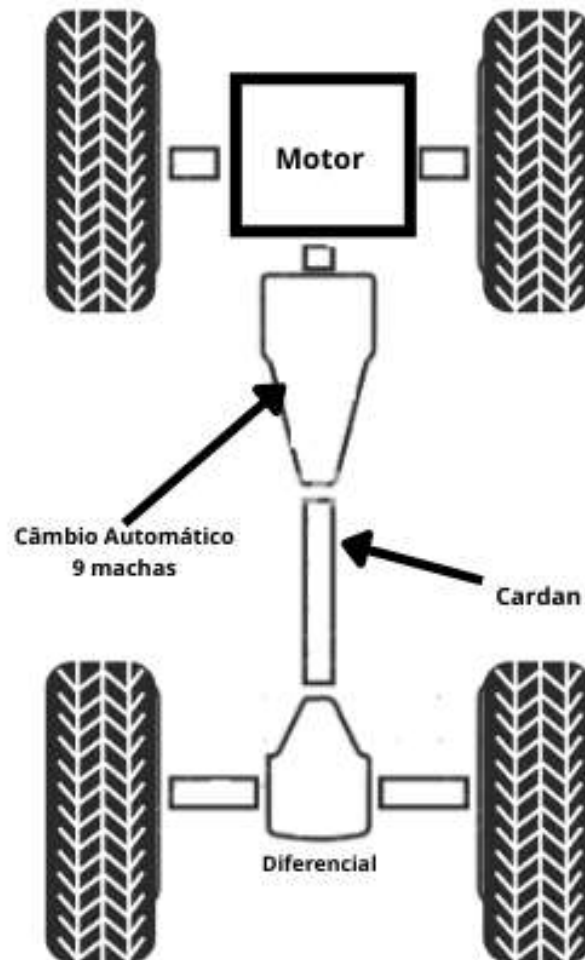
Além das previsões numéricas, o modelo também gerou uma formulação explícita das relações aprendidas. Isso significa que o comportamento da RNA pode ser expresso por equações matemáticas envolvendo os pesos e bias das conexões, permitindo que o torque e o BSFC sejam calculados diretamente a partir das variáveis de entrada, sem reprocessar a rede neural (Togun; Baysec, 2010b).

A programação genética foi aplicada em um estudo para prever o torque e o BSFC, utilizando as mesmas entradas do estudo anterior. Como resultado, a técnica gerou modelos matemáticos explícitos para prever o torque e o BSFC em função das variáveis de entrada (Togun; Baysec, 2010a). A fórmula obtida para o torque incluiu combinações de funções matemáticas, como seno, logaritmos e polinômios, enquanto a fórmula do BSFC apresentou uma estrutura semelhante. No conjunto de treinamento, o modelo alcançou coeficientes de correlação (R^2) de 0,9878 para o torque e 0,9744 para o BSFC, enquanto, no conjunto de teste, os valores foram 0,9869 e 0,9855, respectivamente. Isso demonstra a alta capacidade de generalização do modelo, confirmada pelos baixos erros médios quadráticos (Togun; Baysec, 2010a).

A conclusão do estudo destaca que a programação genética é uma abordagem eficaz para modelar e prever o desempenho de motores a gasolina, apresentando alta precisão e simplicidade. Além de fornecer resultados comparáveis aos de redes neurais artificiais, a GP oferece a vantagem adicional de produzir fórmulas explícitas e interpretáveis, que são úteis para aplicações práticas e para compreender as relações entre os parâmetros do motor (Togun; Baysec, 2010a). Os autores ressaltam que a GP é uma ferramenta promissora para problemas de modelagem em engenharia automotiva e em outras áreas, especialmente onde há disponibilidade de dados experimentais e a necessidade de modelagem de funções altamente não lineares (Togun; Baysec, 2010a).

A Figura 2 exibe a configuração do sistema de transmissão do veículo que será utilizado para a coleta de dados. Este veículo está equipado com um câmbio automático de nove marchas e um sistema de tração integral, projetado para melhorar a performance em diversas condições de estrada. A ilustração oferece uma visão detalhada dos principais componentes do sistema de transmissão, incluindo o câmbio automático, o cardan e o diferencial. Cada um desses componentes desempenha um papel importante na transferência eficiente de potência do motor para as rodas, garantindo o desempenho e a estabilidade do veículo. Esta representação é essencial para compreender a configuração do sistema de transmissão e será fundamental para a análise dos dados coletados.

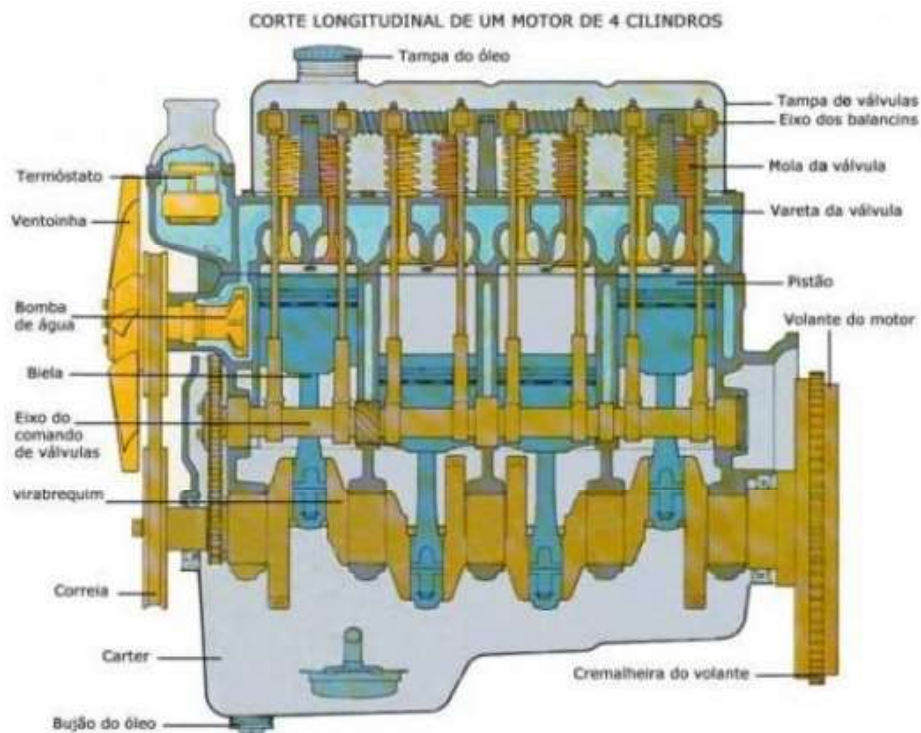
Figura 2 – Ilustração simplificada do sistema de transmissão do veículo usado para a coleta dos dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 3 podemos ver um exemplo de um motor de 4 cilindros e seus componentes internos. Na parte superior do motor, localiza-se a tampa de óleo, por onde o lubrificante é adicionado para a lubrificação dos componentes internos. Abaixo dela, a tampa das válvulas cobre as válvulas e o eixo dos balancins, responsáveis pelo controle da entrada e saída de gases. O termostato regula a temperatura do motor, enquanto a ventoinha auxilia no seu resfriamento, evitando o superaquecimento. Internamente, o pistão movimenta-se dentro do cilindro, gerando potência para o motor, e é conectado à biela, que transmite esse movimento para o virabrequim, o qual converte o movimento linear dos pistões em movimento rotacional.

Figura 3 – Corte longitudinal de um motor 4 cilindros

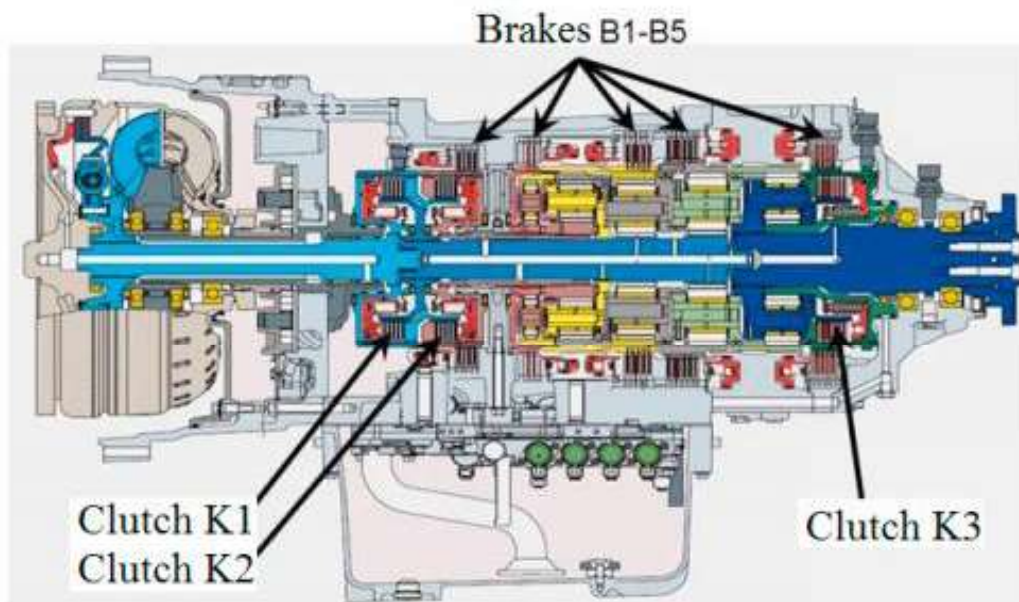


Fonte: (Brito, 2017).

A bomba de água circula o líquido de arrefecimento pelo motor, garantindo o controle térmico, enquanto o volante armazena energia rotacional para assegurar o funcionamento contínuo. A cremalheira do volante conecta-se ao motor de arranque para iniciá-lo. Na parte inferior do motor, o cárter armazena o óleo, e o bujão permite o escoamento do óleo usado durante as trocas. Além disso, a correia transmite movimento entre vários componentes, como o eixo do comando de válvulas, que controla a abertura e o fechamento das válvulas, coordenando o funcionamento do motor (Brito, 2017).

O câmbio automático, posicionado centralmente na Figura 2, é responsável por gerenciar as nove marchas do veículo. Ele ajusta a relação de transmissão de forma automática, respondendo às mudanças na velocidade e nas condições de condução. Na Figura 4, são apresentados os componentes internos de um câmbio automático.

Figura 4 – Exemplo de Câmbio automático



Fonte: (Nezhadali; Eriksson, 2015).

Na Figura 4 é apresentado um exemplo de câmbio automático, onde as embreagens também denominadas *Clutch K1*, *K2* e *K3*. A *Clutch K1* é responsável por conectar e desconectar o motor de uma parte específica da transmissão, permitindo mudanças de marcha suaves e contínuas sem interromper o fluxo de potência. A *Clutch K2*, embora desempenhe uma função similar, está associada a uma parte diferente da transmissão, contribuindo para a gestão da distribuição de potência entre os componentes. A *Clutch K3*, por sua vez, colabora com as *Clutch K1* e *K2* para melhorar a eficiência do sistema, garantindo uma transição suave e eficiente das marchas (Nezhadali; Eriksson, 2015).

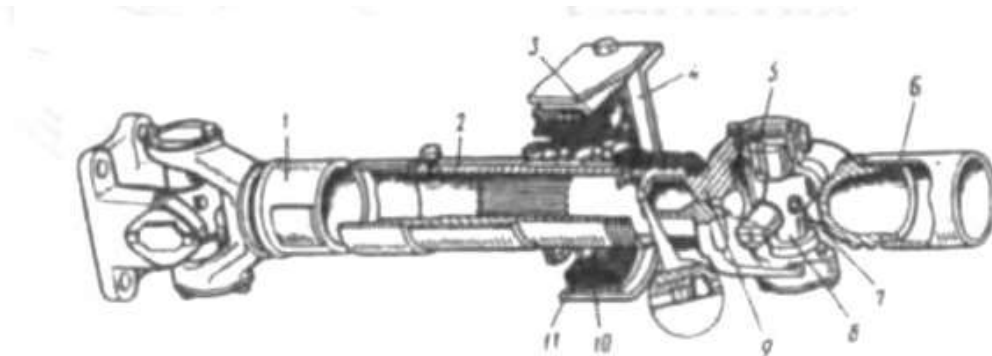
Os freios, denominados *Brakes B1* a *B5*, são essenciais para controlar a rotação das diversas partes da transmissão. Cada um desses freios pode ser ativado ou desativado conforme necessário para ajustar a velocidade e a potência transmitida às rodas. A utilização dos freios permite uma gestão precisa do comportamento do veículo, contribuindo para uma condução mais controlada e segura.

Além das embreagens e freios, o sistema de transmissão também inclui componentes como conjuntos planetários, eixos e outros mecanismos. Esses elementos são fundamentais para a operação do veículo, garantindo que a potência seja entregue de maneira adequada e que o veículo funcione de forma consistente sob diversas condições de uso e condução.

A Figura 5 demonstra o eixo Cardan, um sistema que conecta o eixo de transmissão do veículo ao diferencial, conforme visto centralizado entre as duas rodas traseiras na Figura 2. Esse sistema permite a transmissão de torque entre eles, mesmo que estejam em ângulos diferentes e se movimentem em relação uns aos outros devido às irregularidades do terreno. O sistema é

composto por dois eixos principais: o eixo Cardan intermediário e o eixo Cardan principal.

Figura 5 – Eixo Cardan



Fonte: (Riskulov; Rakhmatov, 2022).

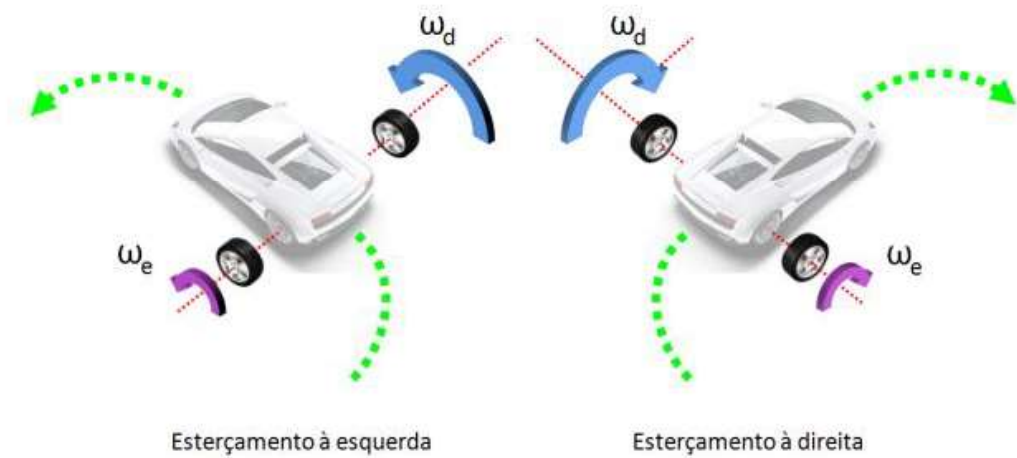
O eixo intermediário possui uma extremidade soldada a um garfo da junta Cardan, enquanto a outra extremidade apresenta a forma de um cubo estriado. Esse cubo estriado se encaixa na extremidade estriada do garfo da junta Cardan do eixo principal. A conexão entre esses dois eixos é projetada para permitir um movimento deslizante, o que significa que o comprimento total dos eixos pode variar conforme necessário. Essa variação é importante, pois acomoda os movimentos verticais dos eixos motrizes quando o veículo trafega por estradas irregulares.

O suporte intermediário do eixo é equipado com um rolamento estriado cercado por um anel de borracha, montado em um suporte de metal, o que ajuda a absorver choques e vibrações, contribuindo para um funcionamento mais suave do sistema de transmissão. Essa construção garante que os eixos Cardan possam se adaptar ao movimento do veículo, transmitindo potência de forma eficaz enquanto permitem certa flexibilidade (Riskulov; Rakhmatov, 2022).

O sistema Cardan é essencial para a transferência eficiente de potência em veículos, permitindo o movimento articulado necessário entre o motor e as rodas, especialmente em situações em que os eixos do veículo se movem verticalmente ou em ângulos diferentes devido às condições do terreno.

Na Figura 6, a função do diferencial é garantir que as rodas externas e internas girem em velocidades distintas, ajustando-se automaticamente às variações de velocidade e evitando deslizamentos. Esse ajuste é importante para manter a estabilidade e a manobrabilidade do veículo, proporcionando uma condução suave e segura. Além disso, o diferencial contribui para a eficiência do veículo, melhorando a tração e reduzindo o consumo de combustível em condições variadas de estrada.

Figura 6 – Funcionamento do Diferencial de um veículo.



Fonte: (Sampaio, 2011)

A análise do sistema de transmissão, como ilustrado nas Figuras, é fundamental para compreender o funcionamento do sistema e como a coleta de dados via OBD pode ser utilizada para aprimorar as calibrações das marchas. O uso de um câmbio automático de nove marchas possibilita ajustes precisos, visando melhorar o desempenho do veículo em diversas condições ambientais e de condução. Ao compreender a interação entre esses componentes, podemos propor calibrações que aprimorem a eficiência e a segurança do veículo, resultando em uma experiência de condução mais satisfatória para os usuários.

3 METODOLOGIA

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros monitorados do sistema, abrangendo diversos aspectos relacionados ao desempenho do veículo. O estudo foi realizado em um veículo durante uma rodagem em rodovia, com 4 passageiros, percorrendo uma distância de 30 km. As informações coletadas durante o estudo incluem diversos dados sobre o funcionamento do motor, torque, posição do pedal, temperaturas e velocidades, registrados com um período de amostragem de 0,01 segundos. Esses parâmetros contribuem para compreender o desempenho geral do sistema do veículo, permitindo uma análise de como o veículo se comporta em diferentes cenários e de como fatores como velocidade e torque variam conforme as condições. Isso possibilita identificar formas de melhorar o desempenho de acordo com a situação e com o modo de condução do condutor.

Parâmetros
Tempo
Motor_Rotacao
Pedal_Acelerador_Posicao
Motor_Torque_Minimo
Motor_Torque_Requisitado
Motor_Torque_Atual
Motor_Torque_Friccao
Agua_Temperatura
Marcha_Engatada
Aceleracao_Tempo
Veículo_Velocidade
Sinal_de_freio
Turbina_Rotacao
AWD_Torque
Transmissao_Temperatura
Média_SemiEixo_Torque

Tabela 1 – Tabela de parâmetros coletados

Os dados apresentados na Tabela 1 fornecem os parâmetros monitorados durante o funcionamento do sistema automotivo ao longo da aquisição de dados.

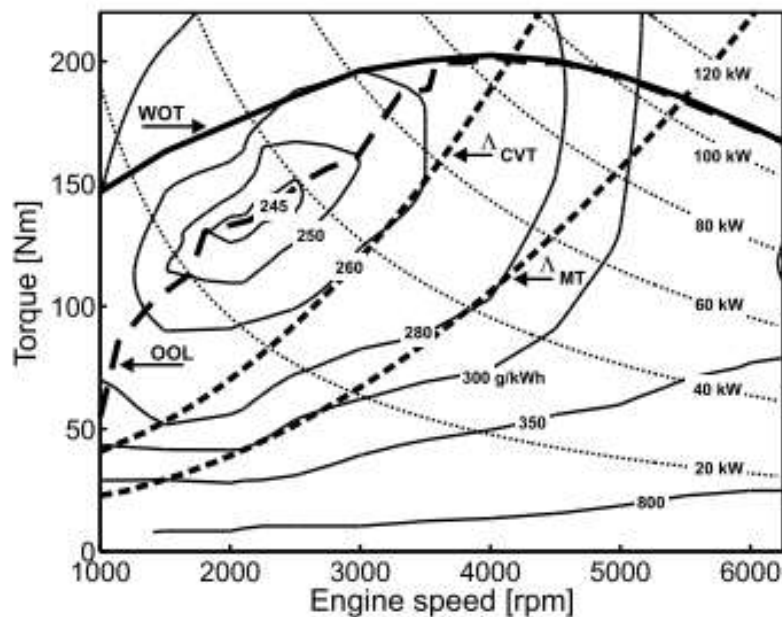
Cada parâmetro desempenha um papel essencial para o monitoramento e a análise do desempenho do veículo. A seguir, apresenta-se a descrição detalhada de cada variável.

- **Tempo:** Refere-se ao registro do tempo.
- **Motor_Rotacao:** Refere-se à velocidade de rotação do motor, medida em rotações por minuto (RPM).
- **Pedal_Acelerador_Posicao:** Indica o nível de pressão aplicado pelo motorista no pedal de aceleração, refletindo a intenção de controlar a potência e a velocidade do veículo.

- **Motor_Torque_Minimo:** Indica o menor torque que o motor pode gerar no momento. Útil para avaliar o comportamento em baixa carga e monitorar a eficiência do motor.
- **Motor_Torque_Requisitado:** Refere-se ao torque solicitado pelo sistema com base na posição do pedal do acelerador e nas condições de condução. Ajuda a avaliar a correspondência entre demanda e resposta real do motor.
- **Motor_Torque_Atual:** Mostra o torque efetivamente gerado pelo motor em tempo real, essencial para avaliar a eficiência e a capacidade de resposta.
- **Motor_Torque_Friccao:** Mede o torque associado à fricção interna do motor, sendo um parâmetro fundamental para determinar as perdas internas do motor.
- **Agua_Temperatura:** Monitora a temperatura do líquido de arrefecimento do motor. Esta variável é essencial para assegurar que o motor opere dentro de limites seguros de temperatura, evitando superaquecimento.
- **Marcha_Engatada:** Indica a marcha atualmente selecionada na transmissão. Este parâmetro é importante para entender a distribuição de torque e potência em diferentes condições de velocidade e aceleração.
- **Accleracao_Tempo:** Representa o tempo de aceleração em que o veículo está submetido. É um dado útil para entender a performance do veículo e sua resposta às condições de condução.
- **Veículo_Velocidade:** Mede a velocidade com que o veículo está se movendo.
- **Sinal_de_freio:** É um indicador que detecta a ativação do sistema de freios pelo condutor.
- **Turbina_Rotacao:** Mede a velocidade de rotação da turbina em sistemas turboalimentados. Este parâmetro é fundamental para avaliar o desempenho do turbo e sua contribuição na eficiência do motor.
- **AWD_Torque:** Representa o torque distribuído pelo sistema de tração integral (AWD) entre as rodas do veículo. Este parâmetro é crítico para garantir uma boa tração e estabilidade em diferentes condições de terreno.
- **Transmissao_Temperatura:** Monitora a temperatura do sistema de transmissão. Manter essa temperatura em níveis adequados é importante para evitar danos ao sistema e garantir seu funcionamento eficiente.
- **Média_SemiEixo_Torque:** Representa o torque médio aplicado ao semi-eixo nas quatro rodas do veículo.

O torque do motor é um fator essencial para avaliar se o motor opera dentro da faixa de maior eficiência energética. A *Optimal Operating Line* (OOL) representa a região onde o motor apresenta o melhor compromisso entre potência e consumo de combustível. Na Figura 7 podemos ver um mapa de consumo do motor com a linha OOL.

Figura 7 – Mapa de consumo de combustível do motor (OOL).



Fonte: (Klaassen, 2007).

No gráfico, o eixo horizontal representa a velocidade do motor (rpm), ou seja, a rotação do virabrequim. Quanto maior a rotação, maior a quantidade de combustão por unidade de tempo. O eixo vertical representa o torque gerado pelo motor (Nm), que está diretamente relacionado à força disponível para movimentar o veículo (Klaassen, 2007).

Diferentes curvas estão presentes no gráfico, cada uma representando uma característica específica do desempenho do motor. As curvas de consumo específico de combustível (g/kWh), representadas por linhas finas, indicam a eficiência do motor. Quanto menor o valor indicado nessas curvas, mais eficiente é o motor naquela região. Já as curvas de potência (kW), representadas por linhas pontilhadas, indicam as diferentes faixas de potência disponíveis (Klaassen, 2007).

A *Optimal Operating Line* (OOL) é representada por uma linha tracejada grossa na parte inferior do gráfico. Essa linha mostra a faixa de operação do motor na qual ele atinge a melhor eficiência energética, ou seja, o menor consumo específico de combustível para determinada carga e rotação. Já a *Wide Open Throttle* (WOT), representada por uma linha sólida grossa na parte superior do gráfico, define o limite de potência máxima do motor, ou seja, a região onde ele opera com aceleração total e alto consumo de combustível (Klaassen, 2007).

A análise do gráfico permite entender como o motor se comporta em diferentes condições operacionais. Quando o motor opera próximo à OOL, ele consome menos combustível para gerar torque, garantindo maior eficiência energética. Por outro lado, quando opera perto da WOT, ele está exigindo potência máxima, o que resulta em maior consumo de combustível. Motores equipados com transmissões *CVT* (*Continuously Variable Transmission*) ajustam continuamente a relação de marchas para manter o motor na OOL, melhorando a eficiência e reduzindo o consumo de combustível (Klaassen, 2007).

Em contrapartida, motores com transmissão automática, excetuando os CVTs, podem operar fora dessa faixa ideal, dependendo de sua calibração. A OOL é uma referência importante para a calibração e para o desenvolvimento de estratégias de controle de transmissão. Sistemas modernos de gerenciamento de motor utilizam essa linha como base para estratégias de controle eletrônico de transmissão e para otimizar o torque, garantindo melhor eficiência energética e menor consumo de combustível (Klaassen, 2007).

3.1 Análise dos Dados

Para medir a relação entre duas variáveis, utilizamos o coeficiente de correlação de Pearson, que quantifica o grau de associação linear entre elas. Esse coeficiente, denotado por ρ , é calculado da seguinte maneira:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.1)$$

onde:

- X_i e Y_i são os valores individuais das variáveis X e Y ;
- \bar{X} e \bar{Y} representam as médias dessas variáveis;
- O numerador mede a covariância entre X e Y ;
- O denominador normaliza os valores pelo desvio padrão das variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson varia entre -1 e $+1$:

- Se $\rho = +1$, há uma correlação positiva perfeita, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta proporcionalmente.
- Se $\rho = -1$, há uma correlação negativa perfeita, indicando que quando uma variável aumenta, a outra diminui.
- Se $\rho = 0$, não há correlação linear entre as variáveis, sugerindo que a relação entre elas pode ser não-linear ou inexistente.

A matriz de correlação é construída organizando os coeficientes de correlação entre todas as combinações possíveis de variáveis. Esse processo pode ser realizado utilizando ferramentas como Python com suas respectivas bibliotecas (por exemplo, pandas e numpy, ou softwares como Excel e R).

A análise do mapa de calor de correlação possibilita identificar quais variáveis exercem maior influência sobre uma variável de interesse, ajudando a compreender as relações entre elas. Com essas informações, torna-se viável modelar o sistema para obter mais eficiência nos resultados. A modelagem de sistemas é uma abordagem utilizada para desenvolver modelos matemáticos de sistemas dinâmicos com base na medição de sinais de entrada e saída. Esse processo permite representar o comportamento de um sistema real, facilitando sua análise e controle. Para realizar a modelagem, é fundamental coletar dados de entrada e saída no domínio do tempo ou da frequência, escolher um modelo matemático apropriado, estimar seus parâmetros e avaliar sua precisão (TIEGHI *et al.*, 2024).

3.2 Modelagem

A modelagem de um sistema consiste em construir uma representação matemática capaz de capturar seus comportamentos. Esse processo envolve a identificação de elementos como:

- **Entrada** ($u(t)$ ou $u[k]$): corresponde ao sinal ou estímulo aplicado ao sistema. Esse sinal pode representar uma força, uma tensão elétrica ou qualquer outro comando que influencie o comportamento do sistema. A entrada é o agente responsável por excitar o sistema e determinar sua resposta.
- **Saída** ($y(t)$ ou $y[k]$): representa a resposta do sistema à entrada aplicada. Essa resposta é mensurável e utilizada para avaliar o desempenho e a dinâmica do sistema.

A relação entre a saída e a entrada é descrita por equações matemáticas que caracterizam o sistema. Em sistemas contínuos, essa relação é expressa por equações diferenciais, enquanto, em sistemas discretos, nos quais as variáveis são avaliadas em instantes específicos com intervalos de amostragem fixos, utilizam-se equações em diferenças.

Nesse contexto, a função de transferência estabelece uma relação direta entre a entrada e a saída no domínio da transformada, facilitando a análise dos aspectos dinâmicos do sistema:

- Para sistemas contínuos, utiliza-se a transformada de Laplace, resultando na seguinte expressão:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)},$$

onde:

- $U(s)$ é a transformada de Laplace da entrada $u(t)$;
 - $Y(s)$ é a transformada de Laplace da saída $y(t)$.
- Para sistemas discretos, emprega-se a transformada Z, levando à formulação:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)},$$

onde:

- $U(z)$ é a transformada Z da entrada $u[k]$;
- $Y(z)$ é a transformada Z da saída $y[k]$.

A função de transferência é uma ferramenta fundamental para a análise da estabilidade e da resposta em frequência dos sistemas, além de ser amplamente utilizada em projetos com controladores. Essa ferramenta permite avaliar como um sistema reage a diferentes entradas e, conseqüentemente, como ajustar os parâmetros do controlador para alcançar o desempenho desejado, garantindo estabilidade, precisão e eficiência no controle.

3.2.1 Modelos ARX

Os modelos *AutoRegressive with Exogenous Input* (ARX) são utilizados na modelagem de sistemas dinâmicos, pois permitem descrever matematicamente a relação entre a entrada e a saída de um sistema. Sua principal característica é a utilização de informações passadas do próprio sistema, juntamente com entradas externas, para estimar a saída no instante atual. Além disso, o modelo inclui um termo de erro que representa incertezas e perturbações.

Matematicamente, um modelo ARX é expresso por uma equação em diferenças da forma:

$$y(k) = a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + \dots + a_ny(k-n) + b_1u(k-1) + b_2u(k-2) + \dots + b_mu(k-m) + e(k) \quad (3.2)$$

onde:

- $y(k)$ representa a saída do sistema no instante k ;
- $u(k)$ corresponde à entrada aplicada ao sistema;
- Os coeficientes a_i quantificam a influência das saídas passadas na saída atual;
- Os coeficientes b_i indicam o efeito das entradas anteriores sobre a saída;
- $e(k)$ é um termo de erro ou ruído aleatório.

Os modelos ARX são amplamente utilizados devido à sua estrutura simples e eficiência computacional. A determinação dos coeficientes pode ser realizada por meio de métodos estatísticos, como a estimação por mínimos quadrados, que minimiza a discrepância entre a resposta predita pelo modelo e os dados experimentais (Mapurunga; Façanha; Maia, 2023). Algumas das principais aplicações dos modelos ARX destacam-se:

- Controle de temperatura em processos industriais;
- Previsão da demanda energética em sistemas de distribuição elétrica;
- Regulação da velocidade de motores elétricos e sistemas automatizados;
- Processamento de sinais em sistemas de comunicação digital.

Os modelos ARX desempenham um papel fundamental na análise e controle de sistemas, permitindo a modelagem de processos físicos e industriais. Sua eficácia, no entanto, depende diretamente da qualidade dos dados utilizados na identificação do modelo e da escolha apropriada da ordem do modelo, garantindo uma representação precisa da dinâmica do sistema (Mapurunga; Façanha; Maia, 2023).

3.3 Controlador

Os controladores podem ser implementados tanto em malha aberta quanto em malha fechada. Em malha aberta, o controlador atua diretamente na entrada sem levar em conta a saída do sistema. Embora esse tipo de sistema seja mais simples e possa ser adequado para processos estáveis, ele não corrige automaticamente os desvios provocados por perturbações externas. Um exemplo ilustrativo de um sistema de malha aberta pode ser visualizado na Figura 8.

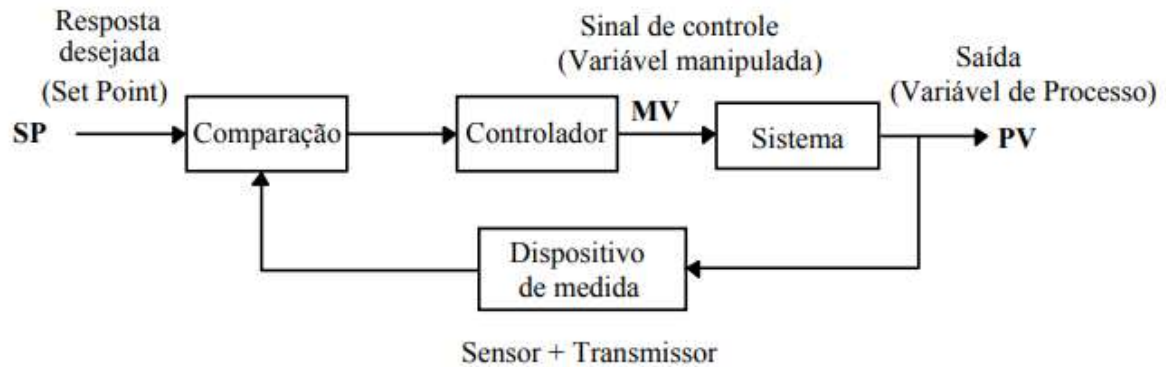
Figura 8 – Sistema de controle em malha aberta.



Fonte: (Araújo, 2003).

Por outro lado, no controle em malha fechada, a saída é constantemente monitorada e comparada com um valor de referência. Como pode ser visto na Figura 9, a diferença entre a saída real e a desejada gera um erro, que é utilizado para ajustar a ação do controlador e minimizar desvios. Esse tipo de sistema é mais adequado para aplicações onde há variações na carga ou no ambiente.

Figura 9 – Sistema de controle em malha fechada.



Fonte: (Araújo, 2003).

Para obter modelos precisos, é essencial garantir que os dados coletados sejam representativos do comportamento dinâmico do sistema. A coleta de dados deve ser projetada para excitar as dinâmicas do sistema adequadamente, garantindo medições com alta relação sinal-ruído e uma resolução temporal suficiente para capturar os fenômenos relevantes.

Os modelos identificados podem ser avaliados por meio da comparação entre a resposta do modelo e os dados reais. O erro entre a saída prevista pelo modelo e a saída medida pode ser analisado para determinar a qualidade da estimativa.

Os sistemas de controle são fundamentais para garantir o funcionamento adequado de processos dinâmicos em diversas áreas da engenharia e automação industrial. Dentre os diversos tipos de controladores disponíveis, o Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) se destaca como uma das soluções mais amplamente empregadas devido à sua eficácia na regulação de sistemas dinâmicos, minimizando erros e melhorando o desempenho geral do sistema.

A formulação do controlador PID baseia-se em três componentes principais, que trabalham em conjunto para garantir a estabilidade e a precisão do sistema. A equação geral do controlador PID no domínio do tempo pode ser expressa da seguinte forma:

$$P + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot T_s} \frac{1}{z-1} \quad (3.3)$$

onde:

- P é o termo proporcional, que atua diretamente sobre o erro presente, fornecendo uma resposta imediata ao sistema;
- I é o termo integral, que acumula os erros passados, garantindo a eliminação do erro estacionário ao longo do tempo;
- D é o termo derivativo, que prevê mudanças futuras no erro, ajudando a reduzir oscilações e melhorando a estabilidade do sistema;

- T_s é o período de amostragem do sistema discreto;
- N é um fator de filtragem para o termo derivativo, utilizado para suavizar a resposta e evitar amplificação de ruídos; (explicar)
- $\frac{1}{z-1}$ representa a implementação discreta da operação de integração no domínio Z.

3.3.1 Representação no Domínio de Laplace

No domínio de Laplace, a função de transferência do controlador PID pode ser representada da seguinte maneira:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.4)$$

Essa equação destaca as contribuições de cada termo:

- O termo proporcional (K_p) fornece uma resposta diretamente proporcional ao erro instantâneo, reduzindo o tempo de estabilização do sistema;
- O termo integral (K_i/s) é responsável por eliminar o erro estacionário, garantindo que a saída do sistema atinja o valor de referência desejado;
- O termo derivativo ($K_d s$) prevê mudanças no erro e age preventivamente, reduzindo oscilações e melhorando a resposta dinâmica do sistema.

3.4 Ajuste de Parâmetros do Controlador PID

Para garantir um desempenho adequado, é necessário um ajuste correto dos parâmetros do controlador PID. Esse processo, conhecido como sintonia do controlador, pode ser realizado por meio de diferentes métodos, sendo um deles o método de ajuste manual.

Os controladores PID são amplamente utilizados em diversos setores da engenharia e automação, sendo essenciais em processos onde a precisão e a estabilidade são críticas. Algumas das principais aplicações incluem:

- Controle de temperatura em sistemas de aquecimento e refrigeração;
- Controle de velocidade e posição em motores elétricos;
- Regulação de pressão em sistemas hidráulicos e pneumáticos;
- Controle de processos químicos e industriais;
- Sistemas de navegação e controle de trajetória em veículos autônomos.

Devido à sua flexibilidade e robustez, o PID continua sendo um dos principais controladores utilizados na indústria, garantindo um controle eficiente e confiável. Para ilustrar os efeitos do controlador PID na estabilidade e no desempenho do sistema, a Figura 10 apresenta a resposta temporal de um sistema antes e depois da aplicação do controlador PID.

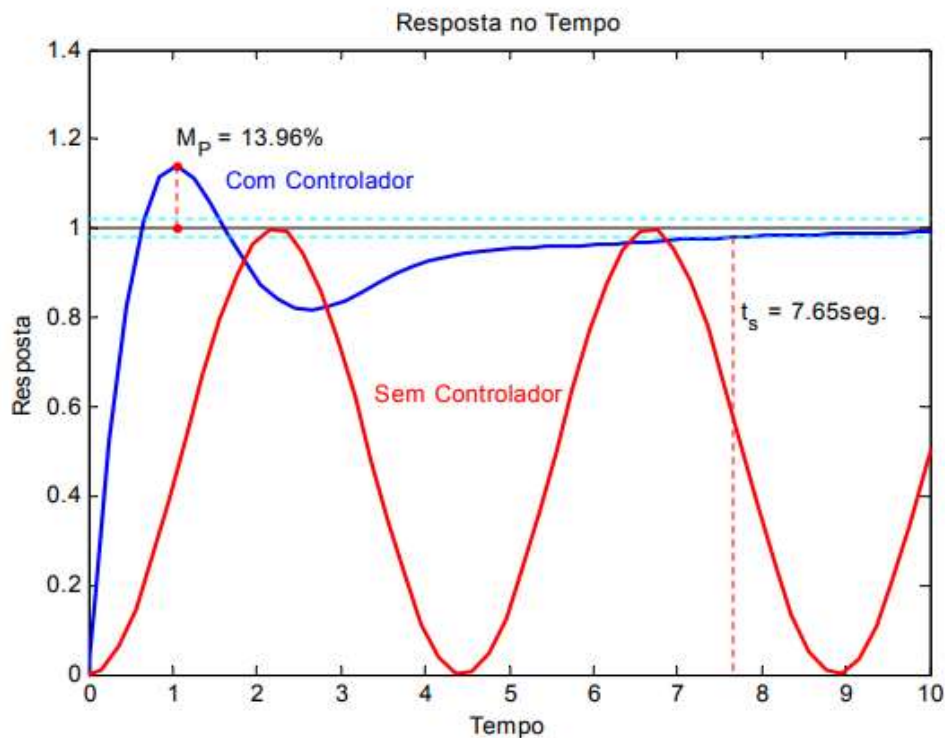


Figura 10 – Resposta temporal de um sistema sem controle e com um controlador PID ajustado.

Fonte: (Araújo, 2007).

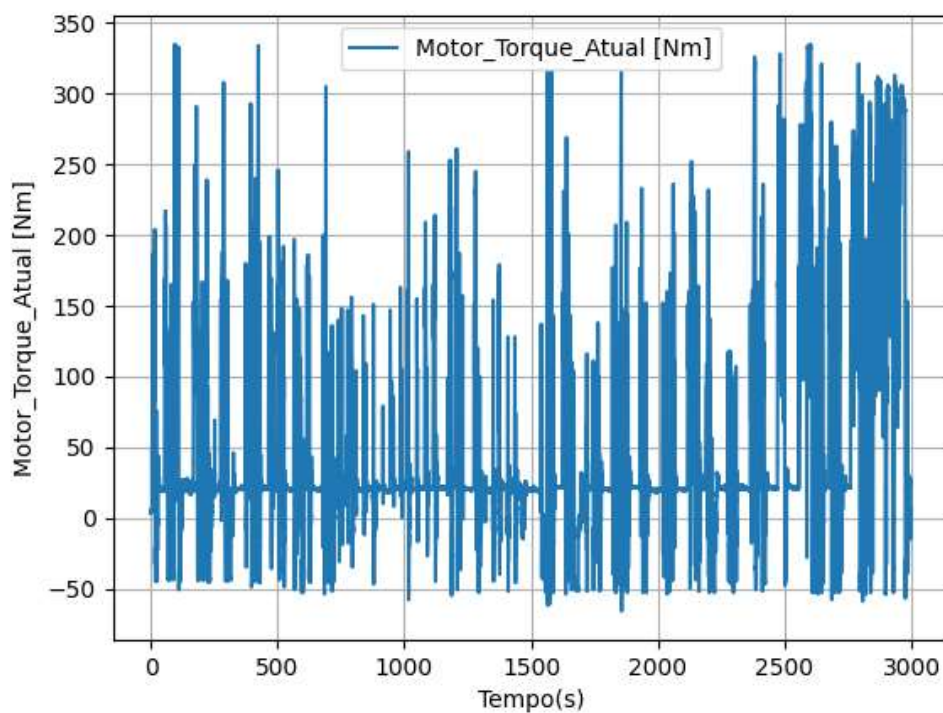
Observa-se que, sem o controlador, o sistema permanece instável, apresentando oscilações que não se dissipam ao longo do tempo. Com a aplicação do controlador PID corretamente ajustado, o sistema estabiliza-se após aproximadamente 7,65 segundos. O controlador PID é uma ferramenta fundamental em sistemas de controle, sendo amplamente empregado devido à sua versatilidade e eficácia. A combinação dos ganhos proporcional, integral e derivativo permite que o sistema alcance um equilíbrio adequado entre rapidez de resposta, eliminação do erro estacionário e minimização de oscilações.

4 RESULTADOS

Primeiramente, foi utilizado o sistema OBD para realizar a leitura da rede CAN durante o teste, a fim de obter os dados do veículo. Em seguida, os dados foram exportados para um arquivo CSV. Antes de iniciar a análise, foi realizado um pré-processamento, eliminando valores nulos que poderiam comprometer a precisão dos resultados.

Em seguida, foram gerados gráficos temporais das variáveis, os quais ilustram a evolução dos parâmetros durante todo o teste, proporcionando uma visão preliminar para a análise do veículo.

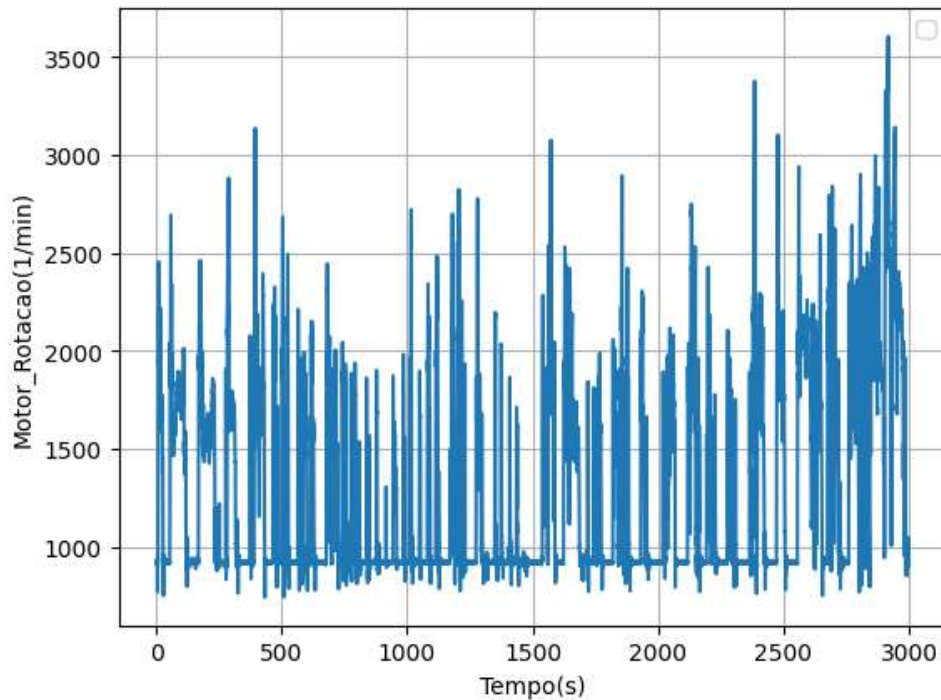
Figura 11 – Motor_Torque_Atual x Tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 11, é apresentada a variação do torque atual do motor (em Nm) ao longo do tempo. O gráfico demonstra como o torque do motor se comportou de forma dinâmica durante o teste, refletindo as diferentes demandas impostas ao veículo ao longo do percurso.

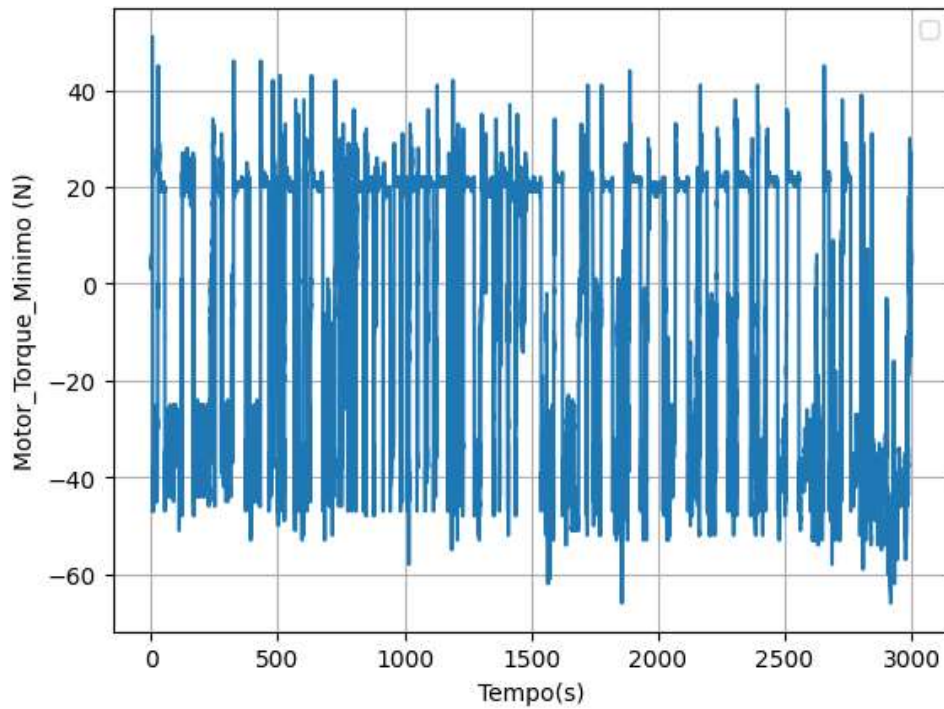
Figura 12 – Variação da rotação do motor ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 12, é possível observar oscilações que vão desde valores próximos à rotação de marcha lenta (em torno de 800 a 1000 RPM) até picos que ultrapassam 3000 RPM. Essas variações refletem diferentes condições de operação do motor durante o teste, como acelerações, desacelerações e trocas de marcha, proporcionando uma visão geral do regime de rotação do motor ao longo do período.

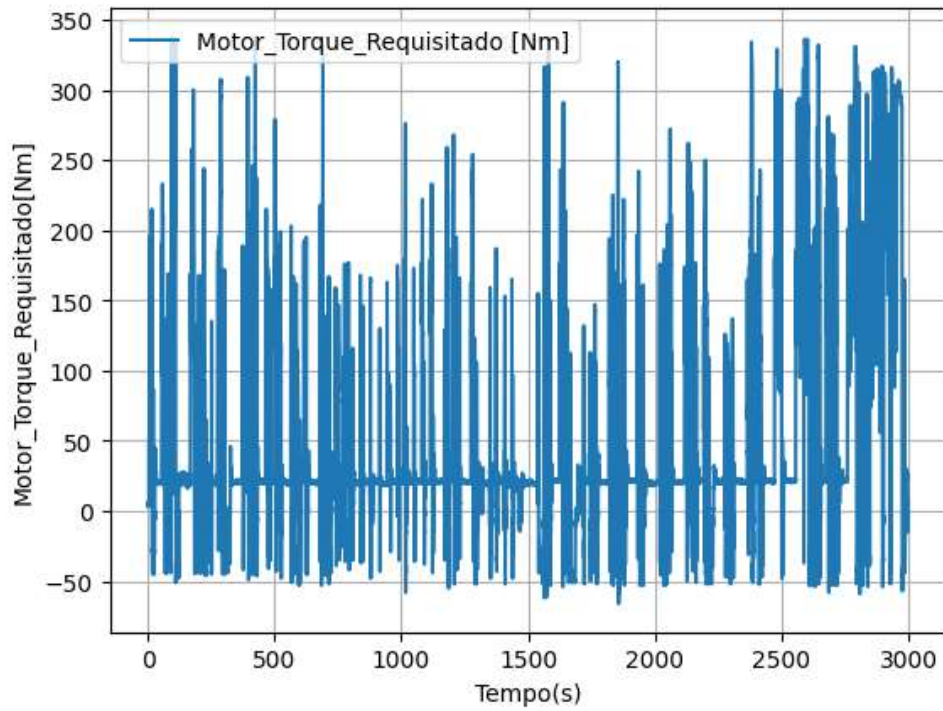
Figura 13 – Variação do torque mínimo do motor ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13, apresenta-se a variação do torque mínimo do motor (em Nm) ao longo do teste, mostrando oscilações em função das condições de operação. O comportamento dessa curva oferece uma visão inicial sobre as demandas mínimas de torque e a eficiência operacional do motor.

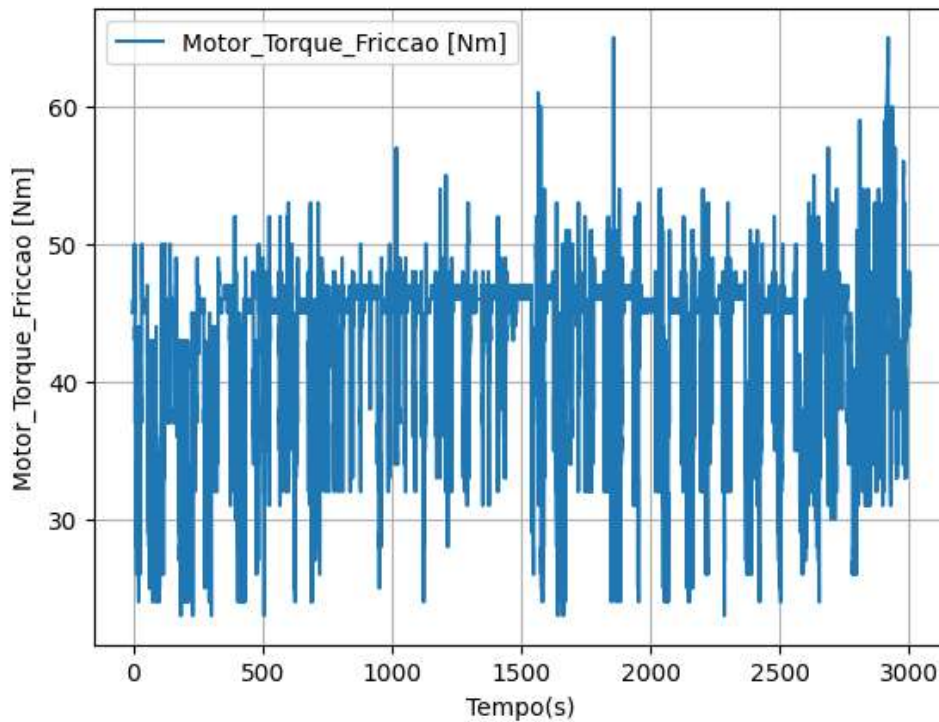
Figura 14 – Torque requisitado do motor ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 14, apresenta-se a variação do torque requisitado do motor (em Nm) ao longo do teste. Observa-se uma oscilação com picos próximos a 300 Nm, indicando momentos de maior exigência do motor, possivelmente durante acelerações intensas.

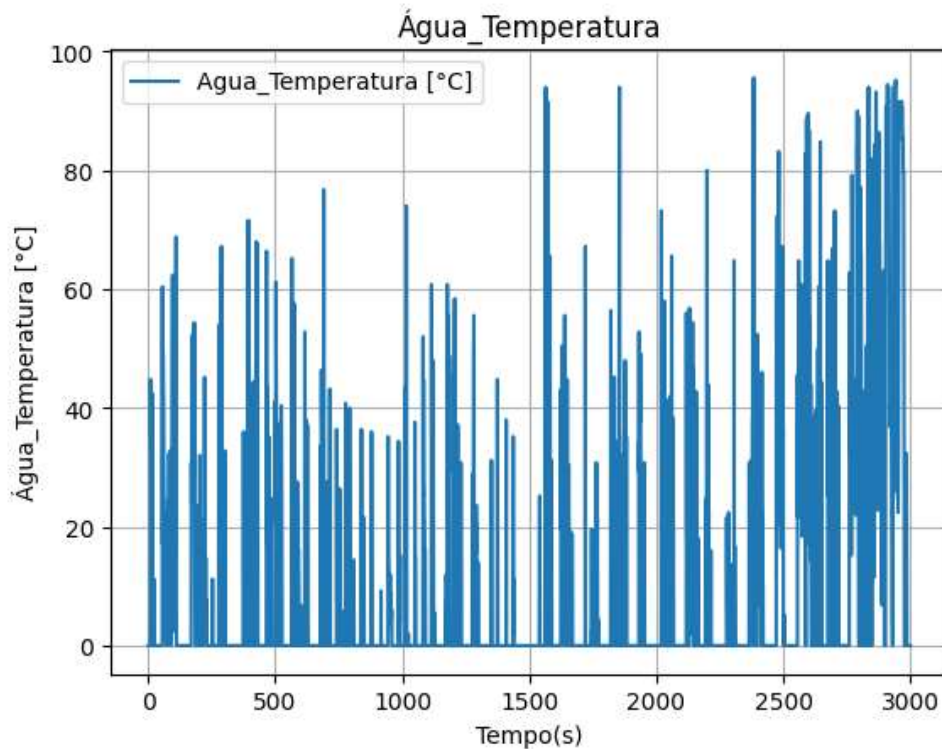
Figura 15 – Torque de fricção do motor ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 15, é apresentada a variação do torque de fricção do motor (em Nm) ao longo do teste. O torque de fricção representa a resistência interna ao movimento do motor, incluindo perdas devido ao atrito entre componentes mecânicos, viscosidade do óleo lubrificante e resistência em rolamentos e vedantes. Observa-se que os valores do torque de fricção variam durante o teste, permanecendo em uma faixa entre 20 Nm e 60 Nm, com algumas oscilações.

Figura 16 – Variação da temperatura da água ao longo do tempo.



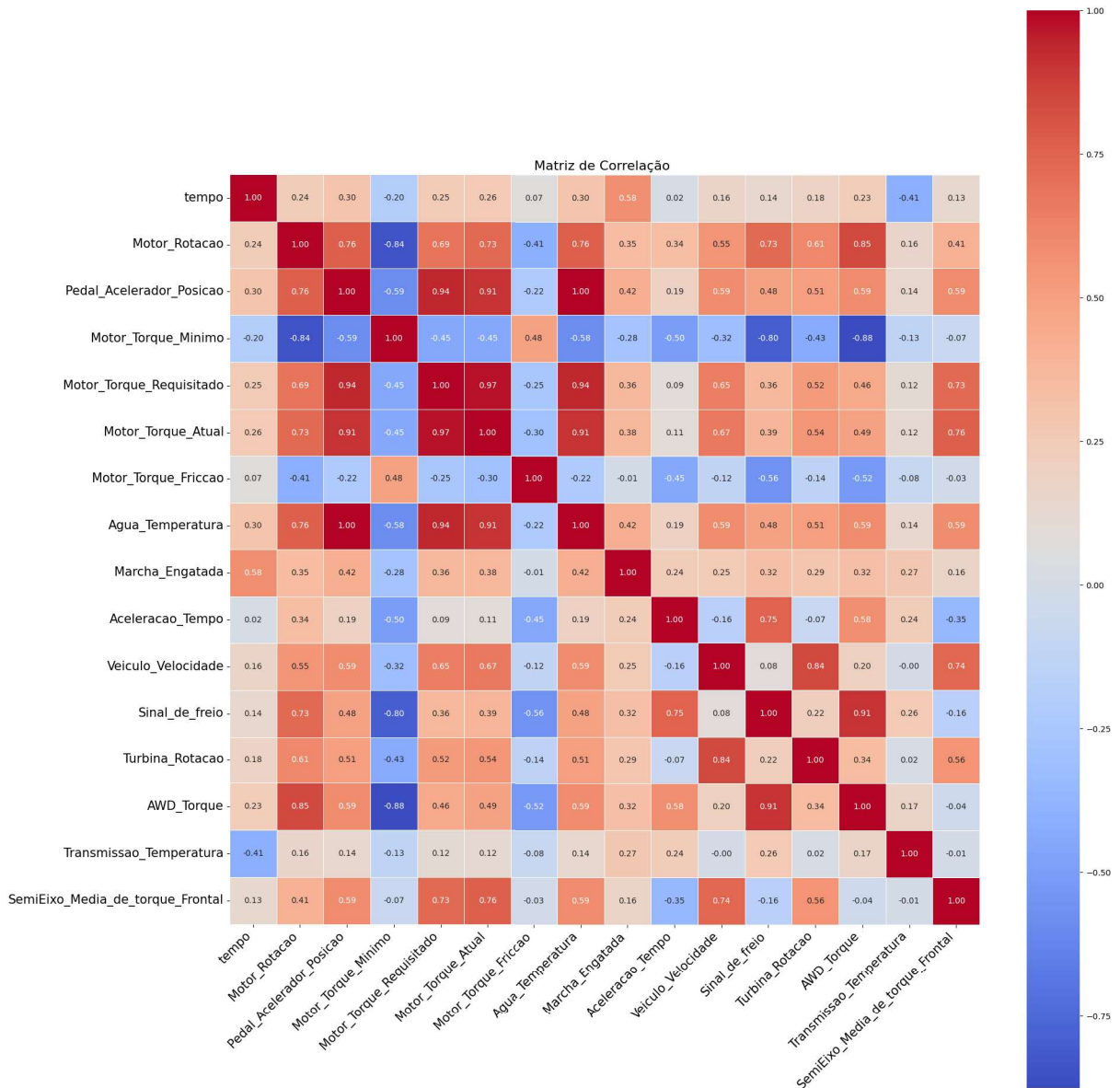
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 16, apresenta-se a variação da temperatura da água (em °C) ao longo do tempo, representando a evolução da temperatura do líquido de arrefecimento do motor. Os dados iniciam com valores baixos e aumentam gradativamente, atingindo picos próximos a 100°C.

Considerando o torque do motor como referência para o menor consumo específico de combustível, utilizou-se esse parâmetro como saída do sistema. Com base nessa análise inicial, foi possível estabelecer uma correlação entre o torque do motor e outras variáveis, como a rotação do motor, a posição do pedal do acelerador e a velocidade do veículo, aprofundando nossa compreensão sobre o desempenho do conjunto.

A matriz de correlação é uma ferramenta estatística para entender as relações entre diferentes variáveis em um conjunto de dados. Na Figura 17, apresenta-se a matriz de correlação, que permite identificar quais variáveis possuem maior ou menor relação entre si, essencial para a modelagem e controle do sistema. As variáveis com os maiores coeficientes de correlação indicaram uma forte relação entre si.

Figura 17 – Mapa de calor de correlação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o mapa de calor, observa-se que as variáveis com correlação próxima a 1 com o Motor_Torque_Atual foram:

Variável	Correlação
Motor_Torque_Requisitado	0,97
Pedal_Acelerador_Posicao	0,91
Motor_Rotacao	0,73
Media_Torque_Frontal	0,76
Agua_Temperatura	0,91

Tabela 2 – Correlação direta entre variáveis e o torque real do motor.

Uma análise de correlação revelou que algumas variáveis apresentam forte dependência entre si, enquanto outras não demonstram relação direta. Essas informações foram utilizadas

na modelagem do sistema, permitindo a priorização das variáveis que efetivamente influenciam seu comportamento e, conseqüentemente, aprimorando a eficiência e a precisão dos modelos de controle e predição.

É importante ressaltar que algumas variáveis apresentaram correlações negativas em relação à variável *Motor_torque_Atual*, a variável *Motor_torque_Minimo* obteve uma correlação de -0,45, enquanto *Motor_Torque_fricção* registrou -0,30.

Analisando os resultados obtidos na Figura 17 e na Tabela 2, pode-se selecionar algumas variáveis com alta correlação. Dentre elas, destaca-se a *Motor_Torque_Requisitado*. No entanto, por ser uma variável dependente da *Pedal_Acelerador_Posicao* e considerando que, do ponto de vista físico, o pedal é o principal fator de influência no torque do motor, optou-se por utilizar a *Pedal_Acelerador_Posicao* como variável de entrada. A partir dessa escolha, o próximo passo é modelar o sistema, permitindo sua simulação e, posteriormente, o desenvolvimento de um controle.

Para modelar o sistema em relação ao *Motor_Torque_Atual*, a fim de obter uma função de transferência para simulação, os dados foram carregados a partir do arquivo no MATLAB. Para garantir que o modelo fosse adequadamente estruturado, os dados foram organizados em um objeto de identificação (salvando suas posições) e foi definido o mesmo tempo de amostragem dos dados coletados de $T_s = 0.01$ segundos, escolhido com base na frequência de aquisição dos dados do sistema utilizado.

Com os dados organizados, o modelo foi ajustado para representar a dinâmica do sistema. O modelo foi definido pelos seguintes parâmetros:

- *na*: ordem do polinômio da saída;
- *nb*: ordem do polinômio das entradas;
- *nk*: atraso entre entrada e saída.

Durante o processo de identificação do modelo, foram testados diversos valores para os parâmetros que definem a estrutura da função de transferência discreta. Ao avaliar as diferentes combinações, optou-se pelos menores valores que melhor representaram o sistema, resultando em:

$$na = 2, \quad nb = 2, \quad nk = 1.$$

Isso significa que o modelo utiliza duas amostras passadas da saída (*Motor_Torque_Atual*) e duas amostras passadas da entrada (*Pedal_Acelerador_Posicao*), além de considerar um atraso (delay) de uma amostra entre a entrada e o efeito observado na saída.

A escolha destes valores foi feita com base em testes que avaliaram a correlação entre as variáveis e a representatividade física do sistema. Mesmo que a variável (*Pedal_Acelerador_Posicao*)

não possui uma dependência física direta, sua correlação com a variável (Motor_Torque_Atual) a torna uma boa candidata para ser utilizada na modelagem.

Com essa estrutura definida, a partir do modelo identificado, obteve-se a seguinte função de transferência discreta que relaciona a entrada (Pedal_Acelerador_Posicao) com a saída (Motor_Torque_Atual):

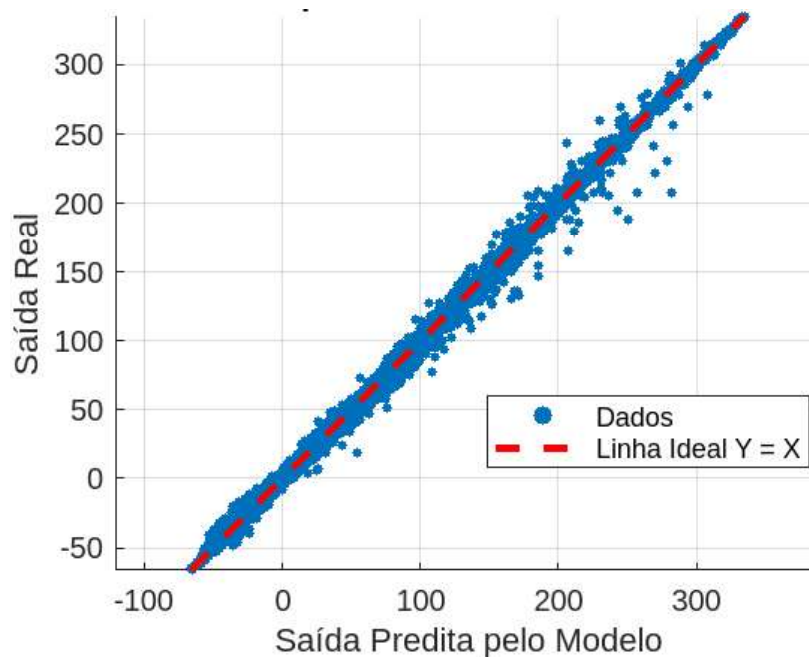
$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{-0,138z^{-1} + 0,2432z^{-2}}{1 - 0,6734z^{-1} - 0,2893z^{-2}}. \quad (4.1)$$

4.1 Análise do ajuste da função de transferência

Para avaliar a qualidade do modelo identificado, foi realizada uma comparação entre a saída real e a saída predita. Um gráfico de dispersão foi utilizado para visualizar a correlação entre essas duas variáveis. Quanto mais os pontos se aproximam da linha $y = x$, melhor a precisão do modelo em representar o comportamento do sistema real.

A Figura 18 ilustra essa comparação:

Figura 18 – Gráfico de dispersão: Saída predita vs. Saída real.



Fonte: Elaborado pelo autor.

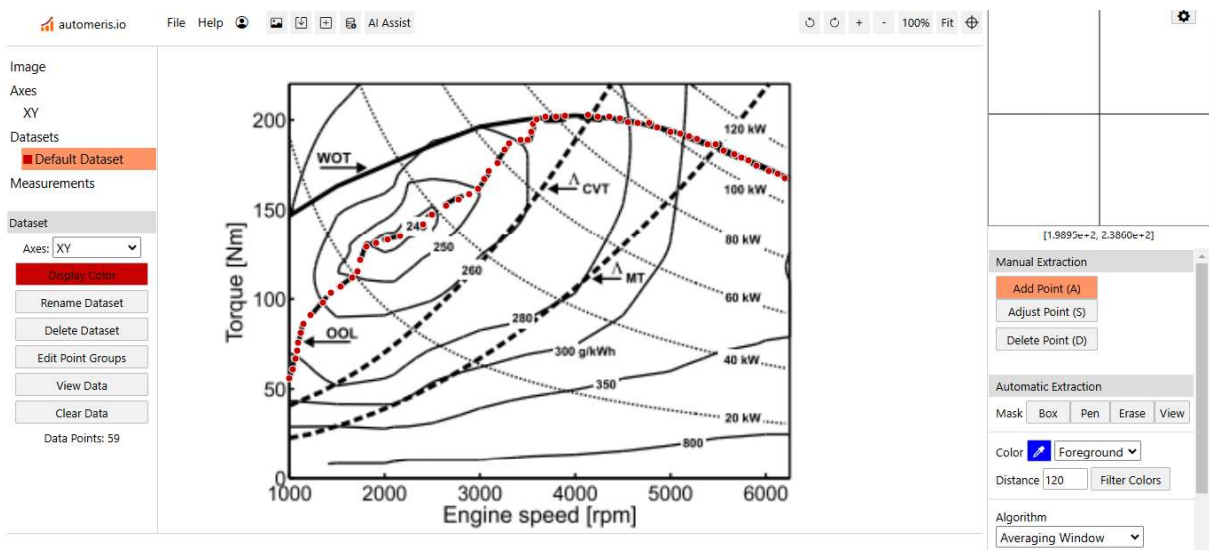
Ademais, o raiz erro médio quadrático (RMSE) do modelo foi calculado, resultando em um valor global de 1,04 Nm. Esses resultados demonstram que o modelo apresenta um desempenho muito próximo da resposta ideal, o que o torna adequado para futuras simulações.

O modelo fornece uma representação matemática do comportamento dinâmico do torque do motor, permitindo prever a saída do sistema com boa precisão, o que é reforçado pelo RMSE calculado.

Para garantir um modelo com referência de saída que permita identificar erros e fechar a malha de controle (como ilustrado na Figura 9), é essencial coletar uma função que descreva o torque ideal para o parâmetro Motor_Torque_Atual. Para isso, busca-se controlar e obter a máxima eficiência do sistema, conforme demonstrado pela linha OOL na Figura 7.

Utilizamos a ferramenta *Automeris.io*, que possibilita a extração de pontos a partir de uma imagem de gráfico. O processo consiste em definir os valores mínimo e máximo de cada eixo e, em seguida, clicar sobre a região desejada para coletar os pontos de interesse. A Figura 19 ilustra esse procedimento.

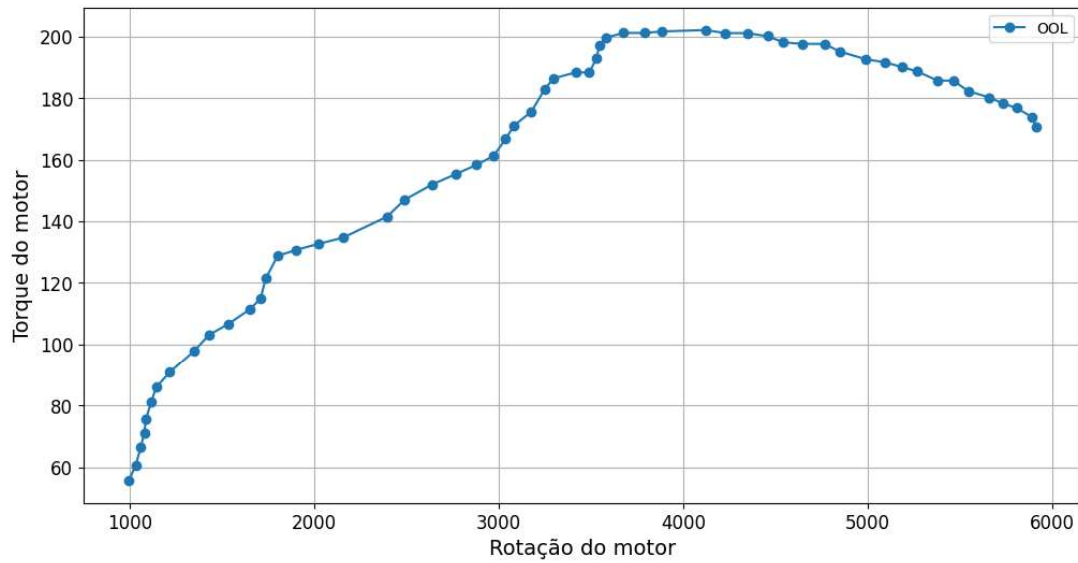
Figura 19 – Processo de coleta dos dados a partir do gráfico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a ferramenta, foi possível extrair os pontos do gráfico e obter as coordenadas correspondentes aos eixos x e y . Esses pontos representam a relação entre as variáveis analisadas e serão utilizados na modelagem e análise do sistema. A Figura 20 apresenta a distribuição dos pontos extraídos.

Figura 20 – Pontos extraídos do gráfico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os pontos extraídos, procedeu-se à identificação de uma função matemática que os descreva. Para isso, foi utilizada a linguagem Python, com bibliotecas que permitem calcular os coeficientes do polinômio que melhor se ajusta aos pontos. A Tabela 3 apresenta os coeficientes do polinômio ajustado.

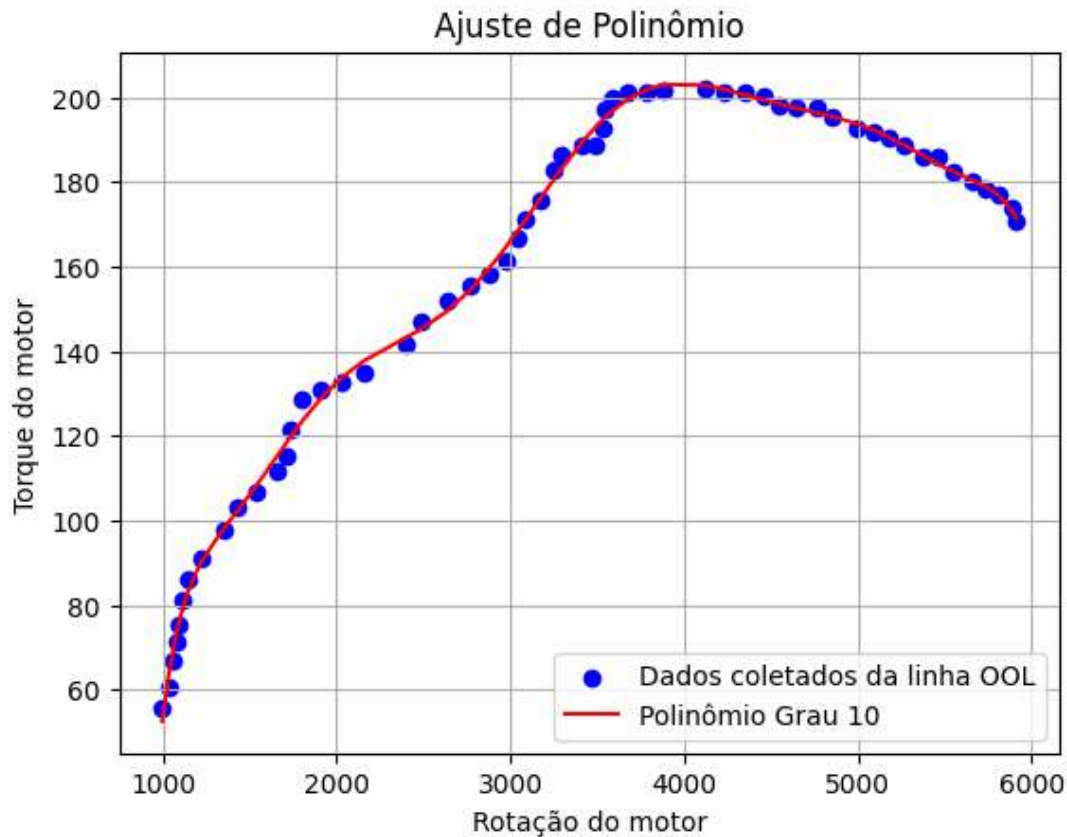
Tabela 3 – Coeficientes do polinômio ajustado.

Grau n	Coefficiente
x^{10}	$-1,4029 \times 10^{-31}$
x^9	$5,0112 \times 10^{-27}$
x^8	$-7,8349 \times 10^{-23}$
x^7	$7,0403 \times 10^{-19}$
x^6	$-4,0143 \times 10^{-15}$
x^5	$1,5130 \times 10^{-11}$
x^4	$-3,8070 \times 10^{-8}$
x^3	$6,3019 \times 10^{-5}$
x^2	$-6,5616 \times 10^{-2}$
x^1	38,8754
x^0	-9900,0686

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 apresenta o gráfico do ajuste polinomial, onde os pontos extraídos são representados e a curva ajustada é sobreposta, permitindo visualizar o comportamento do modelo matemático.

Figura 21 – Ajuste polinomial dos pontos extraídos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar a qualidade do ajuste, foi calculado o RMSE, resultando em aproximadamente 1,72 Nm em relação aos pontos experimentais, o que evidencia a capacidade do polinômio em representar os dados coletados.

4.2 Simulação e controle do modelo de função de transferência

Com a função de transferência definida, o modelo foi simulado no Simulink e controlado com um controlador PID, conforme ilustrado na Figura 22. O sistema recebe um sinal de rotação do motor que passa por um bloco de função de transferência representando a dinâmica do sistema. O erro entre o sinal desejado e o sinal medido é corrigido por um controlador PID, que ajusta dinamicamente o torque aplicado ao motor.

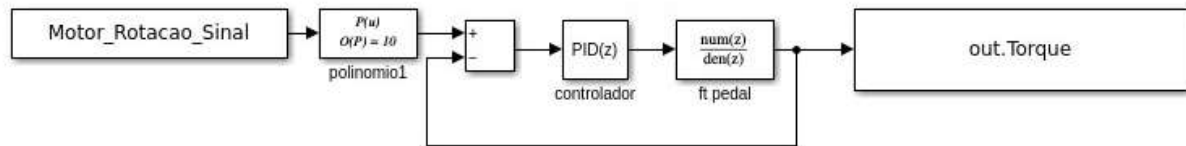


Figura 22 – Modelo do sistema no Simulink.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, foram selecionados aleatoriamente os parâmetros do controlador PID (denominado PID1) e aplicada a função Tune do MATLAB, que ajusta automaticamente os ganhos para melhorar o desempenho do sistema. Destaca-se que, embora as especificações de desempenho dinâmicas tenham sido consideradas, o foco principal concentrou-se na curva estática de OOL, o que motivou o emprego do ajuste de tuning automático do PID.

Adicionalmente, é importante destacar o papel do N no PID, que atua como filtro derivativo. Esse parâmetro é incorporado para evitar que o controlador PID se torne imprópria, permitindo uma implementação prática do termo derivativo sem comprometer o sistema.

Em seguida, aos parâmetros de PID1 foram somadas 2 unidades aos ganhos proporcional (P) e integral (I) e 10 unidades aos ganhos derivativo (D) e do filtro (N); posteriormente, a função Tune foi utilizada novamente para refinar esses valores. A partir dos mesmos valores iniciais, os parâmetros foram divididos por 5, e a função Tune aplicada uma terceira vez. Os parâmetros testados encontram-se na Tabela 4. Com base nessas abordagens, os torques controlados foram analisados para verificar as melhorias no desempenho do sistema.

Tabela 4 – Parâmetros das configurações PID.

Teste PID	P	I	D	N
PID1	2	3	20	30
PID2	0,234	13,19	0,03	100
PID3	4	5	30	40
PID4	0.13	13,9	0	100
PID5	0.4	0,6	4	6
PID6	0,065776	13,1552	0	100

Os dados foram processados para avaliar os resultados em relação ao comportamento real do sistema, tendo a curva OOL como referência. Para melhorar a visualização, os pontos do gráfico foram representados pela média e pelo desvio padrão do torque do motor controlado e do Motor_Torque_Atual, calculados em intervalos de 50 amostras. A Figura 23 apresenta a comparação entre os seis controladores aplicados no sistema.

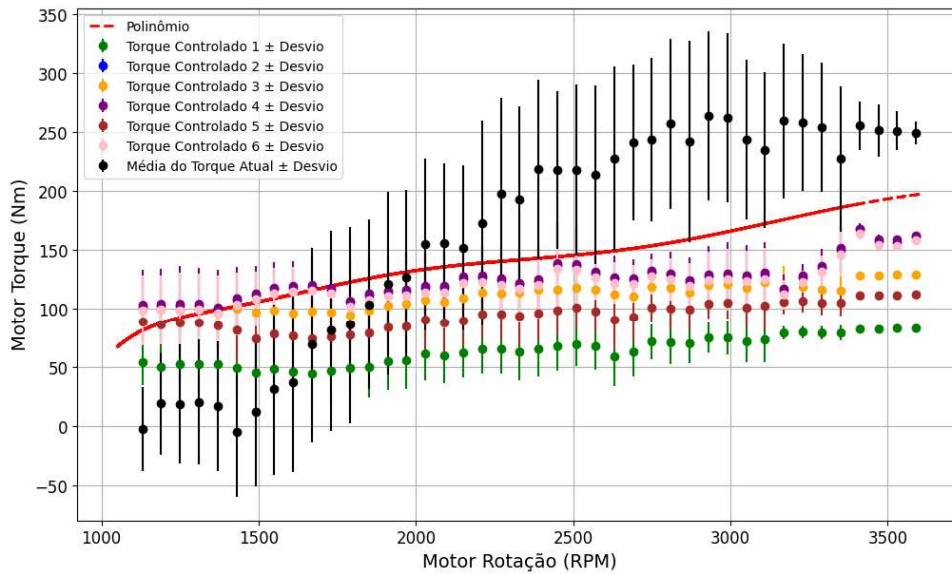


Figura 23 – Comparação das respostas para todas as configurações de PID.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura, a curva vermelha representa o modelo polinômico (Figura 21), enquanto os pontos azuis indicam a média do Motor_Torque_Atual (com barras de desvio padrão) e os pontos verdes, a média do torque controlado.

Após a avaliação individual de cada configuração, foi realizada uma análise comparativa entre os controladores e o Motor_Torque_Atual para identificar qual ajuste proporcionou o menor RMSE em relação ao polinômio. Os valores de RMSE para cada teste estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de RMSE dos torques para cada teste de PID.

Torque	RMSE (Nm)
Torque Atual	93,45
PID 1	72,3628
PID 2	32,6603
PID 3	42,9367
PID 4	31,7996
PID 5	42,9388
PID 6	31,4926

Observa-se que os testes referentes ao PID4 e PID6 apresentaram os menores RMSE, evidenciando uma aproximação mais precisa ao torque do polinômio OOL. O PID2 também demonstrou bom desempenho, enquanto o PID3 e o PID5 apresentaram RMSE intermediários, e o PID1, o maior erro, indicando necessidade de ajustes adicionais. Ademais, a redução do RMSE está associada a um menor consumo, contribuindo para uma operação mais eficiente do motor.

Na Figura 24, apresenta-se o controlador PID que obteve o menor RMSE. Essa configuração permite comparar o desempenho do PID em relação ao polinômio OOL (isto é, o comportamento previsto pelo modelo) e ao torque efetivamente medido.

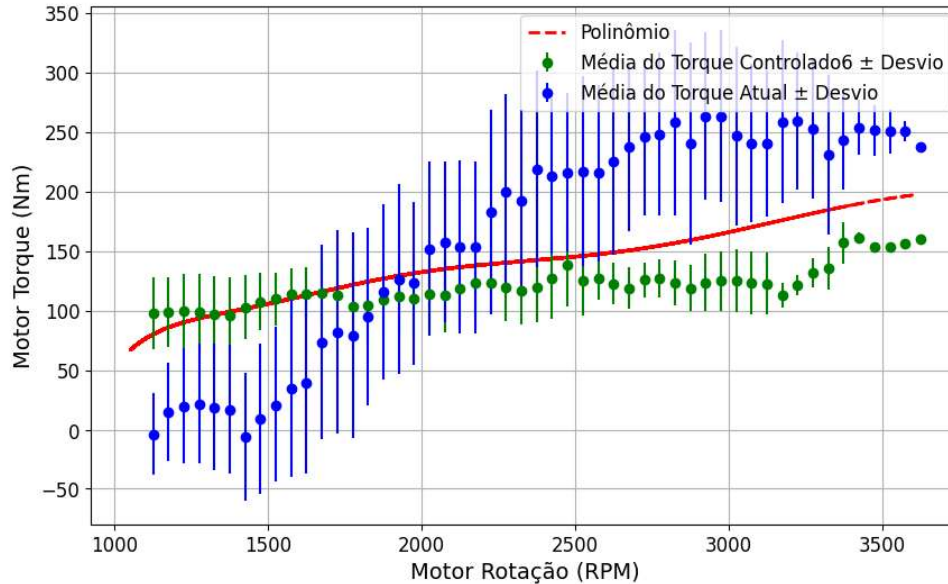


Figura 24 – Comparação do PID 6.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Modelo ARX

Outra estratégia para melhorar o desempenho do sistema consiste na utilização do modelo ARX, que se diferencia por incorporar um número mais abrangente de variáveis de referência na entrada. Considerando que as variáveis foram cuidadosamente definidas, como evidenciado na análise da matriz de correlação, o modelo ARX pode ser representado matematicamente pela equação a seguir:

$$\begin{aligned}
 y_1(k) = & 0,6736y_1(k-1) + 0,2892y_1(k-2) \\
 & - 0,02118u_2(k) + 0,02087u_2(k-1) + 0,23u_2(k-2) \\
 & - 0,1383u_3(k) + 0,2428u_3(k-1) + 0,8u_3(k-2) \\
 & + 0,04131u_6(k) - 0,001129u_6(k-1) + 0,54u_6(k-2) \\
 & + 0,01604u_9(k) - 0,01844u_9(k-1) + 0,37u_9(k-2) \\
 & + 0,01293u_{17}(k) - 0,01264u_{17}(k-1) + 0,21u_{17}(k-2).
 \end{aligned}$$

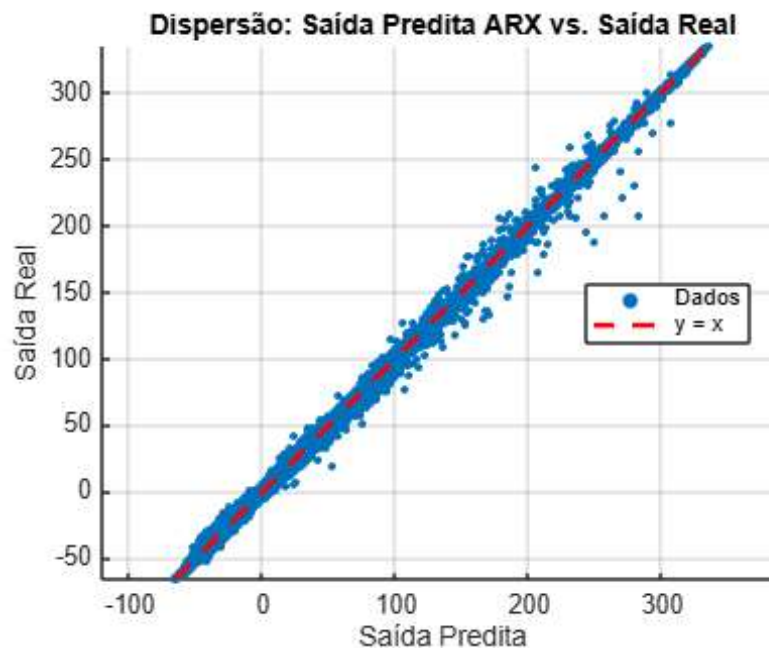
Na Tabela 6 estão apresentadas as funções de transferência correspondentes a cada uma das entradas do modelo ARX.

Tabela 6 – Funções de transferência do modelo ARX

Entrada	Função de Transferência	Nº da eq
u_2 (Motor_Rotação)	$\frac{-0,02118z^2 + 0,02087z + 0,23}{z^2 - 0,6736z - 0,2892}$	(4.3)
u_3 (Pedal_Acelerador_Posicao)	$\frac{-0,1383z^2 + 0,2428z + 0,8}{z^2 - 0,6736z - 0,2892}$	(4.4)
u_6 (Motor_Torque_Requisitado)	$\frac{0,04131z^2 - 0,001129z + 0,54}{z^2 - 0,6736z - 0,2892}$	(4.5)
u_9 (Água_Temperatura)	$\frac{0,01604z^2 - 0,01844z + 0,37}{z^2 - 0,6736z - 0,2892}$	(4.6)
u_{17} (Média_SemiEixo_Torque)	$\frac{0,01293z^2 - 0,01264z + 0,21}{z^2 - 0,6736z - 0,2892}$	(4.7)

Para avaliar o desempenho do modelo ARX identificado, foi gerada a saída estimada pelo modelo e comparada com a variável Motor_Torque_Atual. Conforme ilustrado na Figura 25, obteve-se um RMSE de 1,007 Nm em comparação ao valor real.

Figura 25 – Comparação entre a saída do modelo ARX e o Motor_Torque_Atual para as entradas do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Controle PID com modelo ARX

Para avaliar o desempenho do modelo ARX, foram configuradas seis variantes distintas do controlador PID. A Tabela 7 detalha os valores adotados para cada uma das configurações testadas.

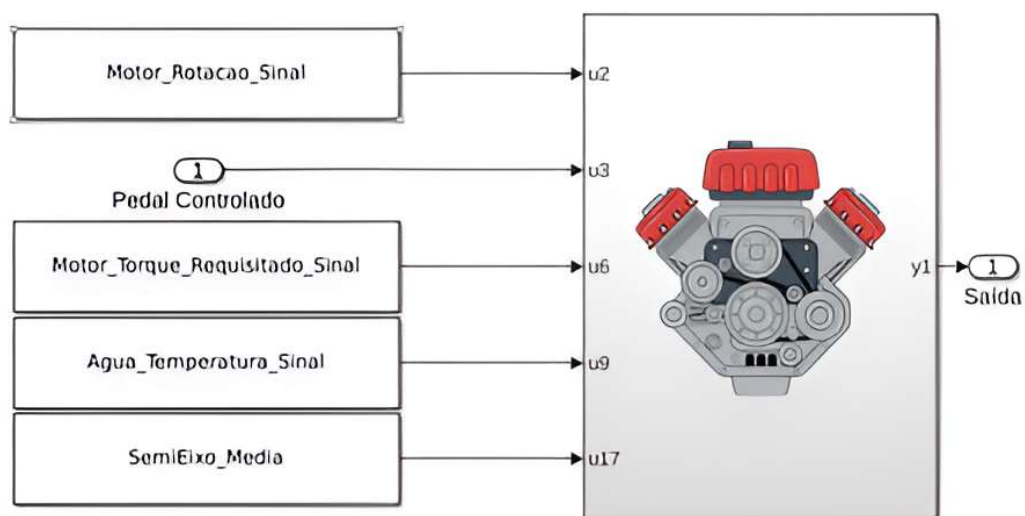
Tabela 7 – Parâmetros das configurações PID para o modelo ARX.

Configuração	P	I	D	N
PID_ARX1	2	3	20	30
PID_ARX2	0,30	0,007	0,01	50
PID_ARX3	7	8	25	35
PID_ARX4	0.45	0,008	0,08	75
PID_ARX5	1	1,5	10	15
PID_ARX6	0,40	0,007	0.008	70

Na configuração PID_ARX1, foram utilizados os parâmetros iniciais ($P = 2$, $I = 3$, $D = 20$, $N = 30$) como referência. Em seguida, na configuração PID_ARX2, aplicou-se a função Tune do MATLAB aos parâmetros iniciais, resultando em ajustes que produziram os valores ($P = 0.30$, $I = 0.007$, $D = 0.01$, $N = 50$). Posteriormente, para a configuração PID_ARX3, foi somado o valor 5 a todos os parâmetros da configuração inicial, ou seja, os valores passaram a ser ($P = 7$, $I = 8$, $D = 25$, $N = 35$), e novamente o Tune foi empregado para aperfeiçoar o ajuste. Em outra estratégia, os parâmetros iniciais foram divididos por 2, gerando a configuração PID_ARX5 com valores ($P = 1$, $I = 1.5$, $D = 10$, $N = 15$). Além disso, novos ajustes via Tune foram aplicados a essa divisão, originando as configurações PID_ARX4 ($P = 0.45$, $I = 0.008$, $D = 0.08$, $N = 75$) e PID_ARX6 ($P = 0.40$, $I = 0.007$, $D = 0.008$, $N = 70$).

Essas abordagens permitiram investigar a influência dos parâmetros do controlador PID no desempenho do modelo ARX e, conseqüentemente, na resposta do sistema.

Figura 26 – Diagrama do sistema implementado com novas variáveis de entrada.

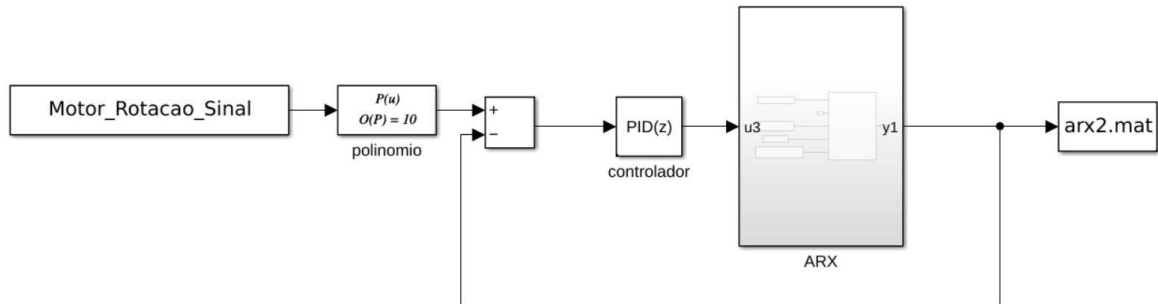


Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa abordagem permitiu analisar a influência dos novos parâmetros de entrada no desempenho do modelo. A Figura 27 apresenta o diagrama da malha fechada com o modelo ARX

utilizado anteriormente.

Figura 27 – Modelo ARX em malha fechada.

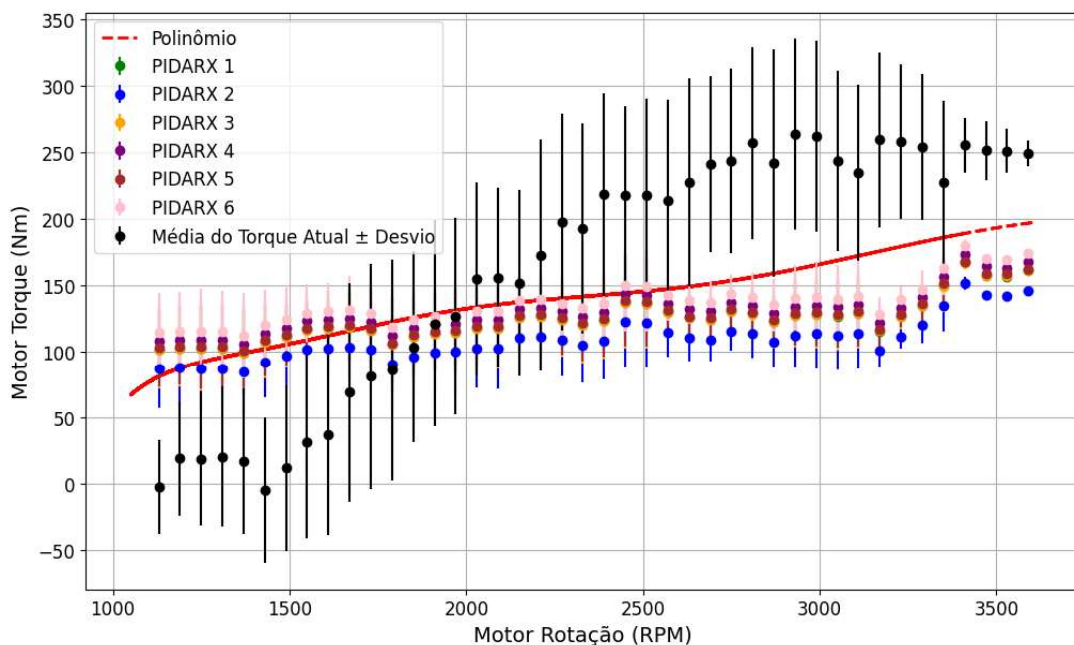


Fonte: Elaborado pelo autor.

A adição dessas variáveis ao modelo permite capturar melhor as dinâmicas do sistema, proporcionando um controle mais eficiente. A estrutura apresentada na Figura 26 demonstra a integração das variáveis externas ao controlador, resultando em uma resposta mais ajustada à realidade operacional.

Antes de apresentar os valores de RMSE, a Figura 28 mostra a comparação das respostas obtidas para todas as configurações de PID com ARX.

Figura 28 – Comparação das respostas para todas as configurações de PID com ARX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta representação, é possível visualizar uma maior aproximação dos torques controlados em relação ao polinômio de referência, permitindo verificar a efetividade de cada estratégia de ajuste e identificar possíveis melhorias no desempenho dos controladores.

Para quantificar o desempenho de cada configuração, foi calculado novamente o RMSE dos torques controlados pelo modelo ARX, considerando o polinômio de referência. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 8.

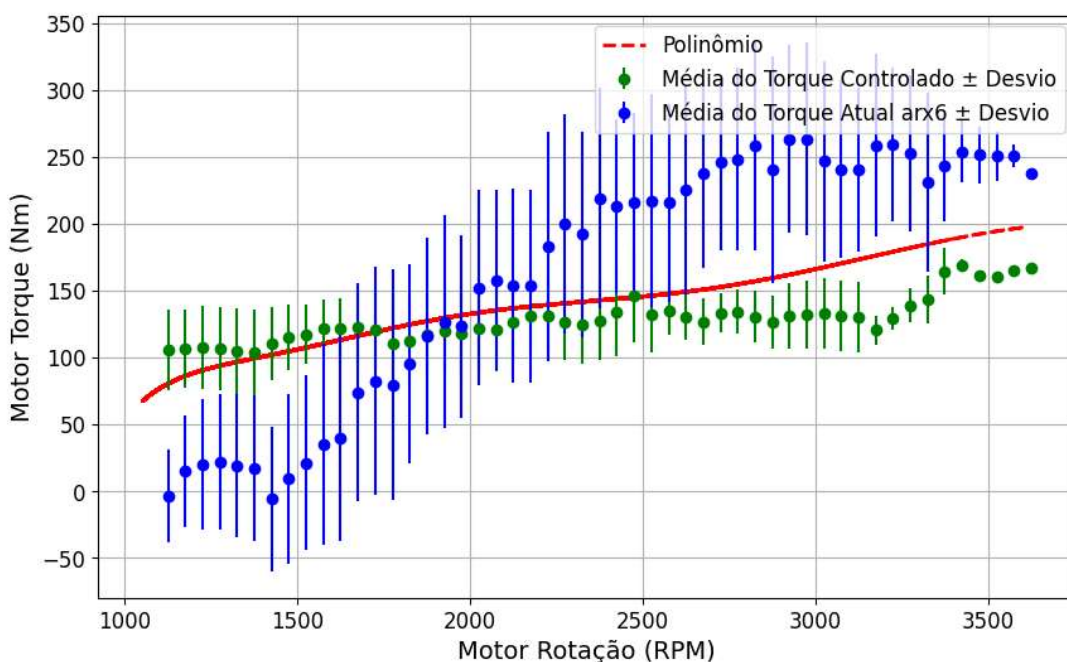
Tabela 8 – Valores de RMSE dos torques para cada teste de PID com ARX.

Configuração	RMSE (Nm)
PIDARX1	26,15
PIDARX2	38,04
PIDARX3	26,17
PIDARX4	24,22
PIDARX5	25,18
PIDARX6	23,73

Os resultados indicam que, embora as configurações PIDARX1, PIDARX3 e PIDARX5 apresentem RMSE intermediários (aproximadamente 25 Nm a 26 Nm), a configuração PIDARX2 obteve pior desempenho (38,04 Nm). Por outro lado, as configurações PIDARX4 e, especialmente, PIDARX6, demonstraram melhorias, com PIDARX6 obtendo o menor erro (23,73 Nm). Este resultado evidencia que a abordagem ARX contribuiu para uma melhor aproximação ao polinômio, refletindo em um sistema com menor consumo, conforme desejado.

Na Figura 29, apresenta-se o controlador PID que obteve o menor RMSE. Essa configuração permite comparar o desempenho do PID em relação ao polinômio OOL (isto é, o comportamento previsto pelo modelo) e ao torque efetivamente medido.

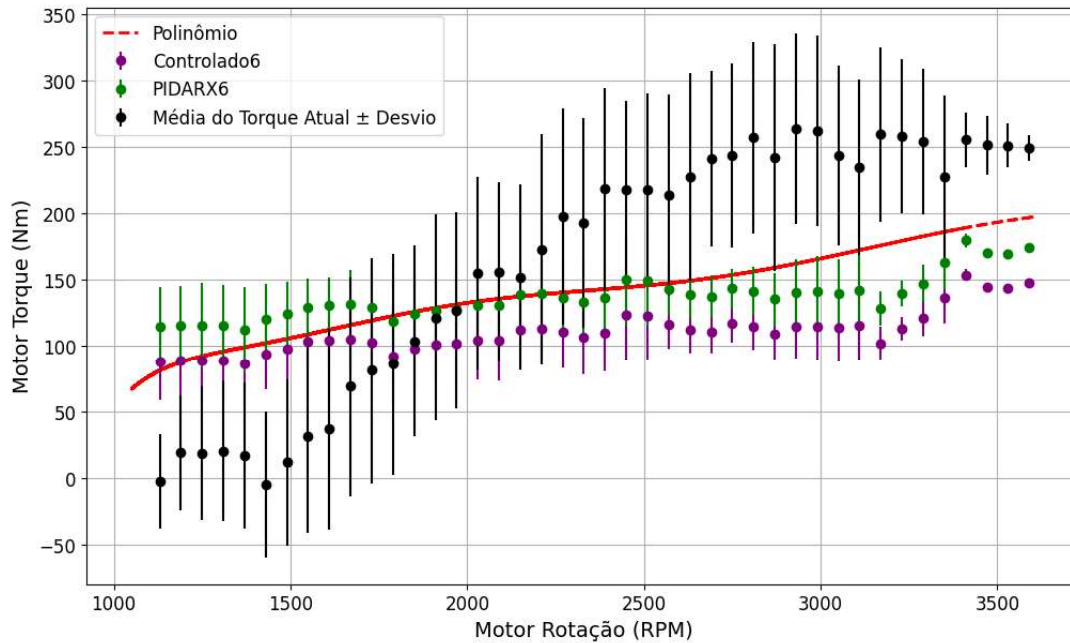
Figura 29 – Comparação com PIDARX6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 30 apresenta uma comparação entre o controlador PID que obteve o menor RMSE da função de transferência, o Motor_Torque_Atual e o torque PIDARX6.

Figura 30 – Comparação dos resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 30, pode-se observar que o modelo ARX6 apresenta um comportamento de torque mais próximo do polinômio OOL (curva vermelha) ao longo de toda a faixa de rotação considerada (cerca de 1000 RPM a 3500 RPM). Em particular, nota-se que a média dos valores de torque estimados pelo ARX6 se mantém mais alinhada à curva OOL, exibindo menor dispersão em comparação com o PID6, o que sugere uma resposta mais próxima do resultado desejado.

Além disso, a análise dos desvios indica que o ARX6 tende a apresentar uma variação menor, principalmente na faixa intermediária de rotações (entre 2000 RPM e 3000 RPM), sugerindo maior consistência do modelo nessa região. Desse modo, a partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que o ARX6 constitui uma alternativa com menor RMSE, conforme já observado. Ressalta-se, ainda, que a estratégia PIDARX6 exige maior poder de processamento, uma vez que envolve um número mais elevado de variáveis.

5 CONCLUSÃO

A abordagem adotada para a utilização dos controladores PID em malha fechada, associada à função de transferência e ao modelo ARX, possibilitou um controle eficiente do sistema, ajustando o torque real aplicado conforme as características do sistema.

Os resultados das simulações mostraram que as configurações do controlador PID apresentaram melhores resultados em comparação aos dados reais coletados. Em especial, o PIDARX6 obteve o menor valor de RMSE (23,73 Nm) quando comparado a curva OOL, indicando uma variação mais reduzida do que Motor_Torque_Atual que obteve um valor de RMSE de 93,45 Nm. Esse resultado evidencia que o sistema é capaz de manter o motor operando próximo ao polinômio OOL, contribuindo para uma operação mais eficiente e para a redução do consumo de combustível.

Em síntese, o trabalho confirma que a combinação de controladores PID em funções de transferência e com modelos ARX é uma estratégia consistente para o controle do torque, oferecendo uma base promissora para futuras investigações e possíveis aplicações práticas na indústria automotiva, com o objetivo de aprimorar a eficiência energética e o desempenho dos veículos modernos.

5.1 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados alcançados, algumas direções podem ser exploradas em trabalhos futuros para aprimorar ainda mais a eficiência do modelo proposto. Dentre elas, destaca-se a implementação e os testes do modelo em um ambiente real, utilizando um protótipo físico para avaliar o desempenho do controlador em condições práticas de operação. Ademais, recomenda-se a realização de experimentos em outros ambientes de teste, que possibilitem a simulação de diferentes cenários operacionais, incluindo a análise de parâmetros como inclinação e altitude durante as provas.

Outro ponto relevante para estudos futuros é a análise do impacto de parâmetros variáveis, considerando o comportamento do motor em diversos contextos, levando em conta variações de temperatura, carga, desgaste dos componentes ao longo do tempo e os efeitos das condições topográficas. Além disso, estratégias para aprimorar ainda mais o consumo energético do veículo podem ser desenvolvidas, visando reduzir o consumo de combustível.

REFERÊNCIAS

- ABUKHALIL, T.; ALMAHAFZAH, H.; ALKSASBEH, M.; ALQARALLEH, B. A. Y. Fuel consumption using obd-ii and support vector machine model. **Journal of Robotics**, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 14, 17 e 18.
- ARAÚJO, F. M. U. de. **Sistemas de Controle I - Apostila**. Natal-RN, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Computação e Automação, 2003. Apostila utilizada no curso de Sistemas de Controle I. Disponível em: <<https://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle1/Controle%20I%20-%20Apostila.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- _____. **Sistemas de Controle**. Natal-RN, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Computação e Automação, 2007. Disponível em: <<https://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle1/Controle%20I%20-%20Apostila.pdf>>. Citado na página 40.
- ATOMBO, J.; SMITH, J. Examining drivers' injury severity for manual and automatic transmission vehicles-involved crashes: Random parameter mixed logit model with heterogeneity in means and variances. **Heliyon**, v. 10, n. 16, p. e36555, 2024. ISSN 2405-8440. Citado na página 22.
- BRITO, M. A. R. de. **Análise da Utilização de Geradores Termoelétricos na Recuperação de Calor Residual de Exaustão em um Motor de Combustão Interna**. Trabalho de conclusão de curso — Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, 2017. Orientador: Prof. Marcus Costa de Araújo, D.Sc. Coorientador: Jacek Stanislaw Michalewicz, D.Sc. Citado na página 27.
- CHOJNACKI, D.; DELATTRE, B. Towards a better understanding of mechanical stress applied by passenger vehicle customers with optimized instrumentation and relevant data post-processing methodologies. **Procedia Structural Integrity**, v. 38, n. 1, p. 362–371, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 14, 17 e 18.
- DECICCO, J. A fuel efficiency horizon for u.s. automobiles. **The Energy Foundation**, 2010. Citado 3 vezes nas páginas viii, 19 e 20.
- FERREIRA, G. X. t. e. Fleet profile: Using visual analytics to prospect logistic solutions in industrial vehicles fleets. **Procedia Structural Integrity**, v. 151, n. 1, p. 1–18, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- GAISELMANN, G.; ALTENBURG, S.; STUDER, S.; PETERS, S. Deep reinforcement learning for gearshift controllers in automatic transmissions. **Array**, v. 15, p. 100235, 2022. ISSN 2590-0056. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259005622000728>>. Citado na página 22.
- GOLKANI, M. *et al.* Optimal gear shift strategy for dual clutch transmissions**this work was financially supported by the austrian comet k2 - competence centres for excellent technologies programme. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 4800–4805, 2017. ISSN 2405-8963. 20th IFAC World Congress. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317314374>>. Citado na página 21.

- GUARDIOLA, C.; VIGILD, C.; De Smet, F.; SCHUSTERITZ, K. From obd to connected diagnostics: a game changer at fleet, vehicle and component level**ford-upv collaboration on connected diagnostics is funded by eu h2020 ict-56-2020 grant 957258 assist-iot. c guardiola also acknowledges spanish agencia estatal de investigación grant pid2019-108031rb-c21. **IFAC-PapersOnLine**, v. 54, n. 10, p. 558–563, 2021. ISSN 2405-8963. 6th IFAC Conference on Engine Powertrain Control, Simulation and Modeling E-COSM 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896321016232>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- HIEN, N. L. H.; KOR, A.-L. Analysis and prediction model of fuel consumption and carbon dioxide emissions of light-duty vehicles. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 803, 2022. Citado na página 17.
- HONG, J. *et al.* Engine speed control during gear shifting of amt hevs with identified intake-to-power delay. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 11, p. 793–799, 2016. ISSN 2405-8963. 8th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316314665>>. Citado na página 20.
- KIHM, F.; MIU, T.; BONATO, M. Fatigue damage estimation in vehicle from minimal instrumentation thanks to a mixed engineering / data science approach. **Procedia Structural Integrity**, v. 38, p. 12–29, 2022. Citado na página 19.
- KLAASSEN, T. W. G. L. **The Impact CVT: Dynamics and Control of an Electromechanically Actuated CVT**. Tese (Doutorado) — Technische Universiteit Eindhoven, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.6100/IR625040>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- MACEDO, E. *et al.* Experimental evaluation of gear-shift and internal-combustion engine variables on fuel consumption, noise and pollutant emissions. **Transportation Research Procedia**, v. 62, p. 703–710, 2022. ISSN 2352-1465. 24th Euro Working Group on Transportation Meeting. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522002149>>. Citado na página 21.
- MAPURUNGA, E. de M.; FAÇANHA, C. P.; MAIA, J. E. B. Identificação de modelo arx e controle pi-d de um conjunto experimental correia rolante e motor cc. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, 2023. Citado na página 37.
- MOTTE, S. D. L.; HONG, J. B. A method for collecting vehicular network data for enhanced anomaly detection. **Information Security Applications: 22nd International Conference, WISA 2021, Jeju Island, South Korea, Revised Selected Papers 22, 2021**, v. 13009, n. 1, p. 16–27, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 18.
- NAUNHEIMER, H.; BERTSCHE, B.; RYBORZ, J.; NOVAK, W. **Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application**. 2nd. ed. Berlin: Springer, 2021. In Collaboration with Peter Fietkau. With 487 Figures and 85 Tables. Citado na página 22.
- NEZHADALI, V.; ERIKSSON, L. A framework for modeling and optimal control of automatic transmission systems. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 15, p. 285–291, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315019175>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 28.

RISKULOV, A. A.; RAKHMATOV, M. I. Maintenance and repair of car cardan shaft. **Central Asian Journal of Mathematical Theory and Computer Sciences**, Central Asian Studies, v. 3, n. 12, p. 342, 2022. ISSN 2660-5309. © 2022, CAJMTCS | Central Asian Studies. Disponível em: <<https://cajmtcs.centralasianstudies.org>>. Citado na página 29.

SAMPAIO, R. C. B. **Sistemas de controle e nova arquitetura para diferencial eletrônico em veículos de passeio convencionais a combustão convertidos em veículos híbridos 4x4**. Dissertação (Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica de Máquinas e Sistemas)) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Citado na página 30.

SILVA, M. e. a. A customer feedback platform for vehicle manufacturing compliant with industry 4.0 vision. **Sensors**, v. 18, n. 10, p. 3298, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 18.

TIEGHI, C. P. *et al.* Solar energy forecasting models using python. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 8, p. e2913846500, 2024. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/46500>>. Citado na página 35.

TOGUN, N.; BAYSEC, S. Genetic programming approach to predict torque and brake specific fuel consumption of a gasoline engine. **Applied Energy**, v. 87, n. 11, p. 3401–3408, 2010. Citado na página 25.

TOGUN, N. K.; BAYSEC, S. Prediction of torque and specific fuel consumption of a gasoline engine by using artificial neural networks. **Applied Energy**, v. 87, n. 1, p. 349–355, 2010. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v87y2010i1p349-355.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

YOON, H.-J.; CASTAÑO, A. F.; VOULGARIS, P. Adaptive control to suppress torque ripple in electric vehicles. **IFAC-PapersOnLine**, v. 56, n. 3, p. 223–228, 2023. ISSN 2405-8963. 3rd Modeling, Estimation and Control Conference MECC 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896323023613>>. Citado na página 20.

ZENG, W.; KHALID, M. A. S.; HAN, X.; TJONG, J. A study on extreme learning machine for gasoline engine torque prediction. **IEEE Access**, v. 8, p. 104762–104774, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.