

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Nathan Willian dos Santos

**Desenvolvimento de uma bancada de ensaios e avaliação do
recondicionamento de baterias de alta tensão com a tecnologia Ni-MH
aplicadas a veículos com propulsão híbrida**

Florianópolis

2022

Nathan Willian dos Santos

**Desenvolvimento de uma bancada de ensaio e avaliação do
recondicionamento de baterias de alta tensão com a tecnologia Ni-MH
aplicadas a veículos com propulsão híbrida**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.
Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Supervisor: Roberto Felício, Eng.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

dos Santos, Nathan Willian

Desenvolvimento de uma bancada de ensaios e avaliação do
recondicionamento de baterias de alta tensão com a
tecnologia Ni-MH aplicadas a veículos com propulsão híbrida
/ Nathan Willian dos Santos ; orientador, Rodolfo César
Costa Flesch, 2022.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Veículos
Híbridos. 3. Baterias de Níquel Hidreto Metálico. 4.
Recondicionamento de Baterias. I. Costa Flesch, Rodolfo
César . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Nathan Willian dos Santos

**Desenvolvimento de uma bancada de ensaio e avaliação do
recondicionamento de baterias de alta tensão com a tecnologia Ni-MH
aplicadas a veículos com propulsão híbrida**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 16 de dezembro de 2022.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr
Orientador
UFSC/CTC/DAS

Roberto Felício dos Santos, Eng.
Supervisor
Doutor-IE

Prof. Daniel Coutinho, Dr.
Avaliador
UFSC/CTC/DAS

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu supervisor, junto a Doutor-IE, Roberto Felício dos Santos, por acreditar no meu potencial e confiar integralmente a mim uma tarefa de grande importância e inovação dentro da empresa.

Sou grato também ao professor Rodolfo César Costa Flesch que me orientou de forma excepcional neste trabalho e me inspirou como profissional de forma indireta ao demonstrar sua dedicação na carreira acadêmica e como professor.

Cássia, Thayna, Ariadne, Gedson, Jamyle, Gilberto, Eric, Jean, Guilherme e Miguel. Minha grande família, a grande razão e o suporte que me possibilitou chegar até aqui.

RESUMO

Nos veículos híbridos e elétricos a bateria é um dos componentes com maior valor agregado e também o dispositivo que mais apresenta desgaste com o tempo e uso. Este projeto, desenvolvido na empresa Doutor-IE, propõe um equipamento de ensaio de módulos individuais de baterias da tecnologia de níquel hidreto metálico, utilizados em veículos híbridos da fabricante Toyota. Os ensaios são realizados com os objetivos de coletar informações sobre as condições de funcionamento das baterias e de avaliar a possibilidade de recondicionamento desses módulos por meio da aplicação de técnicas de redução do efeito memória. Como resultados, os métodos não se mostraram uma boa alternativa para recondicionar módulos individuais e foi estipulado um método simples, objetivo e sem ferramental complexo para manutenção dos pacotes de bateria que são compostos pelos módulos avaliados.

Palavras-chave: Veículo Híbrido. Bateria. Níquel-Hidreto Metálico.
Recondicionamento. Manutenção.

ABSTRACT

In hybrid electric vehicles and electric vehicles, the battery is one of the components with the highest added value and also the device that wears out the most over time and use. This project, developed at the company Doutor-IE, proposes testing equipment for individual battery modules using nickel metal hydride technology, used in hybrid vehicles from the manufacturer Toyota. The goal of the tests execution is to collect information about the operating conditions of the batteries and evaluating the possibility of reconditioning these modules through the application of techniques to reduce the memory effect. As a result, the methods did not prove to be a good alternative for reconditioning individual modules and it was a straightforward method, without complex tools, stipulated for maintaining the battery packs which are composed of the evaluated modules.

Keywords Hybrid Vehicle. Batteries. Nickel-Metal Hydride. Reconditioning. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Interface da plataforma Doutor-IE em dispositivos móveis e desktop.....	23
Figura 2 - Esquema de bateria de Ni-MH.....	29
Figura 3 - Esquema dos eletrodos em uma bateria selada de Ni-MH.....	30
Figura 4 - Reações de carga e descarga de uma bateria de Ni-MH.	31
Figura 5 - Esquema do mecanismo de carga e descarga de baterias de Ni-MH.	32
Figura 6 - Esquema de interligação dos componentes do sistema híbrido.	34
Figura 7 - Controle do estado de carga em Híbridos Toyota.....	35
Figura 8 - Morfologia do módulo individual da bateria do veículo Toyota Prius de terceira geração ano 2013.	37
Figura 9 - Esquema de ligação do pack de baterias do Toyota Prius de terceira geração.	38
Figura 10 - <i>Pack</i> de baterias do veículo Toyota Corolla Cross 2022 sem a tampa superior.	38
Figura 11 - Curva de tensões e entrada de carregamento durante o carregamento característico de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo “cilíndrico”. ...	40
Figura 12 - Perfil de temperatura e entrada de carregamento durante o carregamento característico de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo “cilíndrico”. ...	41
Figura 13 - Curva de descarga característica de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo “Botão”.....	44
Figura 14 - Curva de descarga característica de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo “Prismático”.	45
Figura 15 - Exercício e condicionamento de baterias em um analisador de bateria da empresa Cadex.....	47
Figura 16 - Comparação dos efeitos do exercício e condicionamento.....	48
Figura 17 - Perfis das correntes observados em campo no veículo Corolla Cross Hybrid ano 2022.....	52
Figura 18 - Dispositivo de ensaio dos módulos de bateria de Ni-MH.....	55
Figura 19 - Informações apresentadas no display após um ciclo de carregamento e descarregamento.	57
Figura 20 - Dispositivos de controle e sensoriamento.....	58
Figura 21 - Diagrama elétrico completo do equipamento de ensaio de módulos de baterias.	59

Figura 22 - Sensor de tensão aplicado ao projeto.....	63
Figura 23 - Ensaio completo de um módulo de bateria.....	67
Figura 24 - Curva de ensaio do módulo 02.	69
Figura 25 - Curva de descarga profunda do módulo 02.....	70
Figura 26 - Exemplos de códigos de falha lidos com o scanner original Toyota (<i>TechStream</i>).	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições para detecção dos critérios de parada de carregamento adotadas.....	57
Tabela 2 - Aplicação do método exercício (Capacidade extraída vs percentagem relacionada à capacidade nominal).....	68
Tabela 3 - Módulos aplicados a diferentes montagens do pack de baterias para análise de código de falha.	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	METODOLOGIA.....	19
1.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
2	A EMPRESA.....	22
2.1	MODELO DE NEGÓCIO.....	23
2.2	O SETOR DE DESENVOLVIMENTO.....	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1	CONCEITO DE BATERIA	26
3.2	BATERIAS DE NÍQUEL-HIDRETO METÁLICO (NI-MH)	26
3.2.1	Características gerais	27
3.2.2	Química da bateria de Ni-MH.....	28
3.3	BATERIAS DE NI-MH APLICADAS A VEÍCULOS HÍBRIDOS TOYOTA ...	32
3.4	TÉCNICAS DE CARREGAMENTO E PERFIS DE DESCARGA DE BATERIAS À BASE DE NÍQUEL	39
3.4.1	Técnicas de carregamento.....	39
3.4.2	Perfis de descarga	43
3.5	RESTAURAÇÃO DE BATERIAS À BASE DE NÍQUEL.....	45
3.5.1	Efeito memória nas baterias à base de níquel	45
3.5.2	Métodos de restauração: recondicionamento e exercício.....	46
3.5.3	Taxa de recuperação de baterias.....	49
4	REQUISITOS DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS.....	50
4.1	REQUISITOS GERAIS	50
4.2	REQUISITOS ESPECÍFICOS	51
4.2.1	Correntes de carga e descarga.....	51

4.2.2	Métodos de parada de carregamento.....	53
4.2.3	Avaliação da capacidade do módulo.....	54
5	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DESENVOLVIDO	55
5.1	EQUIPAMENTO FUNCIONAL	55
5.2	HARDWARE	60
5.2.1	Alimentação dos dispositivos	60
5.2.2	Microcontrolador.....	60
5.2.3	Carga.....	61
5.2.4	Sensor de corrente	62
5.2.5	Sensor de tensão	63
5.2.6	Sensor de temperatura	63
5.2.7	Relés e transistores	63
5.2.8	Display LCD	64
5.2.9	Fonte de alimentação para carregamento	64
5.3	SOFTWARE.....	65
6	RESULTADOS E ANÁLISE.....	66
6.1	AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE RECONDICIONAMENTO	67
6.1.1	Avaliação do método exercício	68
6.1.2	Avaliação do método de recondicionamento.....	69
6.2	MANUTENÇÃO DE BATERIAS DE VEÍCULOS HÍBRIDOS TOYOTA ORIENTADO POR CÓDIGO DE FALHA.....	71
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

As baterias de Níquel Hidreto Metálico Ni-MH (do inglês *Nickel Metal Hydride*) são utilizadas por veículos híbridos da fabricante Toyota a mais de 20 anos, e atualmente é a única tecnologia de acumuladores fornecida nos veículos vendidos no mercado brasileiro, em que a empresa é líder absoluta em vendas na categoria (NEOCHARGE, s.d).

No exterior existe um mercado emergente de reparação desse tipo de bateria, porém ainda não são vistas grandes empresas envolvidas no assunto, fato que gera dúvidas em relação a eficácia das técnicas aplicadas para reparação.

Neste documento é apresentado o projeto desenvolvido na empresa Doutor-IE, localizada na cidade de Florianópolis – SC. O estudo consiste no desenvolvimento de um equipamento de ensaio de módulos individuais de baterias da tecnologia de Níquel Hidreto Metálico (Ni-MH), com o objetivo de coletar informações sobre estes dispositivos e avaliar a possibilidade de recondicionamento desses módulos, por meio da aplicação de técnicas de redução do efeito memória, além de prescrever um método funcional para reparação de pacotes de baterias defeituosos (*packs*) pela substituição ou reparo de módulos defeituosos.

O projeto tem grande importância no contexto da reparação automotiva e ambiental, pois a substituição integral de uma bateria devido à falha de um ou poucos módulos internos pode ser, além de custosa, uma opção de alto impacto ambiental, não apenas considerando o resíduo final, mas todo o impacto da cadeia produtiva desses dispositivos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os veículos elétricos não são um advento tecnológico recente e, ao contrário do que muitos imaginam, esta solução é tão antiga quanto a dos motores a combustão interna. Uma das primeiras aparições de um veículo elétrico, foi no ano de 1898 com a produção do “Egger Lohner”, conhecido informalmente como “Porsche P1”, que consistiu no primeiro automóvel feito pela marca alemã (PORSCHÉ, s.d).

Após mais de 100 anos do surgimento do primeiro veículo elétrico, somente nas últimas duas décadas é que vemos o início da popularização dos mesmos, principalmente devido ao grande avanço nas tecnologias de armazenamento de energia. As baterias que antes eram pesadas, com baixa densidade de energia e pouco duráveis, hoje já são eficientes a ponto de tornar viável sua aplicação em veículos automotores, que se mostram como alternativa interessantíssima para a redução da emissão de poluentes na atmosfera, aumento da eficiência energética dos transportes e diminuição da poluição sonora de grandes centros urbanos.

Os automóveis híbridos e elétricos já fazem parte da frota de veículos de diversos países e se apresentam como uma solução para a redução das emissões de carbono na atmosfera, fomentado ainda mais por incentivos fiscais, principalmente no panorama de países desenvolvidos. No Brasil, o cenário é um pouco diferente, entretanto vem sofrendo grandes mudanças nos últimos anos. Aqui, os veículos eletrificados são ainda majoritariamente vendidos no nicho específico de carros de luxo, no qual o custo benefício de se ter um automóvel elétrico ainda é muito baixo, entretanto vemos uma alteração brusca neste cenário recentemente, principalmente com a chegada da eletrificação a sedans médios, como por exemplo o Toyota Corolla e até mesmo a apresentação em 2022 pela Renault do Kwid E-tech, colocando-o como o carro elétrico mais barato do país (PASSOS, Eduardo). Esse fato, aliado a outros, como o fato de a CAO A Chery ter fechado uma de suas fábricas para remodelação de suas linhas de produção para produzir exclusivamente veículos eletrificados até o fim de 2023 (MORAES, 2022), reforça ainda mais as mudanças que possivelmente irão ocorrer no mercado brasileiro de automóveis nos próximos anos.

Vislumbrando as futuras mudanças no panorama atual do mercado automotivo nacional, aliado ao fato de que alguns veículos eletrificados vendidos no Brasil estão quase completando 10 anos ou mais de operação (como é o caso do Toyota Prius), é esperado que se tenha uma alta na demanda por reparação desses veículos nos próximos anos e no cenário atual existem pouquíssimas oficinas independentes (fora do contexto das concessionárias) que são especialistas ou que reparam este tipo de veículo. Esse fato muito se deve à escassez de informações

técnicas no mercado a respeito dos sistemas embarcados nesse tipo de automóvel, além do que as tecnologias utilizadas são pouco conhecidas por reparadores comuns.

Considerando o contexto apresentado, a Doutor IE, que é uma empresa brasileira referência em informação técnica para diagnóstico e manutenção de veículos da linha leve à pesada, observa que é necessário prover informações e desenvolver pesquisas a respeito de veículos eletrificados para que seja possível agregá-los ao seu portfólio de informações técnicas. Tratando-se de veículos híbridos e elétricos, a bateria está entre os componentes com maior valor agregado e também é o dispositivo que mais apresenta desgaste com o tempo e uso. Por isso, esse foi o objeto de estudo do Projeto de Fim de Curso desenvolvido na empresa.

Tendo em vista a escassez de informações técnicas a respeito de veículos eletrificados no mercado alternativo de reparação brasileira, a Doutor IE vislumbra a possibilidade de protagonizar o pioneirismo no fornecimento desse tipo de informação aqui no Brasil, através da inclusão de materiais desta natureza em seu portfólio. Focada neste objetivo, a empresa necessita primeiramente que sua equipe interna conheça e domine as tecnologias em suas minúcias. Com esse objetivo, alguns investimentos em pesquisa foram realizados, dentre eles o estudo do sistema de armazenamento de energia.

Testes em baterias são naturalmente lentos, o que torna dificultoso a execução de um estudo padronizado por um operador humano e para que seja eliminado esta natureza problemas, viu-se a oportunidade de desenvolver um equipamento para testes dos módulos individuais das baterias, sendo este dispositivo responsável por efetuar o controle de carregamento, descarregamento; avaliando a tensão, corrente, tempo e temperatura. Este estudo visa viabilizar o desenvolvimento de uma maneira de diagnosticar e analisar a possibilidade de recondicionamento e reparo de baterias de Ni-MH, que é a tecnologia amplamente utilizada pela Toyota e sua subsidiária Lexus, que juntas detém cerca de 65% da frota de eletrificados nacional (NEOCHARGE, s.d).

Em termos históricos, os primeiros registros de estudos das baterias de Ni-MH são da década de 1960 como uma derivação de baterias utilizadas em satélites, como a Ni-Cd e a Ni-H₂, buscando por vantagens ambientais e menores custos.

Contudo, existiam algumas limitações técnicas que dificultavam a introdução comercial da tecnologia, que foram estudadas por diversas organizações de pesquisa tanto em 1970 quanto em 1980. Vale ressaltar que em meados da década de 1970 surgiram os veículos por conta de uma escassez temporária de gasolina e, ressurgiram na sequência, em 1990, por preocupações ambientais - e que as baterias de Ni-MH dominam as aplicações de veículos elétricos híbridos. Sendo assim, a partir de 1991 tem-se registros das baterias de Ni-MH demonstrando excelente segurança, resistência e ciclo de vida que foram traduzidos em confiabilidade para aplicações nos veículos ganhando espaço de consumo a partir da década mencionada (LINDEN; REDDY, 2011).

Já quanto a estratégias de restauração de baterias, muito se sabe sobre as baterias de Ni-Cd, como nos dois estudos abaixo detalhados por Buchmann (2001, p. 88):

- Estudo realizado pelo GTE Government Systems na Virgínia, EUA, para a Marinha dos Estados Unidos que mostra a importância de exercitar e recondicionar baterias de Ni-Cd em rádios bidirecionais de porta-aviões. Para determinar a porcentagem das baterias que precisavam de substituição no primeiro ano de uso, um grupo de baterias recebeu apenas carga, outro grupo foi exercitado e um terceiro grupo recebeu recondicionamento. Os resultados mostraram que para o primeiro grupo a porcentagem anual de falha foi de 45%, no segundo grupo a taxa de falha foi reduzida em 15% e, no terceiro grupo, a taxa de falha caiu para 5%;
- Estudo realizado pelo Exército Holandês envolvendo baterias de Ni-Cd que haviam sido utilizadas em serviço de 2 a 3 anos durante uma guerra, em cenários com condições adversas. Após a guerra, as baterias foram analisadas novamente e percebeu-se que a capacidade de alguns packs caíram em 30%. Com a função de recondicionamento, 90% das baterias foram recuperadas para uso total em campo.

Já quanto aos estudos focados em baterias de Ni-MH, tem-se:

- Estudo de Shena, Noréus e Starborgb (2018) que comenta o ciclo de vida de baterias de Ni-MH podem ser estendidos com adições controladas de oxigênio e hidrogênio em estado gasoso;
- Estudo de Fujita (2018) em que realizou a modelagem do comportamento de descarga de um pack composto por 9 baterias Ni-MH.

Considerando os estudos de recondicionamento, tem-se o estudo de Horesh *et al.* (2021) sobre recondicionamento para baterias de lítio mostrando que o recondicionamento é um método economicamente competitivo.

No entanto, apesar dos estudos existentes serem extremamente relevantes para o desenvolvimento das tecnologias relacionadas à baterias de Ni-MH, recondicionamento e exercício, nota-se poucos estudos com foco em teste prático de recondicionamento e exercício para baterias de Ni-MH, sendo ainda mais restrito se tratando da aplicação a veículos híbridos, ou baterias de alta performance. Além disso, existe pouca representatividade de estudos desta tecnologia em português, acessível no Brasil. Portanto, este trabalho vem a contribuir nesta frente além das já mencionadas na seguinte.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo é desenvolver um método padronizado de avaliação do desempenho de módulos individuais das baterias de tração com a tecnologia de Níquel Hidreto Metálico empregadas em veículos híbridos da Toyota e avaliar a possibilidade e eficácia de métodos que prometem reduzir o efeito memória ao qual teoricamente são suscetíveis os dispositivos com este tipo de tecnologia, além disso, ao final da análise é desejado que se prescreva uma abordagem para reparo desse tipo de baterias. Com isso, espera-se obter um equipamento de ensaio de módulos individuais de baterias, que possibilite executar rotinas de ensaio nos módulos de forma automatizada e sistêmica.

Do ponto de vista da empresa, é desejado que o projeto consiga garantir um melhor domínio interno das tecnologias de baterias empregadas nos veículos Toyota, de forma a possibilitar futuramente a realização de treinamentos internos e externos, além de rentabilizar com produtos e serviços relacionados ao tema.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada no desenvolvimento do projeto consistiu em realizar, inicialmente, a organização de toda a estratégia de abordagem da pesquisa. Com

isso, nas primeiras etapas, foi desenvolvida uma avaliação da ordem de grandeza dos principais parâmetros referentes às baterias encontrados nos veículos em campo. Com isso, foi possível especificar, com base nos valores observados e a fundamentação bibliográfica, os requisitos do equipamento de ensaios a ser desenvolvido.

Na próxima fase, foi iniciado o desenvolvimento e obteve-se o equipamento de ensaios e, com isso, pode ser iniciada a etapa de análise do desempenho de métodos de condicionamento. Para isso, os módulos de baterias avaliados foram devidamente etiquetados e organizados, com a finalidade de obter um histórico organizado de testes passados e os ensaios realizados.

Na última etapa, avaliou-se os efeitos em termos de geração de códigos de falha no sistema dos veículos, devido a aplicação de módulos de baterias com diferentes capacidades de armazenamento em um conjunto de baterias de um veículo híbrido.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento é composto por sete capítulos e referências. O primeiro capítulo, no qual esta seção está inserida, trata da introdução da justificativa, objetivos, metodologia e estrutura do documento desta monografia.

A empresa é apresentada no capítulo dois. Detalha-se o modelo de negócios em que opera e o setor de desenvolvimento no qual o projeto foi executado.

No capítulo três, é feita uma revisão bibliográfica acerca do tema ao trazer definições e pesquisas sobre o conceito de bateria, detalhamento sobre as baterias de níquel-hidreto metálico, e.g. características gerais e química desse tipo de bateria, aplicação dessas baterias à veículos híbridos Toyota, técnicas de carregamento, perfis de descargas e restauração de baterias à base de níquel.

Apresentam-se, no capítulo quatro, os requisitos esperados para o equipamento de ensaios, tanto os requisitos gerais quanto os requisitos específicos, que serviram de guia para o desenvolvimento do dispositivo.

Já no capítulo cinco, o equipamento de ensaios desenvolvido é descrito, tal como o equipamento funcional, hardware e software.

Os resultados e análises são explorados no capítulo seis. Faz-se uma avaliação dos métodos de condicionamento e manutenção de veículos híbridos Toyota orientado por código de falha.

Por fim, nos capítulos final, elaboram-se algumas considerações finais sobre o equipamento de ensaio desenvolvido neste trabalho, seguido de apêndices.

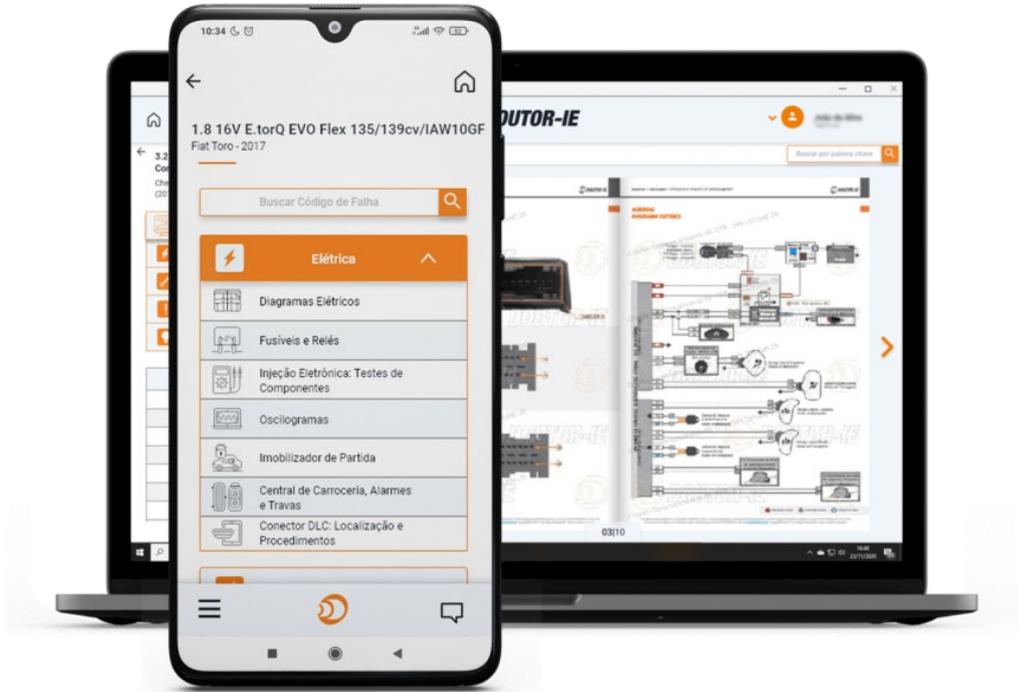
2 A EMPRESA

A Doutor-IE é uma empresa brasileira, referência em documentação técnica online para diagnóstico e reparação automotiva profissional. Com mais de 25 anos de mercado, localizada em Florianópolis, a Doutor-IE desenvolve documentação técnica para manutenção, diagnóstico e reparo de sistemas automotivos (DOUTOR-IE, 2022).

A empresa oferece uma solução completa para a reparação automotiva unificada em uma plataforma on-line através de uma aplicação instalada em dispositivos móveis e desktop. Os milhares de materiais disponibilizados aos clientes são de desenvolvimento próprio e se destacam no mercado por não serem uma tradução literal de manuais originais ou uma imagem estática dos sistemas encontrados nos veículos. O grande diferencial dos materiais da empresa é que são desenvolvidos por profissionais do assunto, que realizam o desenvolvimento focados no uso. Além da confiabilidade, os materiais se diferenciam por serem didáticos e visuais e a empresa conta com um setor de design gráfico, que realiza as ilustrações utilizadas.

Os materiais disponibilizados na plataforma abrangem os temas: Diagramas Elétricos e Pontos de Aterramento; Fusíveis e Relés; Fluidos e Capacidades; Torques de Aperto; Motor e Ajustes; Dicas e Soluções, Revisões Periódicas; Correia Dentada e Auxiliar e Corrente Sincronizadora. A busca por conteúdos na Plataforma Doutor-IE ocorre por meio dos dados da montadora, modelo do veículo, ano-modelo e Chassi. Um exemplo de navegação e da visualização dos conteúdos da plataforma em dispositivos móveis ou desktop, pode ser visto na Figura 1.

Figura 1- Interface da plataforma Doutor-IE em dispositivos móveis e desktop



Fonte: Documento interno da Doutor-IE, 2022.

2.1 MODELO DE NEGÓCIO

O modelo de negócio é fundamentalmente pautado na venda do acesso à plataforma on-line. Sendo assim, a empresa é categorizada como uma prestadora de serviços, pois os conteúdos oferecidos na plataforma estão em constante desenvolvimento e atualização de acordo com as mudanças do mercado automotivo. Além disso a empresa oferece suporte técnico em período integral, que auxilia os reparadores em questões que podem ir desde a solução de dúvidas de interpretação dos materiais da plataforma até auxílio em diagnósticos mais complexos que estejam sendo realizados dentro das oficinas.

A Doutor-IE atua ativamente nas redes sociais e anualmente realiza um evento pago em forma de ciclo de palestras, no qual os palestrantes são profissionais de referência no ramo automotivo nacional e internacional, sendo abordadas as novidades, assuntos técnicos e de gestão para oficinas.

Os planos de adesão aos serviços oferecidos são sob demanda. Dessa forma, os clientes podem escolher a quais categorias de veículo desejam contratar o acesso e os valores praticados são diferentes para cada regime de abrangência da contratação. As categorias dos planos disponíveis são: Otto, Moto, SUV e Truck; sendo, respectivamente, materiais que abrangem veículos com motores de ciclo Otto; motocicletas; utilitários e veículos movidos a diesel e, por último, caminhões da linha pesada movidos a diesel.

2.2 O SETOR DE DESENVOLVIMENTO

A divisão das atividades ocorre por setores e estes operam de forma paralela, os setores são os de: desenvolvimento, design, comercial, suporte técnico e administrativo, sendo o Projeto de Fim de Curso tratado neste documento, desenvolvido dentro do setor de desenvolvimento da empresa.

O setor de desenvolvimento é subdividido em três frentes de atuação, o desenvolvimento de diagramas elétricos; de manuais mecânicos; e de software e análise de dados. No setor, existe uma hierarquia de gerentes que efetuam o controle e gerenciamento de tarefas de acordo com as demandas. Além dessas tarefas, os gerentes são os últimos níveis de segurança na auditoria dos manuais antes da publicação efetiva na plataforma.

As demandas de desenvolvimento surgem de acordo com tendências do mercado; novidades e lançamentos; pedidos de clientes através do setor de suporte da empresa ou pela equipe de análise de dados, que observa diversos indicadores e geram novas demandas. Os indicadores em sua maioria são dados de uso coletados automaticamente da plataforma da empresa e registros efetuados pelo setor de suporte técnico.

Divisão de eletrificados

No setor de desenvolvimento existem também as seguintes equipes: equipes responsáveis pela produção de materiais referentes a veículos com motores de ciclo diesel; ciclo Otto e motocicletas, tendo cada uma dessas um coordenador responsável

pelo controle e direcionamento do andamento das atividades. Neste contexto, é importante salientar que ainda não existe a subdivisão responsável por veículos eletrificados e esta será uma nova área de atuação da empresa. Por este motivo, estão sendo realizados investimentos em pesquisa na área de veículos híbridos e elétricos, como o que motivou este Projeto de Fim de Curso.

A empresa conta com um laboratório para pesquisas internas e materiais para pesquisa que vão desde packs de baterias de veículos híbridos até mesmo um veículo Toyota Prius de terceira geração, um híbrido não plug-in, que foi escolhido pelo fato de representar o primeiro automóvel híbrido produzido em série no mundo (PERONI, 2021).

Em todas as gerações, o Prius possui a mesma filosofia de funcionamento do sistema híbrido, a qual é utilizada até hoje em toda a linha híbrida da Toyota e Lexus, além do que, atualmente o Corolla Cross (automóvel híbrido mais vendido do Brasil) tem exatamente o mesmo sistema aplicado ao Prius de sua geração equivalente.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se uma fundamentação teórica, i.e., revisão de pesquisas e discussões de outros autores sobre o assunto deste trabalho. Na primeira seção se estabelece o conceito básico de bateria. Na segunda seção, traz-se as especificidades da bateria de Ni-MH, como as características gerais e a química desse tipo de bateria. Na terceira seção, trata-se das baterias de Ni-MH aplicadas a veículos híbridos Toyota. Na quarta seção, traz-se um panorama das técnicas de carregamento e perfis de descarga de baterias à base de níquel. E, por fim, na quinta e última seção deste capítulo, faz-se uma revisão da restauração de baterias à base de níquel, comentando sobre o efeito memória, métodos de restauração (recondicionamento e exercício), além da taxa de recuperação dessas baterias.

3.1 CONCEITO DE BATERIA

Segundo Linden e Reddy (2011), uma bateria é constituída por conjunto de duas ou mais células, i.e., a célula é a unidade eletroquímica do dispositivo, que converte energia potencial química em energia elétrica através de uma reação eletroquímica de oxidação-redução. Além disso, a bateria pode ter sua capacidade restaurada através da reação reversa em sistemas recarregáveis. As células podem ser conectadas em série ou paralelo, ou ainda das duas formas, a fim de se obter diferentes níveis de tensão e capacidade (LINDEN; REDDY, 2011).

3.2 BATERIAS DE NÍQUEL-HIDRETO METÁLICO (NI-MH)

Michelini (2017, p. 47) diz que "a bateria de níquel-hidreto metálico tem uma alta densidade de energia se comparada com as baterias de Níquel Cádmio (Ni-Cd). Porém seu ciclo de vida é ligeiramente inferior ao das baterias Ni-Cd". Essa comparação é feita uma vez que a bateria de Ni-Cd tem uma tecnologia já desenvolvida, madura e conhecida.

Schneider *et al.* (2010, apud MANZINI, VEZZOLI, 2005) menciona que, além da evolução tecnológica de eletrônicos portáteis, as restrições ambientais contribuíram para a utilização de diferentes tipos de baterias, como as de Níquel-

Hidreto Metálico (Ni-MH). Linden e Reddy (2001) também concordam com esses dois aspectos para o crescimento do uso e da produção das baterias de Ni-MH: (1) vantagens ambientais e energéticas vs. outros tipos de baterias, principalmente de Níquel Cádmio (Ni-Cd); (2) rápido crescimento dos aparelhos eletrônicos, onde as baterias de Ni-MH são bastante empregadas. Ainda, complementam que devido às suas vantagens técnicas em relação a outros sistemas recarregáveis, esse tipo de bateria está sendo desenvolvido para aplicações em veículos elétricos, veículos elétricos híbridos e veículos industriais.

Abaixo descrevem-se as características gerais, envolvendo o conceito das baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) e peculiaridades da química desse tipo de bateria.

3.2.1 Características gerais

As baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) são baterias secundárias, que segundo Fujita (2018, p. 26), "podem ter sua capacidade recarregada após a sua utilização, de volta para sua condição original, aplicando-se uma corrente em sentido reverso". Tornaram-se a tecnologia de bateria avançada dominante para aplicações de veículos elétricos (EV, do inglês *electric vehicle*) e veículos elétricos híbridos (HEV, do inglês *hybrid electric vehicles*) principalmente por terem o melhor desempenho geral para atender aos requisitos estabelecidos pelo Consórcio de Baterias Avançadas dos Estados Unidos (USABC, do inglês *United States advanced battery consortium*).

Além das metas essenciais de desempenho de energia, potência, ciclo de vida e temperatura operacional, Linden e Reddy (2001) sugerem que as seguintes características das baterias de Ni-MH estabeleceram esta tecnologia neste mercado:

- materiais ambientalmente aceitáveis e recicláveis
- tamanhos de células flexíveis de 0,3 Ah a 250 Ah;
- operação segura em alta tensão (320 V);
- excelente energia volumétrica e potência, embalagem de veículo flexível;
- facilmente aplicáveis em ligações em série e em série/paralelo;

- possibilidade de escolha de células cilíndricas ou células prismáticas;
- segurança na carga e descarga, incluindo tolerância à sobrecarga e descarga;
- livre de manutenção;
- propriedades térmicas excelentes;
- capacidade de utilizar energia de frenagem regenerativa;
- carregamento simples e barato e circuitos de controle eletrônico.

3.2.2 Química da bateria de Ni-MH

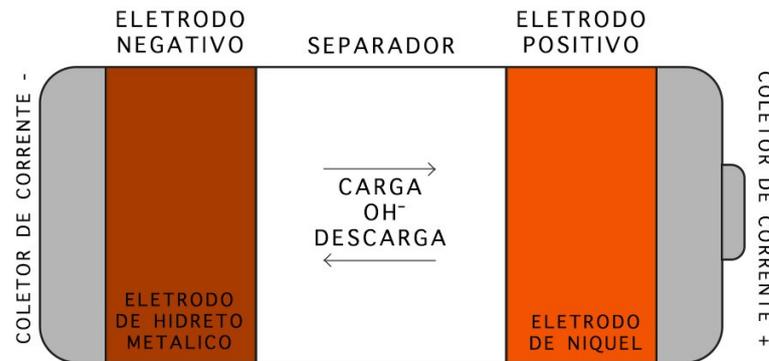
Para baterias de Ni-MH, o material ativo do eletrodo positivo, no estado carregado, é o oxi-hidróxido de níquel III (LINDEN; REDDY, 2001).

De acordo com Ambrosio e Ticianelli (2001, p. 244),

Nas baterias de níquel hidreto metálico, o material ativo para o eletrodo negativo no estado carregado é o hidrogênio armazenado na forma de hidreto em uma liga. Esta liga é capaz de armazenar hidrogênio reversivelmente, absorvendo e desorvendo este reagente quando a bateria é carregada e descarregada, respectivamente (AMBROSIO; TICIANELLI, 2001).

Na Figura 2, pode-se visualizar um esquema interno de uma célula de bateria de Ni-MH, na qual é possível observar nas extremidades os eletrodos positivos e negativos, com a indicação dos seus respectivos materiais. Ao centro tem-se o material separador, que evita o contato entre os eletrodos. É nos poros deste material que o eletrólito está presente, eletrólito este que possibilita o trânsito de elétrons entre os eletrodos nos processos carga e descarga da célula.

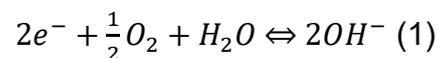
Figura 2 - Esquema de bateria de Ni-MH.



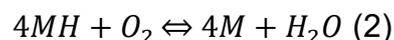
Fonte: AMBROSIO; TICIANELLI, 2001 (Adaptado).

Como complemento, vale mencionar que o hidreto metálico é formado por uma liga metálica com grande capacidade de absorção de hidrogênio e o seu eletrólito se compõe por uma solução aquosa de hidróxido de potássio misturada com pequenas quantidades de aditivos cuja função é melhorar o desempenho dos eletrodos (PANASONIC, 2014).

Utiliza-se, na célula selada, uma pequena quantidade de eletrólito - a maior parte do líquido é absorvido por um separador e eletrodos -, que contribui para a difusão do oxigênio para o eletrodo negativo ao longo da carga. Sendo assim, o oxigênio gerado como subproduto no eletrodo positivo então pode ser transformado no íon hidroxila, conforme mostra a reação em (1):



Para que o oxigênio gerado como subproduto em um momento de sobrecarga no eletrodo positivo tenha condições de reagir no eletrodo negativo, descarregando-se parcialmente e evitando que a pressão interna da bateria sofra um aumento, tem-se a reação em (2):



Dessa forma, consegue-se prevenir a geração de hidrogênio gasoso e, também, facilitar os processos de recombinação de oxigênio (AMBROSIO; TICIANELLI, 2001).

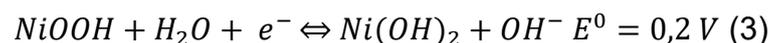
Para este tipo de bateria, o eletrodo negativo apresenta uma capacidade maior do que a capacidade do eletrodo positivo. A bateria também apresenta uma reserva para descarga - que evita a oxidação da liga de hidreto metálico quando a descarga se completa. Portanto, o eletrodo positivo é o que limita a capacidade útil desse tipo de bateria. A representação desse esquema pode ser vista na Figura 3 (AMBROSIO; TICIANELLI, 2001).

Figura 3 - Esquema dos eletrodos em uma bateria selada de Ni-MH.

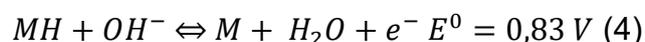


Fonte: AMBROSIO; TICIANELLI, 2001 (Adaptado).

O separador, ilustrado na Figura 3, tem a função de balancear e reter o eletrólito, além de provocar um efeito de auto-descarga, ao evitar que os reagentes dos dois eletrodos entrem em contato direto. Assim, o oxi-hidróxido de níquel III é reduzido a hidróxido de níquel II no eletrodo positivo no decurso da descarga, como pode ser visto na reação em (3):



O hidreto metálico MH é oxidado para regenerar a liga metálica M no eletrodo negativo, como pode ser visto na reação em (4):



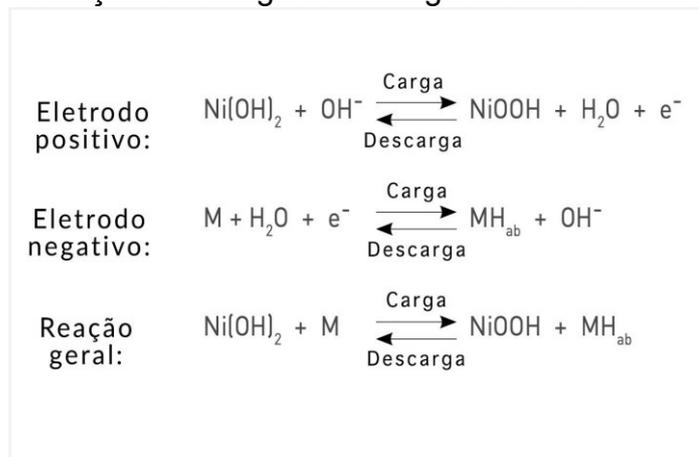
Por fim, tem-se a reação global de descarga da bateria de níquel-hidreto metálico em (5):



Durante a carga o processo é revertido. Ainda, Ambrosio e Ticianelli (2001, p. 244) observam que, "pela equação global para o processo de descarga [...] não há consumo e nem formação de água ou hidroxila durante um ciclo completo de carga e descarga" (AMBROSIO; TICIANELLI, 2001).

Já a Panasonic (2014) sintetiza as principais reações abaixo, na Figura 4, mencionando as reações de carga e descarga no eletrodo positivo, eletrodo negativo e a reação global:

Figura 4 - Reações de carga e descarga de uma bateria de Ni-MH.



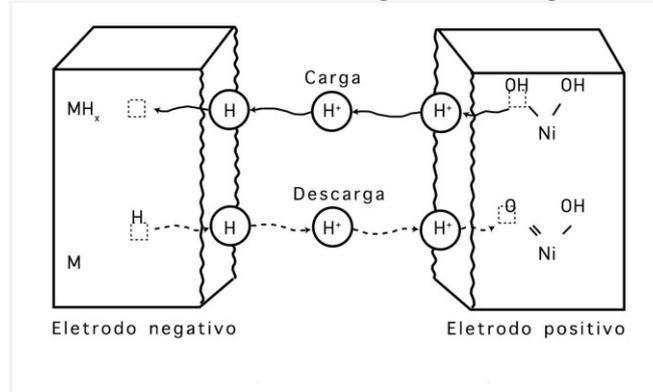
Fonte: PANASONIC, 2014 (Adaptado).

Como pode ser visto pela reação geral dada na Figura 4, a principal característica de uma bateria Ni-MH é que o hidrogênio se move do eletrodo positivo para o negativo durante a carga. O reverso acontece durante a descarga, com o eletrólito não participando da reação. Desta forma, não há um aumento ou uma diminuição no eletrólito.

Na Figura 5, mostra-se um esquema do mecanismo de carga e descarga de baterias de Ni-MH. Essas são as reações que ocorrem nas respectivas faces dos

eletrodos positivo e negativo. Para auxiliar na compreensão, mostra-se como as reações ocorrem pela transferência de prótons (H^+).

Figura 5 - Esquema do mecanismo de carga e descarga de baterias de Ni-MH.



Fonte: PANASONIC, 2014 (Adaptado).

3.3 BATERIAS DE NI-MH APLICADAS A VEÍCULOS HÍBRIDOS TOYOTA

Os veículos híbridos da Toyota e Lexus adotam o conceito *Hybrid Synergy Drive*, que consiste no sistema que busca integrar de forma sinérgica e suave o motor à combustão e dois motores/geradores elétricos, através de um conjunto de engrenagens planetárias denominado *Power Split Device*, que possibilita a geração de infinitas relações de transmissão através do controle desses três componentes.

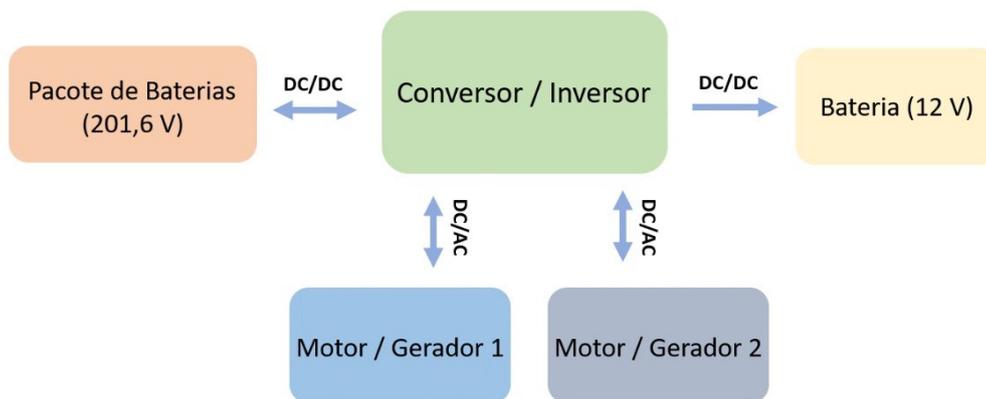
A filosofia do conceito *Hybrid Synergy Drive* almeja quatro principais benefícios: economia de combustível, baixo índice de emissões, aceleração progressiva e baixo ruído (TIS, 2022). Esse conceito de sistema teve sua primeira aparição no ano de 1997 no Japão, equipando o primeiro veículo híbrido de produção em massa, o Toyota Prius. Desde então, esse sistema vem sendo aperfeiçoado continuamente a mais de 20 anos, recebendo melhorias em desempenho, eficiência energética e redução de peso, mas sem perder suas características. O termo desempenho se refere aos parâmetros quantitativos, como exemplo: potência, torque, corrente. Já o termo eficiência energética está ligado as perdas energéticas envolvidas nos processos e dispositivos (TOYOTA, 2013).

O grande pilar por detrás do funcionamento dos sistemas híbridos é o reaproveitamento da energia cinética transferida durante as frenagens e a otimização

do uso do motor à combustão (LINDEN; REDDY, 2011). Nesse contexto, os veículos Toyota contam com o ciclo Atkinson, que permite uma maior eficiência energética do motor à combustão, mesmo tendo uma potência específica menor do que um motor de equivalente cilindrada de ciclo Otto (RUFFO, 2021). Como o motor à combustão e o motor elétrico trabalham em paralelo, as potências são complementadas e compensam o regime de deficiência de cada um. As mais recentes versões dos automóveis híbridos da Toyota não possuem componentes periféricos ao motor que necessitem de sua rotação para funcionar, portanto dispositivos como bombas d'água e compressor do sistema de ar-condicionado não dependem do motor à combustão e podem operar mesmo que o propulsor esteja fora de operação (TIS, 2022).

Segundo o material de informação técnica de serviço da Toyota (TIS), a parte elétrica do sistema híbrido é composta por dois principais componentes, sendo eles: bateria de alta tensão, que alimenta os sistemas de alta tensão e também serve como acumulador energia; o conversor inversor, que amplifica (para até 600 V) e inverte a tensão de correntes contínuas da bateria do sistema híbrido para tensão de correntes alternadas para alimentar os motores elétricos ou vice-versa. Vale mencionar que o conversor inversor também converte alta tensão da bateria híbrida para baixa tensão de nível 12 V, que serve para alimentar os demais sistemas elétricos e eletrônicos embarcados. Os dois motores elétricos são síncronos com rotor de ímã permanente. A Figura 6 apresenta o esquema de interligação dos componentes relacionados ao sistema híbrido.

Figura 6 - Esquema de interligação dos componentes do sistema híbrido.



Fonte: O Autor.

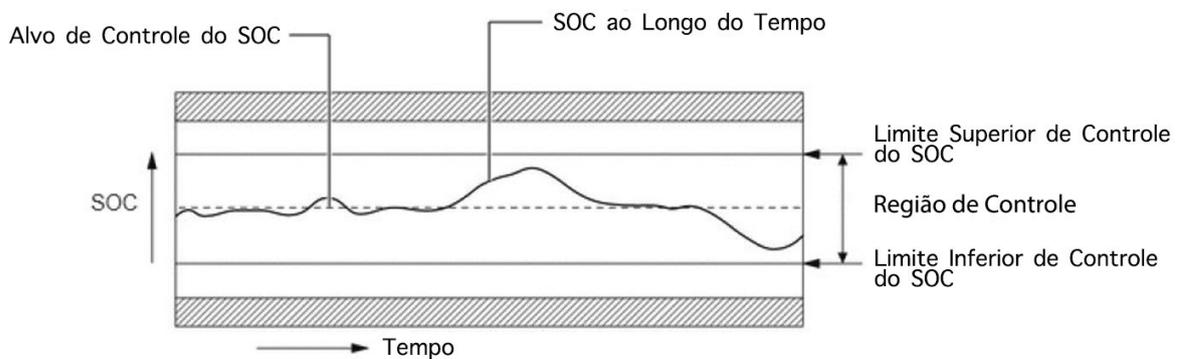
É interessante salientar que a Toyota não possui híbridos *plug-in* à venda no mercado brasileiro. Os híbridos *plug-in* são veículos que permitem a recarga via tomada de carregamento, que faz com que seja aumentada a possibilidade de condução somente em modo elétrico. No Brasil, a infraestrutura de recarga veicular ainda é emergente e não oferece uma boa experiência para os usuários. Por este motivo a Toyota ainda não aposta neste tipo de funcionalidade no mercado nacional, o que favorece ainda mais o uso de baterias de Ni-MH que não lidam bem com descargas completas (fato que ocorre constantemente em híbridos *plug-in*), pois tem sua vida útil reduzida nessa situação (LIRA, 2022).

De acordo com Linden e Reddy (2011), a grande diferença entre os requisitos a serem atingidos em veículos híbridos não *plug-in* (HEV, do inglês *hybrid electric vehicles*), híbridos *plug-in* (PHEV, do inglês *plug-in hybrid electric vehicles*) e veículos puramente elétricos (EV, do inglês *electric vehicles*), é que os HEVs (que é o caso dos híbridos Toyota no Brasil) têm a especificação de suas baterias com maior ênfase em desempenho tanto no carregamento quanto na descarga. Além disso, a bateria não é desenvolvida para ter alta capacidade de armazenamento de energia. Em

contraposição, os PHEV e EV têm a especificação das baterias pautadas em maior capacidade de armazenamento e densidade de energia. O ciclo de vida de uma bateria de Ni-MH em uso em um veículo HEV é calculado com base em um valor de taxa de descarregamento (DOD, do inglês, *depth of discharge*) com valores muito pequenos (na ordem de 2% a 5%), enquanto nos veículos completamente elétricos, o DOD é muito maior (na ordem de 50% a 80%), pois nos PHEVs e EVs a bateria é drenada até faixas muito mais baixas que em HEVs.

De acordo com TIS (2022), isso se deve ao fato de os veículos híbridos não *plug-in* manterem o estado de carga (SOC, do inglês *state of charge*) entre uma faixa de operação fixa e isso faz com que a taxa de descarga DOD nunca ultrapasse o valor máximo de descarregamento da faixa de SOC permitido. O comportamento do estado de carga SOC em veículos HEV da Toyota pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Controle do estado de carga em Híbridos Toyota.



Fonte: *Toyota Information System (TIS)*.

Fonte: TIS, 2002 (Adaptado).

O pacote de baterias e seus módulos

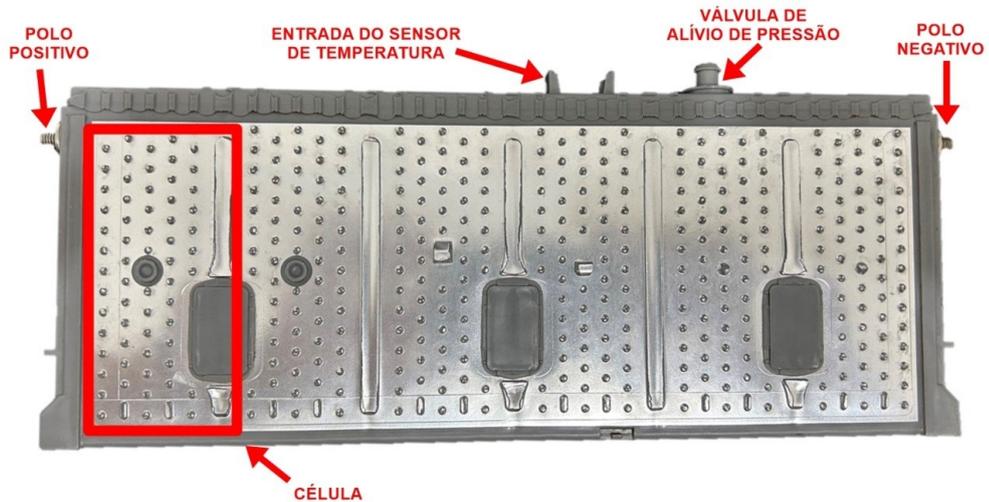
De acordo com BNDES (2013), na gama de veículos Toyota, o pacote de baterias (do inglês *Battery pack*) é fornecido pela empresa Primearth EV Energy

(PEVE), antiga Panasonic EV Energy, que consiste em uma *join-venture* entre a Toyota e a Panasonic, sendo seu principal cliente a própria Toyota. A empresa conta com fábricas no Japão em Omori, Sakaijuku e Miyagi, com o somatório das produções totalizando a marca de 1 milhão de baterias por ano. Um fato muito importante para a pesquisa desenvolvida é que a Toyota e a PEVE não oferecem a possibilidade de compra de módulos individuais das baterias por reparadores ou clientes, ou seja, em concessionárias é vendido apenas o conjunto completo da bateria (*pack*). Com isso, não existe a possibilidade de compra de módulos de bateria novos e originais para substituição.

As baterias de alta tensão de Ni-MH do sistema híbrido são compostas por 28 módulos individuais de 7,2 V (nominal) cada, conectados em série, e cada módulo unitário é formado por 6 células internas de 1,2 V.

Os módulos individuais são do tipo prismático e se encontram montados lado a lado no veículo. Estes componentes possuem alguns dispositivos de segurança, tais como: local para encaixe padrão do sensor de monitoramento de temperatura (são distribuídos 3 ao longo do *pack*) e válvula de alívio de pressão que serve como medida de emergência para aliviar a pressão caso a geração de gás oxigênio no interior do componente seja demasiadamente alta ao ponto que coloque em risco a integridade física do dispositivo. A Figura 8 apresenta o módulo individual de bateria de um veículo, Toyota Prius de terceira geração.

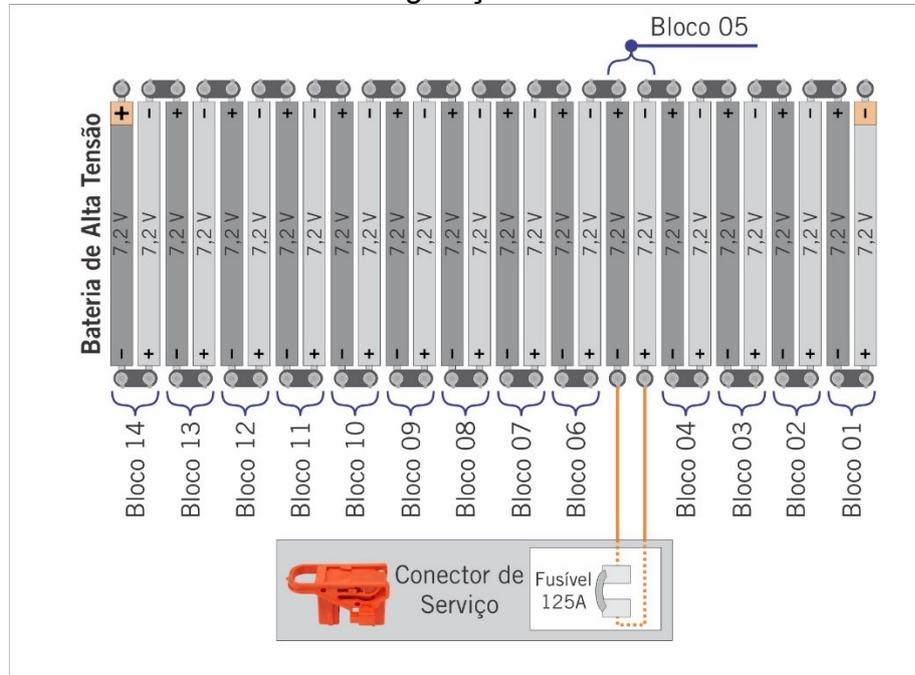
Figura 8 - Morfologia do módulo individual da bateria do veículo Toyota Prius de terceira geração ano 2013.



Fonte: O Autor.

A montagem em série é demonstrada no esquema de ligação da Figura 9, que apresenta também o conceito de blocos, que nada mais é que um conjunto de dois módulos. Este conceito é utilizado pelo software de gerenciamento do veículo que mede as tensões a cada grupo de dois módulos. O conjunto completo totaliza 201,6 V (nominal) e é apresentado na Figura 10.

Figura 9 - Esquema de ligação do pack de baterias do Toyota Prius de terceira geração.



Fonte: O Autor.

Figura 10 - Pack de baterias do veículo Toyota Corolla Cross 2022 sem a tampa superior.



Fonte: O Autor.

3.4 TÉCNICAS DE CARREGAMENTO E PERFIS DE DESCARGA DE BATERIAS À BASE DE NÍQUEL

Um conceito muito importante e de grande influência para as características de carga e descarga de baterias é o parâmetro *C-Rate*. Este parâmetro indica a relação entre a corrente de carga ou descarga, relacionando-a ao valor nominal de capacidade da bateria caso uma bateria de 6,5 Ah de capacidade tiver *C-Rate* = 1 C, o valor de corrente será 6,5 A. Em outras palavras, esta bateria teria sua carga completamente drenada em 1 hora. Como outro exemplo, pode ser caso essa mesma bateria fosse descarregada em 0,5 C, a corrente de descarga seria 3,25 A e levaria 2 horas.

Segundo Linden e Reddy (2011), matematicamente, a corrente de descarga relacionada ao *C-Rate* pode ser expressa pela equação (6):

$$I = MC \text{ (6)}$$

Sendo:

I = Corrente de descarga, expresso em Ampères (A).

C = Valor da capacidade nominal da bateria, expresso em Ampère Hora (Ah)

M = Valor múltiplo ou uma fração do valor de C (*C-Rate*).

3.4.1 Técnicas de carregamento

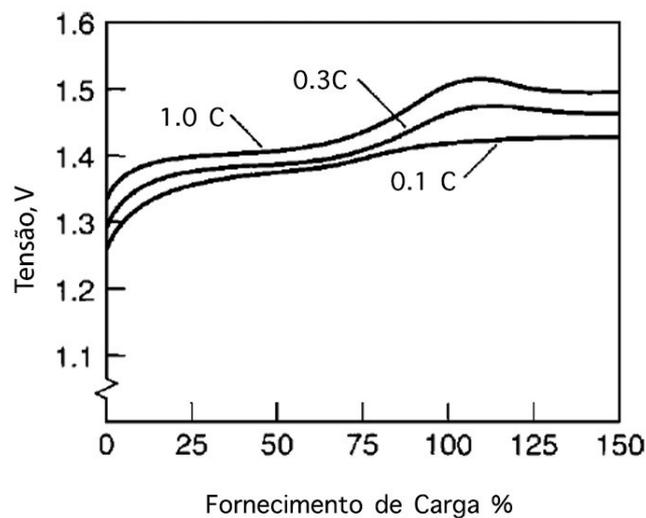
Segundo Linden e Reddy (2011) o procedimento de carregamento de baterias é o processo de reestabelecer a energia que foi descarregada. Para isso existem diferentes formas de executar o mesmo processo. Os principais critérios para uma recarga bem sucedida são:

- devolver a capacidade máxima atual da bateria;
- evitar sobrecarga;
- evitar temperaturas excessivas.

As baterias de Níquel Hidreto Metálico têm características de carregamento muito similares às baterias de Níquel Cádmio, diferenciando-se apenas pelo fato de as baterias de Ni-MH serem mais sensíveis a superaquecimentos.

Os perfis de carregamento de baterias de Ni-MH possuem curvas que dependem da taxa de carregamento C-Rate utilizada, sendo observados maiores níveis de tensão e maiores quedas de tensão ao final de carregamento (quando entrada de carga chega próximo a 100%) quando utilizadas taxas de carregamento maiores. A Figura 11 apresenta o perfil de carregamento de uma célula de bateria cilíndrica de Ni-MH exposta a diferentes taxas de carregamento (LINDEN; REDDY, 2011).

Figura 11 - Curva de tensões e entrada de carregamento durante o carregamento característico de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo “cilíndrico”.

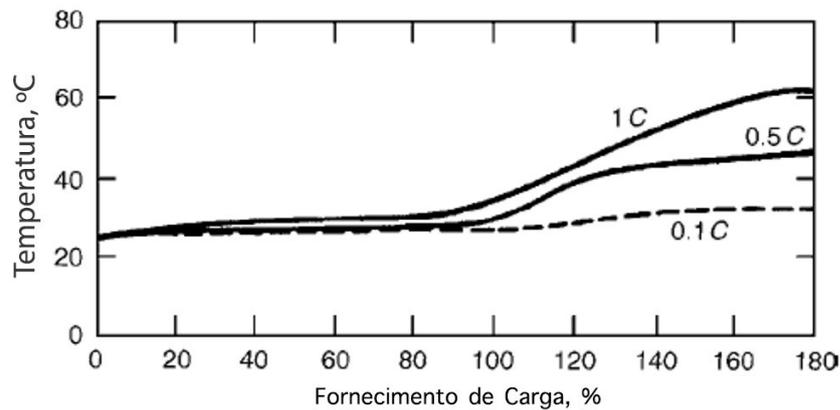


Fonte: LINDEN; REDDY, 2011 (Adaptado).

Na Figura 11 e Figura 12, a entrada de carga simboliza o percentual da capacidade de carga em Ah da bateria que foi fornecida pelo carregador e este valor pode ultrapassar o valor máximo da capacidade da bateria, pois no processo de carregamento existem perdas energéticas nos processos envolvidos, como maior

exemplo, o calor gerado, que pode ser evidenciado em forma de aumento de temperatura.

Figura 12 - Perfil de temperatura e entrada de carregamento durante o carregamento característico de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo “cilíndrico”.



Fonte: LINDEN; REDDY, 2011 (Adaptado).

Avaliando as principais características mencionadas nas curvas de carregamento das baterias de Ni-MH, são perceptíveis alguns elementos importantes que devem ser observados por equipamentos de recarga (carregadores), tais como:

- variação negativa de tensão: do inglês *Negative Delta Voltage* ou apenas *Voltage Drop*, este conceito representa a queda de tensão característica que ocorre quando a entrada de carga ultrapassa 100% do valor nominal da bateria e é menor quanto menor for a taxa de carregamento *C-Rate*, sendo dificilmente detectável por carregadores quando as taxas de carregamento são menores do que 0,5 C (MICHELINI, 2017);
- platô de tensão: termo que vem do inglês *Voltage Plateau*, demonstra a característica da tensão se assentar por um longo período em um valor fixo. Esta condição é observada, principalmente quando a taxa de carregamento é baixa o suficiente para que não seja gerada a variação negativa da tensão (LINDEN; REDDY, 2011);

- temperatura de corte: simboliza a temperatura máxima da bateria durante a recarga (*TCO*, do inglês *temperature cutoff*), para que seja cessado o processo de carregamento sem que sejam colocados em risco a integridade e o desempenho da bateria. Outros métodos relacionados à observância da temperatura também são possíveis, como os métodos que avaliam a variação de temperatura em relação à temperatura inicial e à taxa de aumento de temperatura pelo tempo. Entretanto, é válido salientar que a observação da temperatura é bastante influenciada pela temperatura ambiente (LINDEN; REDDY, 2011).

Os principais métodos de carregamento aplicados são:

- carregamento lento: este método é um dos mais fáceis de serem implementados e é utilizado por uma grande gama de carregadores mais simples, pois seu funcionamento consiste em aplicar um baixo nível de corrente, na ordem de 0,1 C, e terminar o carregamento após oferecido pelo carregador 150% da capacidade da bateria (feito por meio do tempo). A faixa de temperatura durante a recarga deve estar entre 15 °C a 30 °C. A grande desvantagem desse método é o tempo prolongado que o processo de carga pode levar até 15 h (LINDEN; REDDY, 2011);
- carregamento rápido: segundo Linden e Reddy (2001), o carregamento rápido (do inglês *quick charge*) leva de 4 a 5 horas para carregar completamente a bateria a uma taxa de 0,3 C por um tempo para que seja oferecido aproximadamente 150% da capacidade nominal da bateria pelo carregador. Além do sistema para terminar o carregamento por tempo, é necessário que seja implementado o sistema de corte por limite de temperatura (*temperature cutoff*) para que se evite danos permanentes às células. A temperatura máxima deve ser em torno de 55 °C a 60 °C;
- carregamento ultra rápido: este método de carregamento, de acordo com Linden e Reddy (2001), consiste no carregamento utilizando de 0,5 C a 1 C. Neste método, cessar o carregamento por tempo é inadequado e pode

danificar as células por sobrecarga e geração excessiva de gases (a geração de gás hidrogênio e oxigênio provoca o efeito conhecido como *venting*, que pode resultar na perda de gases pela célula por excesso de pressão, gerando redução do material de reação e causando um dano irreversível). Neste método, as características mais proeminentes durante a carga são a variação negativa de tensão (*voltage drop*) e aumento de temperatura para indicar o final de carga. Usualmente, os valores de *voltage drop* ficam por volta de 10 mV a 15 mV por célula a um *C-rate* de 1 C e 60 °C para a temperatura de corte *TCO*.

É possível concluir que quanto mais rápido se deseja fazer o carregamento, mais sofisticado deve ser o carregador utilizado. Existem, também, métodos de carregamento que combinam o funcionamento dos métodos demonstrados nesta seção e conseguem aproveitar melhor os benefícios de cada um.

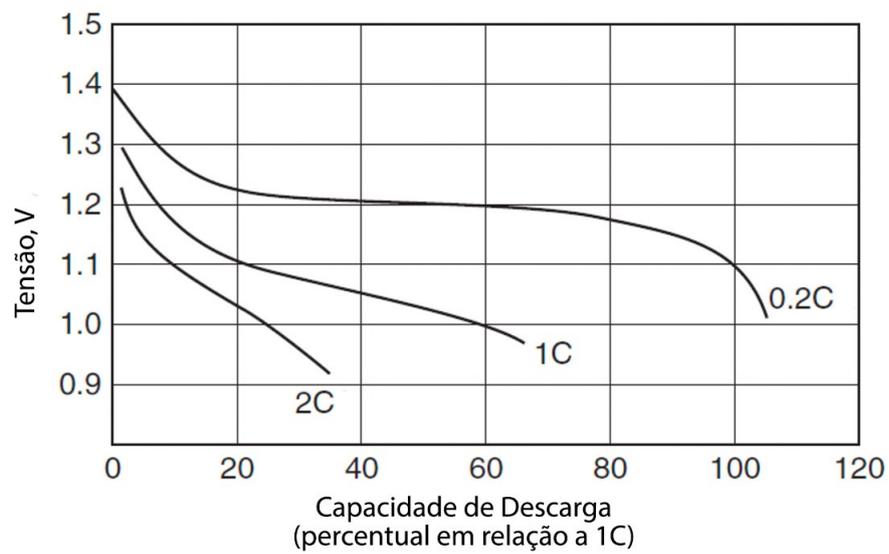
3.4.2 Perfis de descarga

As curvas características de descarregamento das células de bateria de Ni-MH variam de acordo com a taxa de descarregamento, ou *C-Rate*. Em linhas gerais, quanto maior o *C-Rate*, menor será a capacidade drenada de uma bateria. Outro fator que influencia de forma significativa o desempenho nas curvas de descarregamento é o tipo de construção de baterias que se está lidando. Baterias de Ni-MH no formato botão e cilíndricas possuem, em linhas gerais, um significativo menor desempenho quando comparadas às baterias do tipo prismática, que são os tipos aplicadas aos veículos híbridos (LINDEN; REDDY, 2011).

A Figura 13 apresenta a curva típica de descarregamento de uma bateria de Ni-MH com a construção por encapsulamento do tipo botão. É possível visualizar que com o aumento da corrente de descarga (maior *C-Rate*), tem-se uma diminuição drástica na capacidade passível de ser extraída. Um comportamento muito similar é observado para as baterias de encapsulamento cilíndrico. Este mesmo fato não é observado no gráfico da Figura 14, que apresenta a curva de descarga para uma

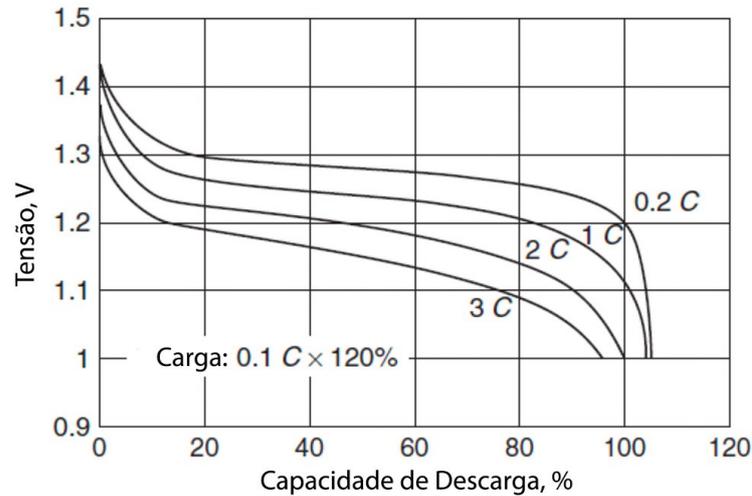
bateria com encapsulamento prismático. Neste caso, a redução da capacidade pelo aumento da corrente drenada é muito reduzida, reforçando ainda mais o alto desempenho das baterias prismáticas sob altos valores de corrente extraída das células.

Figura 13 - Curva de descarga característica de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo "Botão".



Fonte: LINDEN; REDDY, 2011 (Adaptado).

Figura 14 - Curva de descarga característica de uma bateria de Ni-MH com encapsulamento do tipo "Prismático".



Fonte: LINDEN; REDDY, 2011 (Adaptado).

3.5 RESTAURAÇÃO DE BATERIAS À BASE DE NÍQUEL

Nesta seção, o efeito memória, os métodos de restauração, como recondicionamento e exercício, e, a taxa de recuperação de baterias serão fundamentados.

3.5.1 Efeito memória nas baterias à base de níquel

Para efeitos de simplicidade, utiliza-se o termo memória para tratar da perda de capacidade em baterias reversíveis à base de níquel. Efeito memória pode ser a diminuição da capacidade de retenção de carga também conhecido como viciação da bateria. Este efeito afeta principalmente as baterias de Ni-Cd (LINDEN; REDDY, 2011).

De acordo com Buchmann (2001, p. 86),

A palavra 'memória' foi originalmente derivada de 'memória cíclica', o que significa que uma bateria pode lembrar quanta descarga foi necessária em descargas anteriores. Melhorias na tecnologia de baterias praticamente

eliminaram esse fenômeno. Testes realizados em um laboratório da Black & Decker, por exemplo, mostraram que os efeitos da memória cíclica no NiCd moderno eram tão pequenos que só podiam ser detectados com instrumentos sensíveis. Depois que a mesma bateria foi descarregada por diferentes períodos de tempo, o fenômeno da memória cíclica não pôde mais ser percebido (BUCHMANN, 2001).

Sendo assim, não há um problema relacionado à memória cíclica de baterias à base de níquel. Porém, os efeitos de formação cristalina resultantes e outros fatores envolvidos podem causar a degeneração da bateria. No entanto, quando as baterias de Ni-MH começaram a ser introduzidas no mercado, houve muita publicidade sobre serem livres do efeito memória, o que gerou um mito que, hoje, sabe-se que não é verdade. As baterias de Ni-MH também sofrem do efeito memória, mas em menor grau que, por exemplo, uma bateria Ni-Cd (BUCHMANN, 2001).

Michelini (2017, p. 152) afirma que "nenhuma pesquisa científica está disponível que compare NiMh e NiCd em termos de degradação de memória". Contudo, traz uma explicação não científica do por que a bateria de Ni-Cd pode ser mais propensa ao efeito memória de que a bateria de Ni-MH. Afirma que apesar de a placa de níquel positiva ser responsável pela formação cristalina e estar presente em ambos os tipos de baterias, no caso das baterias de Ni-Cd também há formação de cristais na placa negativa de cádmio. Portanto, ambas as placas são afetadas pela formação cristalina, porém a bateria de Ni-MH em um grau menor.

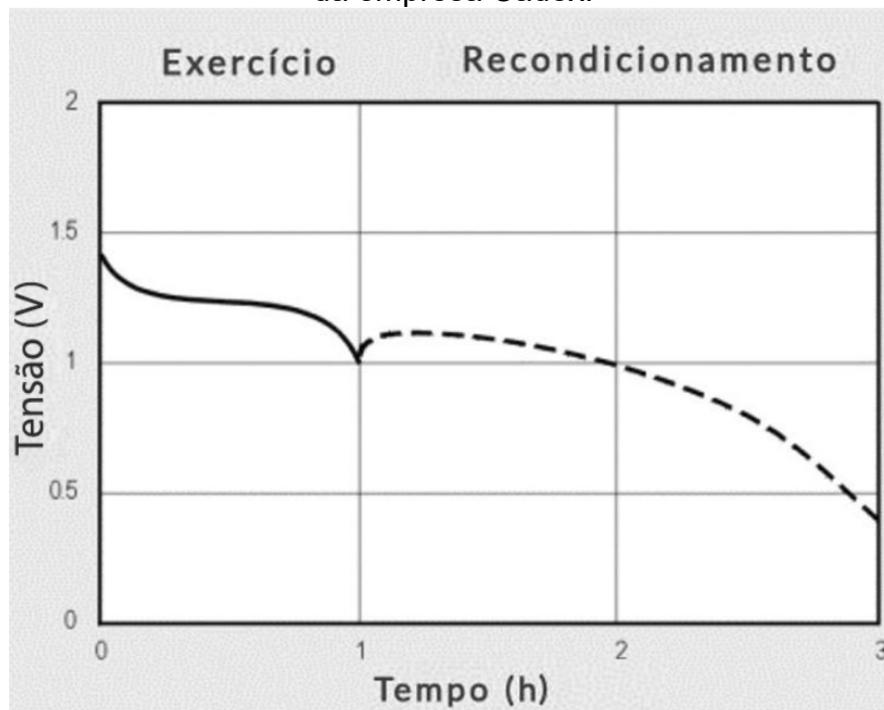
Os efeitos da formação cristalina são mais nítidos se uma bateria à base de níquel for deixada no carregador por dias ou se for repetidamente recarregada sem uma descarga completa periódica. Portanto, tem-se os métodos de prolongamento da vida da bateria ou de restauração chamados de exercício e recondicionamento (MICHELINI, 2017).

3.5.2 Métodos de restauração: recondicionamento e exercício

Linden e Reddy (2001) tratam o recondicionamento e o exercício como a restauração das características elétricas das baterias. De forma mais específica,

Michelini (2017) define exercício como uma descarga periódica de 1 V por célula, que pode ser essencial para prevenir a criação da formação cristalina nas placas da célula. Já Buchmann (2001) define que recondicionamento consiste em uma descarga para 1 V/célula em uma corrente de carga de 1 C, seguida por uma descarga secundária para 0,4 V em uma corrente muito reduzida. Ambos os métodos são ilustrados na Figura 15.

Figura 15 - Exercício e recondicionamento de baterias em um analisador de bateria da empresa Cadex.

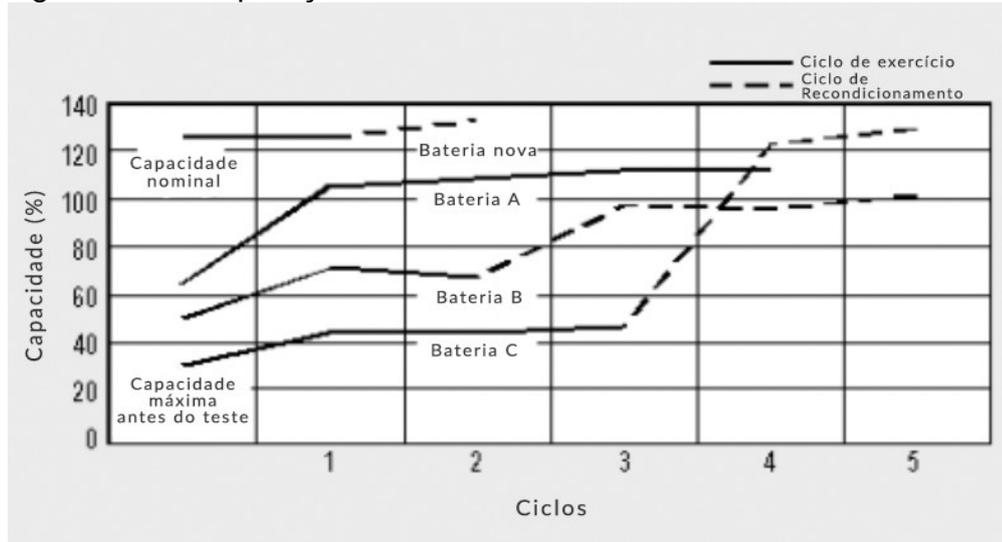


Fonte: Buchmann, 2001 (Adaptado).

Para a compreensão dos efeitos do exercício e do recondicionamento, Buchmann (2001) analisa quatro baterias à base de níquel com efeito memória de diferentes graus. Neste cenário, primeiramente, as baterias são totalmente carregadas e depois descarregadas 1 V/célula. As capacidades são mostradas na primeira coluna do gráfico mostrado na Figura 16. Ciclos adicionais de descarga/carga são aplicados e as capacidades da bateria são plotadas nas colunas seguintes. A linha contínua representa o exercício (descarga para 1 V/célula) e a linha pontilhada representa o recondicionamento (descarga secundária em corrente reduzida para 0,4 V/célula). Os

ciclos de exercício e recondicionamento são aplicados manualmente a critério do técnico de pesquisa desse teste.

Figura 16 - Comparação dos efeitos do exercício e recondicionamento.



Fonte: Buchmann, 2001 (Adaptado).

Pela Figura 16, percebe-se que a bateria A teve sua capacidade melhorada apenas no exercício e nenhum recondicionamento foi necessário. Vale mencionar que este tipo de resultado é típico de baterias que estão em serviço há poucos meses ou que receberam ciclos de exercício periódicos. Já as baterias B e C precisaram do recondicionamento para a restauração do seu desempenho. Aliás, se não houvesse o recondicionamento, ambas as baterias seriam substituídas.

O mais interessante do estudo de Buchmann (2001) é que, após os exercícios e recondicionamentos, as baterias retornaram a campo em seu uso total. Após seis meses, uma nova análise foi feita e não se identificou nenhuma degradação perceptível no desempenho restaurado. Por fim, concluiu-se que a capacidade foi recuperada permanentemente, sem evidência de retorno ao estado anterior, considerando uma manutenção regular para que o desempenho fosse mantido.

Vale mencionar que também houve a aplicação de exercício e recondicionamento em uma bateria nova, ilustrada também na Figura 16. O resultado é de uma capacidade ligeiramente aumentada. Contudo, não há uma compreensão

defendida acerca do assunto. Aliás, uma bateria restaurada com métodos de exercício e condicionamento pode funcionar tão bem quanto uma nova. A quebra da formação cristalina pode ser considerada uma restauração completa. No entanto, a formação cristalina voltará a ocorrer com o tempo se a manutenção necessária não for realizada (BUCHMANN, 2001).

Para finalizar, Buchmann (2001) comenta que outros métodos de restauração ou métodos para prolongar as baterias recarregáveis já testados produziram resultados decepcionantes sem nenhuma evidência científica de melhoria de desempenho das baterias.

3.5.3 Taxa de recuperação de baterias

Nem todas as baterias respondem igualmente ao exercício e condicionamento. A taxa de recuperação de uma bateria após aplicação de ciclos controlados de descarga/carga varia de acordo com o tipo químico da bateria, contagem de ciclos, práticas de manutenção e tempo de uso da bateria.

Os melhores resultados de taxa de recuperação de baterias à base de níquel foram obtidos com a bateria de Ni-Cd, i.e., 60% a 70% das baterias de Ni-Cd descartadas podem ser restauradas ao usar os métodos de exercício e condicionamento de um dispositivo Cadex ou equivalente.

Já a taxa de recuperação das baterias de Ni-MH é de aproximadamente 40%, que é uma taxa menor do que as baterias de Ni-Cd. Essa taxa menor pode ser explicada por causa de um menor ciclo de vida após aplicação de ciclos controlados de descarga/carga quando se trata das baterias de Ni-MH em comparação com as baterias de Ni-Cd. Por exemplo, algumas baterias de Ni-MH podem ser mais afetadas por danos irreversíveis causados pelo calor durante um carregamento que não pode ser corrigido ou até mesmo pelo armazenamento prolongado em temperaturas elevadas (BUCHMANN, 2001).

4 REQUISITOS DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS

Nesta sessão serão apresentados os requisitos esperados para o equipamento de ensaios, que serviram de guia para o desenvolvimento do dispositivo final.

4.1 REQUISITOS GERAIS

Os requisitos gerais do equipamento englobam a concepção de um dispositivo de ensaio de módulos individuais de bateria de Ni-MH que seja capaz de prover ensaios padronizados, ter a função de apresentar o tempo de descarregamento durante o ensaio e que tenha características facilmente replicáveis por reparadores, caso seja desejado refazer os testes manualmente.

O dispositivo deve ser capaz de executar o carregamento completo de um módulo de bateria, utilizando alguns dos métodos de parada de carregamento de baterias de Ni-MH discutidos na fundamentação teórica deste documento. Após o carregamento, deve ter a funcionalidade de aplicar uma carga consumidora, com o objetivo de drenar corrente do módulo ensaiado, enquanto as grandezas: tempo, tensão e corrente média são avaliadas. Após o teste, deve ser possível analisar indiretamente a capacidade extraída de cada módulo, de forma a categoriza-los posteriormente, para que se identifique módulos defeituosos. O equipamento também servirá para fazer a avaliação da eficácia de alguns métodos de recondicionamento que foram apresentados na fundamentação teórica deste documento.

Outro recurso importante é a apresentação dos dados ao usuário durante os ensaios, de forma que seja possível saber qual procedimento está sendo executado no momento, qual a corrente atual e tensão do módulo de bateria ensaiado. Além disso, o equipamento deve ser capaz de apresentar os resultados do teste ao final da rotina de ensaio.

Além dos requisitos apresentados, os ensaios não devem ter tempo muito prolongado, pois, caso fossem, não teriam replicação viável no dia-a-dia de oficinas. Um exemplo seria o caso da aplicação do método de carregamento lento, apresentado na sessão de fundamentação teórica, que poderia despender até 15h somente na

etapa de carregamento de um módulo, sendo a aplicação deste, completamente inviável.

4.2 REQUISITOS ESPECÍFICOS

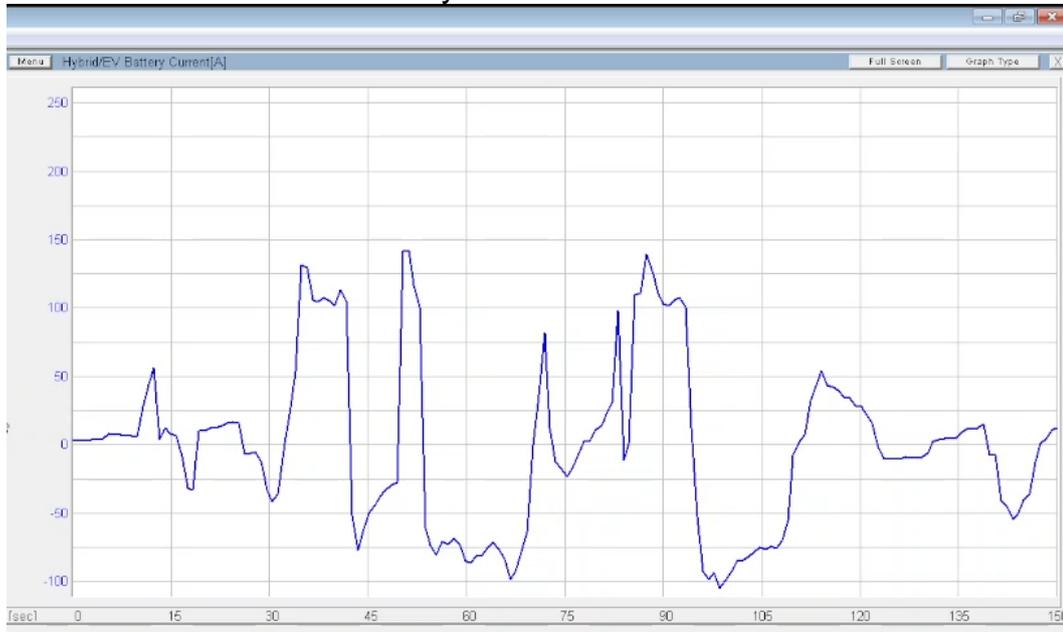
Os requisitos específicos foram definidos com base nos valores de grandeza encontrados no veículo, pois a grande maioria das literaturas referentes à baterias de Níquel Hidreto Metálico abordam principalmente baterias aplicadas a dispositivos de radiocomunicação e telefonia, que geralmente possuem um perfil de descarregamento mais suave e que drenam carga sem tanta exigência em termos de valores nominais de corrente. Com isso, foi especificado que o equipamento deveria trazer valores mais coerentes com o cenário de funcionamento de um veículo híbrido.

4.2.1 Correntes de carga e descarga

Para que fosse definido a corrente de carregamento e descarregamento a ser utilizada no projeto, foram avaliados os níveis de corrente observados no *pack* de baterias de um veículo quando em operação. Para isso foi feita a utilização do scanner *Tech Stream* (original da montadora Toyota) conectado via porta OBD (do inglês *On-Board Diagnostics*) do veículo.

A Figura 17 apresenta os perfis de corrente, tanto de carga, quanto de descarga observadas em acelerações moderadas, buscas e também frenagens regenerativas em um percurso urbano.

Figura 17 - Perfis das correntes observados em campo no veículo Corolla Cross Hybrid ano 2022.



Fonte: O Autor.

Observando os valores encontrados em campo, é possível verificar correntes drenadas de até 150 A em acelerações bruscas e regeneradas até 110 A durante frenagens regenerativas, correspondendo a um *C-rate* de aproximadamente 23C e 17C respectivamente, no entanto, devemos considerar que as baterias não são submetidas constantemente a esses valores de pico, com isso, foi considerado um valor de aproximadamente 10% do valor máximo observado para a descarga, que equivale a aproximadamente 2C.

O valor da corrente de descarga foi definido considerando a análise demonstrada e também a viabilidade da aplicação de uma carga que seja facilmente replicável. Para a corrente de carregamento, observa-se que o maior valor de carregamento constante definido como seguro na fundamentação teórica fica em torno de 1C, no caso 6,5 A para as baterias utilizadas, porém foi adotado um valor de 3 A, inferior a este, devido às limitações da fonte de bancada empregada no projeto.

Mais detalhes sobre as soluções adotadas para atender os requisitos de corrente de descarregamento serão abordadas na sessão seguinte que tratará da descrição do equipamento de ensaios desenvolvido.

4.2.2 Métodos de parada de carregamento

Como demonstrado na fundamentação teórica, as baterias de Ni-MH exigem em seu carregamento a implementação de métodos de parada a fim de evitar sobrecarga e danos irreversíveis às células. Quanto maior for a corrente de carregamento, mais sofisticados devem ser os métodos de detecção de fim de carga.

Como o objetivo do projeto é avaliar baterias para possibilitar o levantamento de informações sobre reparação, de forma que os ensaios procurem trazer parâmetros mais condizentes com o cenário de operação, deve-se então, ser adotado o carregamento rápido, porém, que ofereça o mínimo risco de danos à integridade dos módulos por sobrecarga, pois a geração de danos durante o carregamento poderia resultar na descaracterização dos resultados dos ensaios.

Para possibilitar a aplicação de métodos de parada que garantam a integridade das baterias é necessário que o dispositivo tenha sensoriamento de tensão, temperatura e contagem do tempo, além de possibilitar o desligamento do processo de carregamento quando atingido um ou mais critérios de parada.

Os métodos de parada adotados para o projeto foram baseados nos apresentados na fundamentação teórica e os valores limites foram escolhidos seguindo uma abordagem mais conservadora, para que as baterias não sejam danificadas durante o carregamento.

Os métodos implementados foram: Variação Negativa de Tensão (do inglês *Delta Voltage* DV); Temperatura de Corte (do inglês *Temperature Cutoff* TCO), e também foi implementado o método que garante parada de carregamento caso nenhum dos métodos anteriores sejam verificados e a fonte tenha fornecido 150% da capacidade nominal da bateria, ou seja, para os módulos com capacidade 6,5 Ah utilizados, o dispositivo cessaria o carregamento caso a fonte forneça 9,75 Ah. Como a fonte utilizada fornece 3 A durante o carregamento, o dispositivo deve encerrar o carregamento em um tempo de 3,25 h. O valor de TCO definido foi 40 °C e o valor de DV foi de 0,03 V, ou seja 5 mV/Célula. A tensão limite de carregamento foi definida em 9 V, ou 1,5 V/Célula segundo fundamentado.

4.2.3 Avaliação da capacidade do módulo

Uma funcionalidade muito importante que o dispositivo deve ser capaz de realizar é calcular a corrente média e tempo durante o processo de descarregamento de um módulo individual da bateria. Informando ao usuário estes valores, é possível facilmente calcular a capacidade drenada da bateria durante o ensaio.

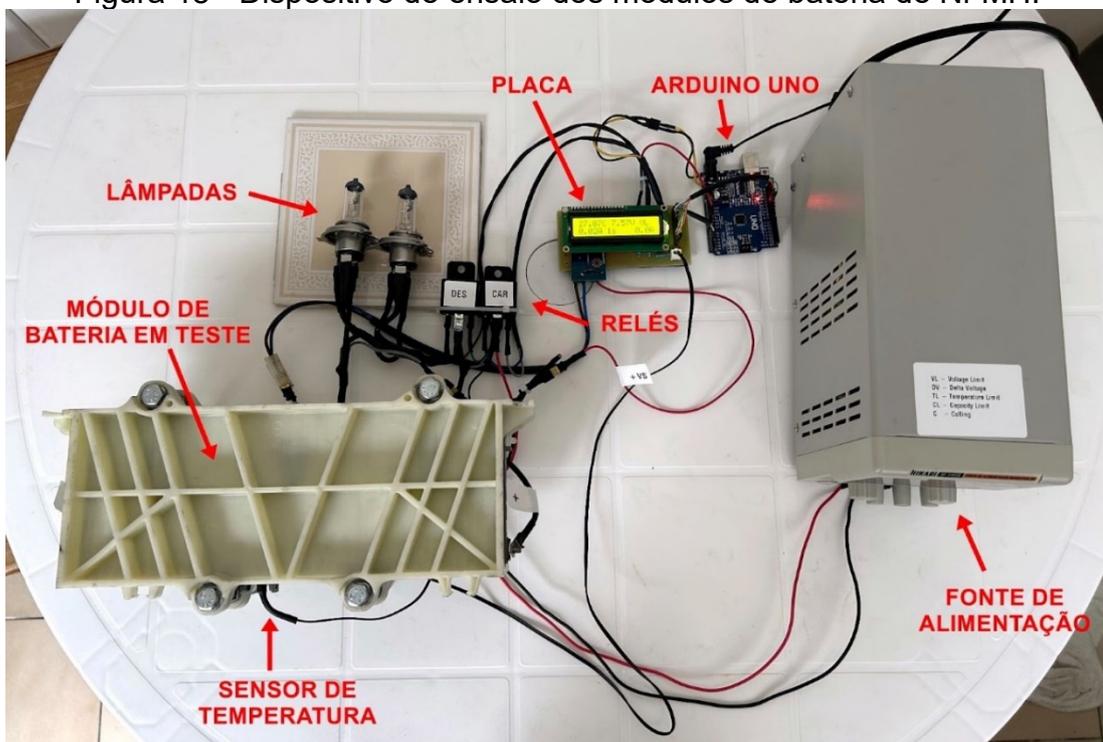
5 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DESENVOLVIDO

Neste capítulo serão apresentadas as características do hardware do equipamento de realização de ensaios dos módulos de bateria desenvolvido, mostrando brevemente a justificativa para a escolha de dispositivos, como: placa de prototipagem microcontrolada, transistores, sensores, fontes, relés, carga, dentre outros. Além disso, as soluções gerais em termos de software aqui também serão detalhadas.

5.1 EQUIPAMENTO FUNCIONAL

Como um dos principais resultados principais esperados no desenvolvimento do projeto, foi obtido o equipamento para avaliação de módulos de bateria de Ni-MH. Os componentes do dispositivo e montagem final são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Dispositivo de ensaio dos módulos de bateria de Ni-MH.



Fonte: O autor.

O funcionamento do dispositivo segue a seguinte lógica: ao ligar o dispositivo, o carregamento do módulo é iniciado através do acoplamento via relé da fonte de bancada pré-ajustada e o LED verde da placa se acende indicando que a rotina de carregamento está ativa. Durante todos os processos desempenhados pelo equipamento, os valores de tensão e corrente são atualizados a cada segundo no display.

Após o carregamento identificado por algum dos métodos de parada implementados, é apresentado no display a sigla referente a qual foi o método de parada detectado e caso o módulo esteja com a temperatura mais alta que 35 °C é esperado até que a temperatura atinja um valor menor ou igual a 35 °C, e enquanto esta condição não ocorra é mostrado no canto direito do display a letra “C” indicando que o dispositivo está esperando a bateria esfriar. No momento em que a bateria atinge a condição esperada de temperatura, é iniciado o processo de descarregamento e o LED vermelho se acende.

O processo de descarregamento ocorre até que a tensão da bateria atinja 6 V (1 V/Célula). Quando esta condição é atendida, o procedimento de descarregamento é encerrado, o LED vermelho se apaga e as principais informações coletadas durante o ensaio são apresentadas ao usuário (Figura 19), dentre essas temos o tempo total da duração do descarregamento e a informação de corrente média calculada durante a descarga (dados a partir dos quais é possível calcular a capacidade extraída da bateria). Outra informação mostrada é a sigla referente ao método de parada que foi constatado pelo controlador, podendo ser:

- VL – Limite de Tensão (do inglês *voltage limit*).
- DV – Variação Negativa de Tensão (do inglês *delta voltage*).
- TL – Limite de Temperatura (do inglês *temperature limit*).
- CL – Limite Capacidade (do inglês *capacity limit*).

A Tabela 1 demonstra de forma facilitada as condições esperadas para detecção de cada um dos critérios de parada adotados.

Tabela 1 - Condições para detecção dos critérios de parada de carregamento adotadas.

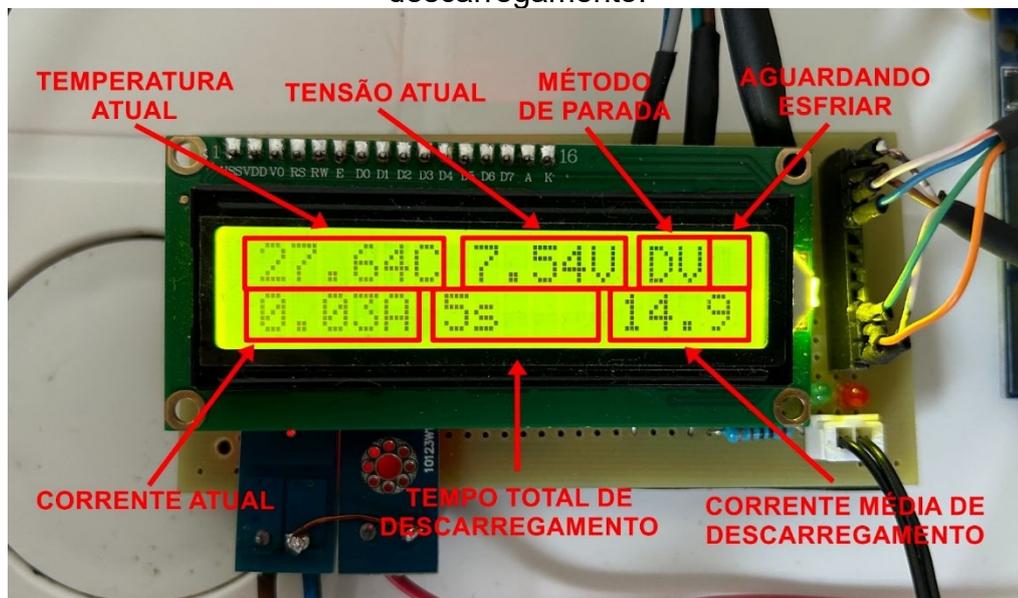
VL	Tensão ≥ 9 V.
DV	Varição negativa de tensão ≥ 30 mV.
TL	Temperatura ≥ 40 °C.
CL	Tempo de carregamento $\geq 3,25$ h.

Fonte: O Autor.

Além disso, os dados de temperatura, corrente e tensão, continuam sendo exibidos no display e atualizados a cada 1 s ao final do ensaio.

A Figura 19 apresenta a forma como as informações são apresentadas ao usuário após a finalização do ensaio de um módulo de bateria.

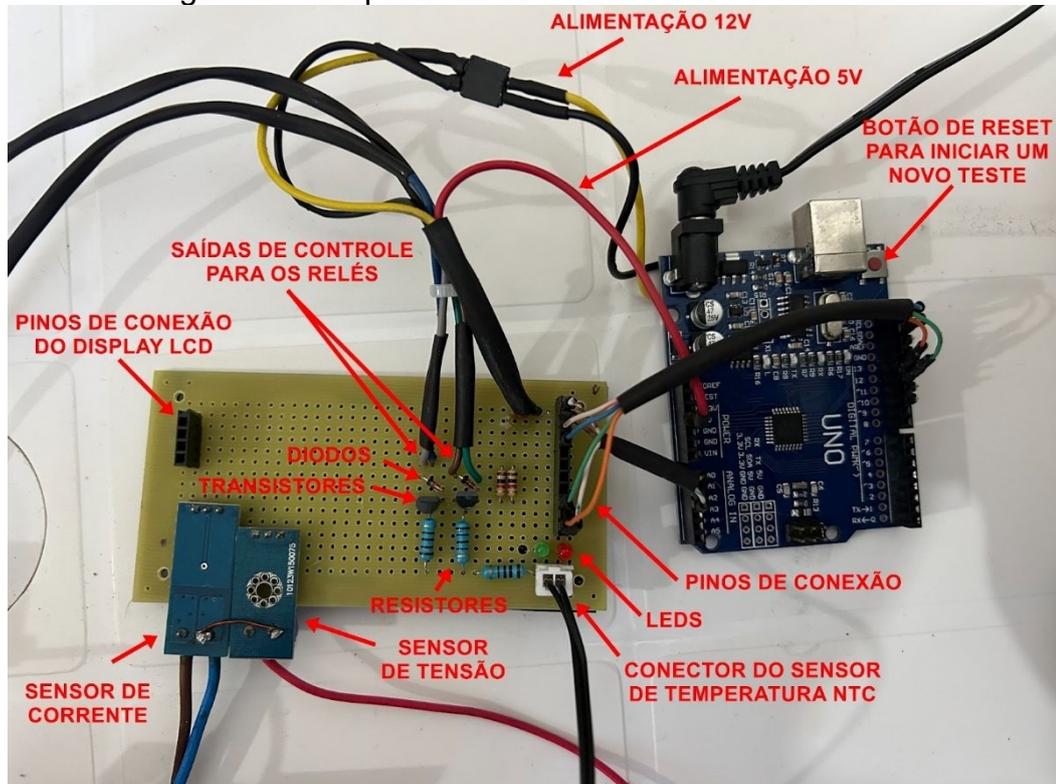
Figura 19 - Informações apresentadas no display após um ciclo de carregamento e descarregamento.



Fonte: O Autor.

A Figura 20 apresenta em maiores detalhes os dispositivos de controle e sensoriamento do equipamento. Na vista apresentada, o display LCD foi removido com a finalidade de deixar aparente os dispositivos da placa. Os componentes utilizados serão detalhados a seguir.

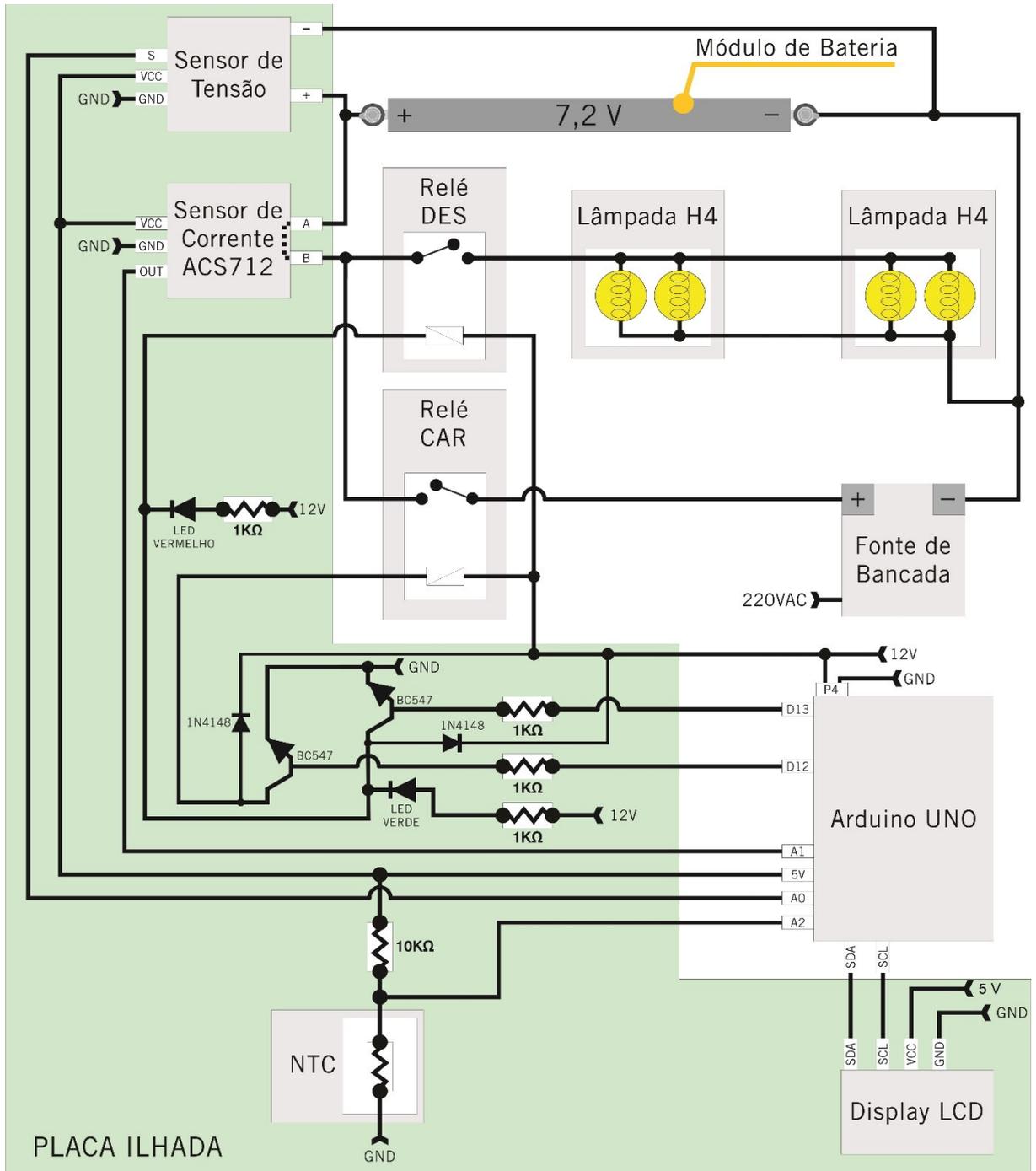
Figura 20 - Dispositivos de controle e sensoriamento.



Fonte: O Autor.

O diagrama elétrico completo do dispositivo pode ser visualizado na Figura 21, incluindo os dispositivos de carregamento, descarregamento, controle e sensoriamento. Os nomes dos componentes “Relé DES” e “Relé CAR” se referem aos relés de carga e descarga, respectivamente.

Figura 21 - Diagrama elétrico completo do equipamento de ensaio de módulos de baterias.



Fonte: O Autor.

5.2 HARDWARE

Neste item serão detalhados os aspectos do hardware do equipamento de ensaio dos módulos das baterias, apresentando os motivos pelos quais foram escolhidos cada componente que compõem o protótipo final.

Os componentes eletrônicos foram montados em placa ilhada com a finalidade de realizar uma montagem mais objetiva, modular e de baixo custo. De forma a concentrar os sensores e dispositivos eletrônicos em uma única placa, enquanto os relés, fonte de bancada e carga ficassem externos.

5.2.1 Alimentação dos dispositivos

A alimentação dos dispositivos de controle e atuação do equipamento é fornecida através de uma fonte de tensão 12 V e corrente 2 A, enquanto os componentes que operam em nível de tensão 5 V são alimentados pelo regulador de tensão interno do Arduino UNO, que regula a tensão de entrada da fonte principal (12 V) para o nível de tensão desejado (5 V). Os componentes que recebem alimentação de 5 V, são: sensor de temperatura, sensor de corrente, sensor de tensão e display LCD.

O fato dos relés automotivos selecionados para o projeto operarem em tensão de 12 V e possuírem um consumo considerável de corrente (da ordem de 95 mA cada), e levando em conta que segundo o *datasheet* do Arduino UNO, os pinos de saída da placa (como é o caso do pino Vin, que dá acesso a alimentação da fonte de 12 V) suportarem apenas 40 mA de forma segura, foi decidido obter a alimentação de 12 V para a placa ilhada diretamente da junção do conector P4 da entrada de alimentação do Arduino, evitando assim, que a corrente para os relés transite pelas trilhas internas da placa de prototipagem.

5.2.2 Microcontrolador

Para possibilitar a implementação do equipamento automatizado de testes, foi necessário a escolha de uma plataforma de prototipagem microcontrolada para

controle dos componentes de atuação e leitura dos sensores utilizados de forma que sejam atendidos os requisitos de projeto.

A placa de prototipagem com microcontrolador escolhida, foi a Arduino UNO, que utiliza o microcontrolador ATmega328 e possui portas digitais, analógicas e de comunicação suficientes para o projeto, além de possuir poder de processamento satisfatório, visto que as rotinas executadas não exigirão grandes capacidades de processamento, pois naturalmente as curvas de carregamento e descarregamento de baterias são relativamente lentas e tiveram períodos de amostragem escolhidos na ordem de 100 ms para a leitura dos sensores, e rotinas de avaliação para tomada de decisões e atualização do display a cada 1 s.

5.2.3 Carga

Como demonstrado nos requisitos do projeto, a faixa de corrente de descarregamento esperada para o equipamento foi da ordem de 2 C, com isso, durante o período de concepção do projeto foi cogitado o uso de resistores de potência, estes que apresentaram grande variação da resistência com a temperatura e a necessidade de dispositivos de dissipação de calor em testes realizados.

Contudo, a melhor solução encontrada e que foi incorporada ao equipamento final, foi o uso de lâmpadas automotivas, que possuem dois filamentos (utilizados no farol alto e baixo de automóveis). Para o projeto, foram aplicadas duas lâmpadas halógenas H4 12 V 60/55 W em paralelo, alimentando ambos os filamentos de cada. Como a tensão nominal dos módulos de bateria é 7,2 V, a potência nominal das lâmpadas não é alcançada (pois é especificada para o nível de tensão 12 V).

Na sessão dos resultados, as curvas de carregamento e descarregamento serão melhores detalhadas e será possível observar que as lâmpadas possuem baixa resistência quando os filamentos de tungstênio não estão aquecidos e por esse motivo existe um pico de corrente no início do descarregamento, característica esta que não gera efeitos negativos nos ensaios. Com a aplicação das lâmpadas automotivas como carga, as correntes médias calculadas durante os descarregamentos ficaram por volta de 13,7 A, valor este, muito próximo da corrente de 2C especificado.

5.2.4 Sensor de corrente

O sensor de corrente escolhido foi o modelo invasivo ACS712, que é baseado no princípio de efeito Hall e por isso possui o circuito de medição isolado do circuito de condução da corrente lida. A faixa de operação é de ± 20 A, sendo este dispositivo escolhido devido ao custo benefício e disponibilidade no mercado brasileiro, visto que sensores não invasivos para corrente contínua são incomuns no mercado brasileiro.

Uma questão levantada durante o dimensionamento do sensor de corrente, haja vista que a carga utilizada foi um conjunto de lâmpadas com filamento de tungstênio, que possui característica de ter baixa resistência elétrica enquanto o eletrodo não estiver aquecido (momento inicial do acoplamento da carga à bateria).

De acordo com o datasheet do sensor de corrente, uma corrente máxima de até 100 A de pico nos terminais de leitura pode ser suportada por um tempo de 250 ms durante a comutação da carga, porém a corrente de pico observada no sistema de descarregamento da bateria foi de 110 A. O tempo de 95% do pico de corrente encontrado foi de 191 ms e deste tempo, o período em que os valores de corrente ultrapassaram 100 A foi de apenas 2,5 ms.

Com a finalidade de evitar danos ao componente, seria conveniente o uso de um termistor limitador de corrente, entretanto o sistema trabalha com uma corrente de até 15 A de descarga constante e não é comum encontrar termistores que suportem uma corrente superior a 15 A em regime permanente no mercado nacional. Com isso, seria necessário importar estes componentes o que aumentaria os custos e prazo do projeto. No caso em questão, devido ao limite do sensor de corrente estar muito próximo do que se encontrou nos testes, foi decidido dar prosseguimento no desenvolvimento e aplicar algum tratamento na corrente de pico somente caso fosse observada a redução na vida útil do sensor (fato que não ocorreu com o uso).

5.2.5 Sensor de tensão

O sensor de tensão escolhido, mostrado na Figura 22, foi um modelo genérico com medição de 0 V a 25 V, que possui o princípio de funcionamento baseado em divisores de tensão e quando lido pela entrada analógica do Arduino UNO de 10 bits, consegue trabalhar com uma resolução de 0,0049 VDC.

Figura 22 - Sensor de tensão aplicado ao projeto.



Fonte: ROBOCORE TECNOLOGIA, 2022.

5.2.6 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura escolhido foi o do tipo NTC com 10 K Ohms a 25°C, do modelo 3950 com encapsulamento de sonda à prova d'água, que dentre diversas características, possui a fundamental de ter um diâmetro de 5 mm e poder ser encaixado na cavidade original do sensor de temperatura do bloco de bateria.

5.2.7 Relés e transistores

A escolha do uso de relés automotivos foi devido a disponibilidade de relés 12 V e 20 A na empresa e o fato da grande maioria dos relés 5 V mais comuns suportarem

apenas a corrente máxima de 10 A, sendo necessário partir para relés de até 30 A, o que aumentaria o custo do projeto desnecessariamente.

Devido ao fato de serem aplicados relés com tensão de ativação de 12 V, que é diferente da tensão de operação das portas analógicas do Arduino UNO (5 V), foi necessário utilizar transistores para o chaveamento da tensão de 12 V para efetuar o controle dos relés, a partir da tensão de 5 V (disponível nas saídas analógicas do Arduino UNO). Além disso, foram implementados diodos de roda livre para evitar danos aos transistores devido ao pico de tensão característico gerado nas bobinas do relé no momento em que se encerra o chaveamento.

Para dimensionar o circuito de controle do relé, foram desenvolvidos ensaios em que o relé foi atuado enquanto se observou, com o osciloscópio, a corrente que fluiu através da bobina de controle, que foi de 95 mA. Com isso, o transistor BC547 que suporta até 100 mA foi escolhido. A corrente de operação do relé ficou 95% do valor máximo permitido para o transistor e esta escolha foi feita apenas devido a disponibilidade deste componente no momento da compra, pois idealmente deveria ter sido adotado uma faixa de segurança maior.

5.2.8 Display LCD

O display LCD utilizado foi o modelo que opera com 2x16 caracteres, dotado de um módulo integrado que possibilita a operação através do protocolo de comunicação serial I2C, que permite o controle do display, apenas ocupando dois pinos do Arduino UNO (os pinos referentes ao sinal e temporização do protocolo I2C).

5.2.9 Fonte de alimentação para carregamento

A fonte de alimentação utilizada para realizar o carregamento dos módulos de bateria foi o modelo de bancada HF-3203S da fabricante Hikari, que possui faixa de operação máxima de tensão de 30 V e corrente de 3 A. Este dispositivo controla e limita a alimentação da carga, tanto por corrente, quando por tensão selecionada pelo usuário.

Para a utilização no projeto, a fonte foi pré-ajustada para o valor de tensão de 10 V (maior do que a faixa de operação dos ensaios, para que a limitação por tensão não influencie nos testes) e a corrente em 3 A. Com isso, a fonte apenas controla a corrente fornecida à carga. A avaliação de tensão e critérios de parada é função exclusiva do controlador, pois no projeto a fonte atua apenas como uma fonte de corrente passiva.

5.3 SOFTWARE

O software do dispositivo foi desenvolvido na linguagem *Wirign*, que é a linguagem nativa de programação da plataforma Arduino, uma linguagem derivada do JAVA, C e C++. O software editor de código empregado no projeto foi o Visual Studio Code, juntamente com o ambiente de desenvolvimento de software Platform IO, que oferece compatibilidade para diversas placas de prototipagem, como: Arduino, ESP32, ChipKIT, Rasberry PI, entre outras.

O processo de temporização implementado no equipamento foi feito utilizando interrupções internas por overflow do contador do Timer interno do Arduino UNO e esta solução foi adotada com a premissa de realizar uma contagem eficiente do tempo, independente dos processos de leitura de sensores ou controle de atuadores externos que estiverem sendo executados no projeto.

Para os dispositivos de leitura de tensão e corrente, bem como o Display LCD, foram empregadas algumas bibliotecas para facilitar os processos de implementação.

6 RESULTADOS E ANÁLISE

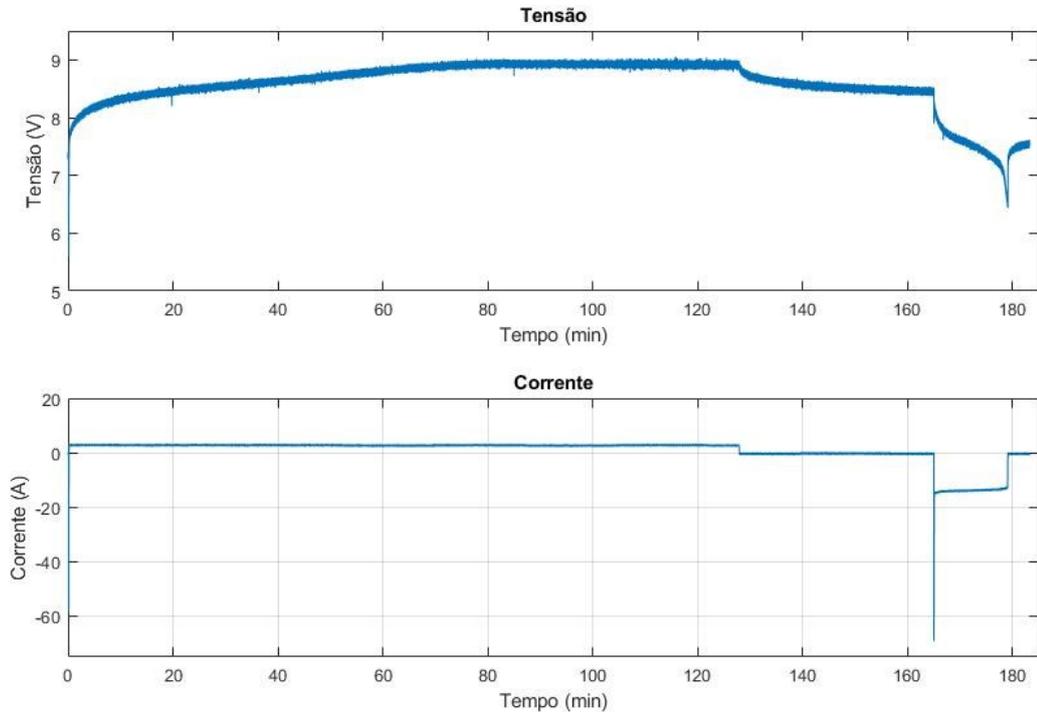
Nesta sessão, serão abordados os resultados obtidos através dos ensaios realizados utilizando o equipamento desenvolvido. O objetivo dos ensaios foi avaliar a eficácia dos métodos de recondicionamento de baterias de Ni-MH aplicados aos módulos que compõem as baterias dos veículos híbridos Toyota, além de avaliar a possibilidade de manutenção de *packs* de bateria desses veículos.

Na Figura 23 é possível verificar o comportamento da corrente e tensão durante o ensaio de carregamento e descarregamento de um módulo utilizando o equipamento de ensaios desenvolvido. É possível verificar que na primeira etapa (carregamento), na qual a fonte de tensão está acoplada ao módulo de bateria, a corrente de carregamento é controlada pela fonte e se mantém no valor constante de 3 A.

Aproximadamente, no minuto 80 do ensaio, vemos uma tendência de estabilização de tensão e do minuto 80 até 125 a tensão se mantém em leve queda, até que, após o minuto 120 é identificado pelo controlador, uma variação negativa de tensão maior ou igual a 30 mV (este foi o método de detecção de fim de carregamento identificado no ensaio apresentado). Após o minuto 125, o equipamento espera o módulo de bateria esfriar (até 35 °C) e neste momento é observado uma estabilização da tensão para o nível de 8,5 V e a corrente é inexistente durante o período de esfriamento.

A última etapa do ensaio inicia por volta do minuto 165, no qual a carga de lâmpadas é acoplada e a corrente estabiliza em aproximadamente 14 A, logo após o pico inicial. O tempo total de descarregamento durante o ensaio (descarga até a tensão de 6 V) foi de 13 min e 27 s, com uma corrente média calculada de 13,7 A, o que configura em uma capacidade extraída de 3,07 Ah, ou 47% da capacidade nominal do módulo (6,5 Ah). Os valores de capacidade serão discutidos mais adiante, relacionando-os com a apresentação de falhas no veículo.

Figura 23 - Ensaio completo de um módulo de bateria.



Fonte: O Autor.

6.1 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE RECONDICIONAMENTO

Um dos principais objetivos da pesquisa, foi validar se existe a possibilidade de recondicionar baterias de Ni-MH aplicadas em veículos híbridos, realizando ciclos de carregamento e descarregamento com a finalidade de recuperar a capacidade dos módulos, devido a teoria de que esta tecnologia de baterias é suscetível ao efeito memória, como demonstrado na sessão de fundamentação teórica.

Para validar esta hipótese foram ensaiados diversos módulos de bateria, quanto às suas capacidades. Dos mais de 20 módulos ensaiados (incluindo um módulo em estado de novo retirado de um Toyota Corolla Cross com apenas 4500 km rodados, que apresentou capacidade drenada de 6,2 Ah ou 95% da capacidade original), foram selecionados 4 destes para os testes de recondicionamento, tendo cada um, características específicas. Um deles possui valores de capacidade muito reduzida (módulo ruim) e que gera falha imediatamente quando instalado no veículo

e outros dois com capacidades próximas das encontradas em um veículo com aproximadamente 10 anos de uso (e que não geram falhas) e outro com a capacidade próxima a de um módulo novo.

6.1.1 Avaliação do método exercício

Para os 4 módulos de baterias escolhidos foram aplicados ensaios de ciclos de carregamento e descarregamento, avaliando as capacidades extraídas em cada ocasião e a porcentagem em relação à capacidade nominal do módulo, com a finalidade de verificar se são detectadas melhorias no desempenho devido a aplicação do método exercício (anteriormente detalhado na fundamentação teórica deste documento).

O resultado para os ensaios pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicação do método exercício (Capacidade extraída vs porcentagem relacionada à capacidade nominal).

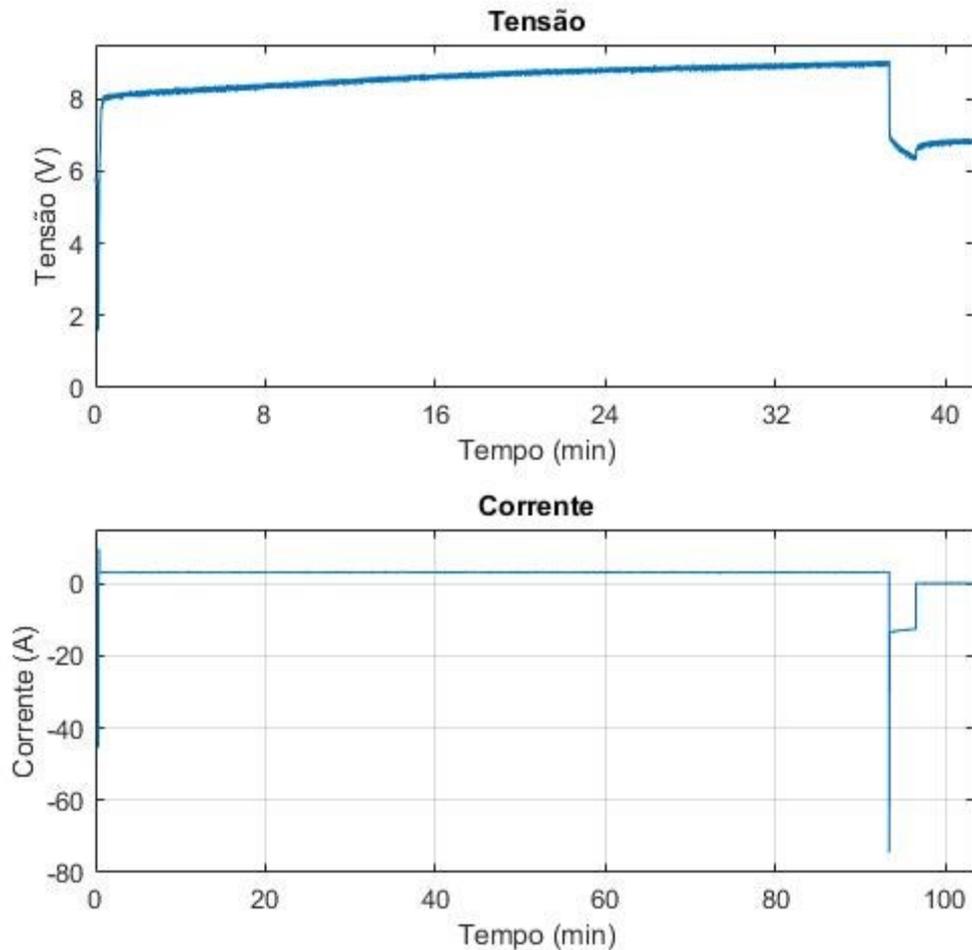
N° Módulo	1° Ciclo	2° Ciclo	3° Ciclo
01	5,7 Ah – 87%	5,58 Ah – 85%	5,65 Ah - 86%
02	0,17 Ah – 2,6%	0,13 Ah – 2%	0,12 Ah – 1,92%
03	4,2 Ah – 65%	4,01 Ah – 62%	3,95 Ah – 61%
04	3,65 Ah – 56%	3,77 Ah – 58%	3,69 Ah – 57%

Fonte: O Autor.

Os resultados obtidos mostraram que as baterias não sofreram alterações significativas na capacidade drenada após a aplicação do método exercício.

A Figura 24 apresenta a curva do primeiro ciclo do ensaio do módulo 02, para ilustrar o comportamento de um módulo com baixa capacidade em teste. É perceptível que tanto o tempo de carregamento, quando de descarregamento são bem reduzidos. A duração da etapa de descarregamento deste módulo teve apenas 45 s, na qual aproximadamente aos 37 min é iniciado o descarregamento e logo em seguida a tensão atinge 6V (Figura 24).

Figura 24 - Curva de ensaio do módulo 02.



Fonte: O Autor.

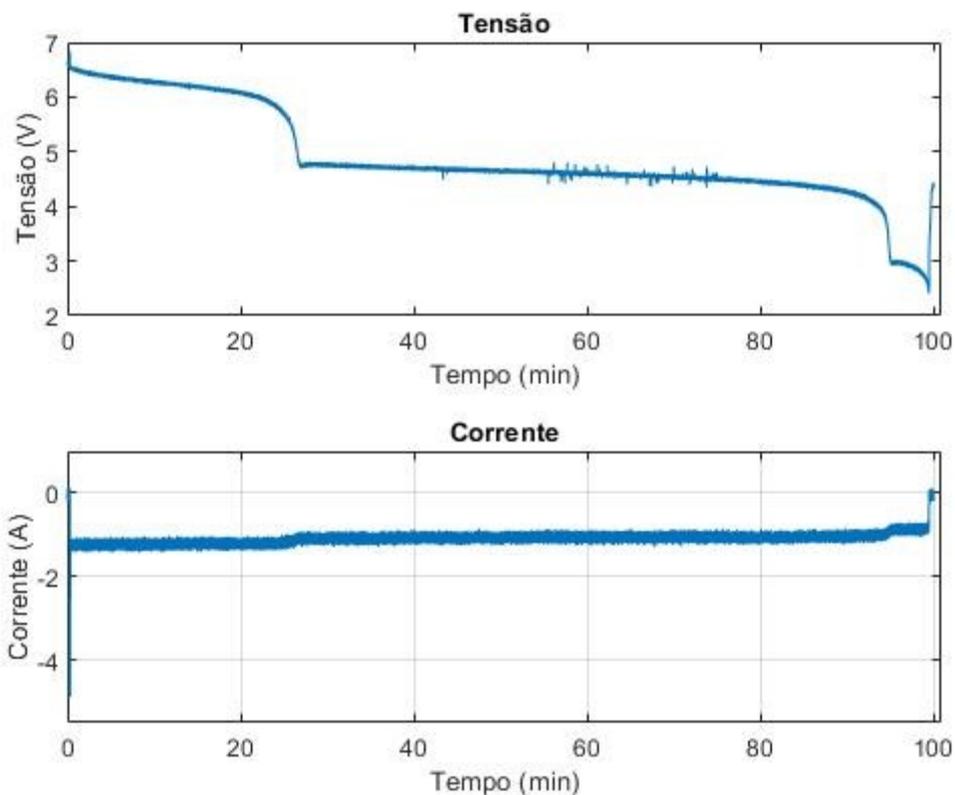
6.1.2 Avaliação do método de recondicionamento

Para desenvolver a verificação do método Recondicionamento (do inglês *reconditioning*), foram realizados ensaios em dois módulos (um com capacidade muito prejudicada e outro comparado ao encontrado em um veículo usado de aproximadamente 10 anos), para finalmente validar se é possível melhorar a capacidade das baterias. Neste método foi realizado o seguinte processo: inicialmente foi executado o descarregamento da bateria até 6 V (1 V por célula), da mesma forma que foi feito nos ensaios anteriores (na validação do método exercício). Na etapa

seguinte, a bateria foi descarregada com uma corrente mais baixa de aproximadamente $C/10$, até atingir 0,4 V por célula, de acordo com Buchmann (2001). Após isso, recarregou-se o módulo e foi avaliado se houve melhoria na capacidade total.

Para realizar o descarregamento a uma taxa de corrente muito mais reduzida, foi substituído o conjunto de lâmpadas H4 do equipamento por apenas uma lâmpada halógena com especificação 5 W em tensão 12 V, com isso, foi obtido a curva de descarga da Figura 25.

Figura 25 - Curva de descarga profunda do módulo 02.



Fonte: O Autor.

Após o processo de descarga profunda, devido a aplicação do método de condicionamento e depois submeter o módulo a um novo ensaio de capacidade padrão, não houveram melhorias significativas nas capacidades, pois partiram de 0,17 Ah no ensaio inicial, para 0,27 Ah, após a aplicação do método. É interessante

comentar que a capacidade percentual relativa à capacidade nominal deste módulo utilizado era de apenas 2,6% e passou para 4,1% (valores extremamente baixos), porém não chegando nem mesmo próximo a tornar comparáveis as características desse módulo com as de um módulo bom e que não gere falhas.

O outro módulo testado, apresentava capacidade inicial de 3,77 Ah, ou 58% da capacidade nominal e ao final do teste apresentou valores de 3,85 Ah, ou 59%. Esses resultados não demonstram mudanças significativas, ou que evitariam que um módulo deixasse de ser classificado como módulo ruim para se classificar como bom, além do que não foram realizados ensaios suficientes para categorizar alguma melhora ou piora após a aplicação do método de recuperação.

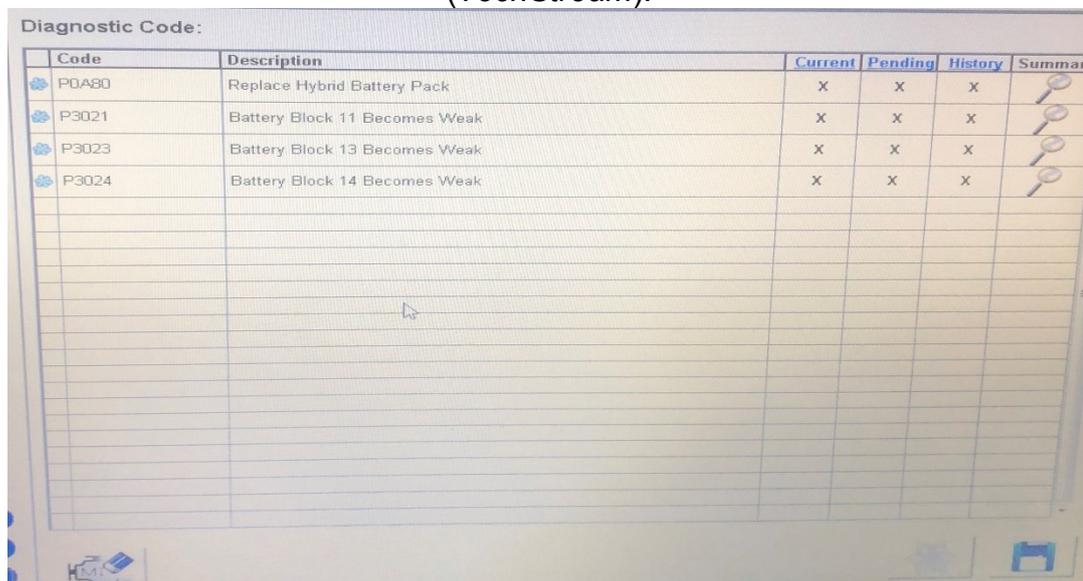
6.2 MANUTENÇÃO DE BATERIAS DE VEÍCULOS HÍBRIDOS TOYOTA ORIENTADO POR CÓDIGO DE FALHA

Nesta etapa, foi realizada uma análise com a intenção de encontrar um valor mínimo aproximado da capacidade mínima que um módulo de bateria pode ter para que não sejam geradas falhas via aparelho de *scanner*. Para isso, foram realizadas 5 configurações diferentes de montagem no pack de baterias do veículo Toyota Prius e cada vez foi andado um percurso médio de 20 km, com subidas e descidas acentuadas com o veículo, para que fosse constatado em quais configurações da bateria seriam geradas falhas referentes ao bloco de baterias alterado. Este teste teve como objetivo chegar próximo a um valor mínimo de capacidade de um módulo para que fossem geradas falhas no veículo.

Os códigos de falha DTC (do inglês *diagnostic trouble codes*) são um padrão de códigos com descrições de falhas gerados e registrados pelas unidades eletrônicas dos veículos mais modernos, com o objetivo de auxiliar no reparo e alertar o motorista do veículo a possíveis riscos aos sistemas ou ocupantes, pois quando importantes códigos de falha são registrados, a luz MIL (do inglês *malfunction indicator light*), indicadora de falha, acende no painel de instrumentos do veículo. Exemplos de códigos de falha gerados durante os testes realizados no veículo foram: “P3022 – *Battery Block 13 Becomes Weak*” e “P3023 – *Replace Hybrid Battery Pack*” conforme mostrado na Figura 26. Nesse caso, há uma falha no bloco 13 do *pack* de bateria e o

último, um código mais genérico, que se refere a um defeito no conjunto de bateria sem a especificação de um ou mais blocos. Os códigos de falha podem ser lidos através de um aparelho de *scanner* automotivo apropriado, que se comunica com as centrais eletrônicas, recebe e permite a visualização das informações.

Figura 26 - Exemplos de códigos de falha lidos com o scanner original Toyota (*TechStream*).



Diagnostic Code:

Code	Description	Current	Pending	History	Summary
P0A80	Replace Hybrid Battery Pack	X	X	X	
P3021	Battery Block 11 Becomes Weak	X	X	X	
P3023	Battery Block 13 Becomes Weak	X	X	X	
P3024	Battery Block 14 Becomes Weak	X	X	X	

Fonte: O Autor.

Para estudar a relação da capacidade da bateria com a geração ou não de códigos de falha, foram realizadas diversas configurações de montagens da bateria em um veículo Toyota Prius 2013, desta forma, foi almejado cercar um valor mínimo, ou próximo disso, para a capacidade de um módulo de bateria. É interessante salientar que o Prius testado tem quase 10 anos, mais de 120.000 km e alguns dos módulos de bateria ensaiados entregaram cerca de 60% de sua capacidade nominal, fato que demonstraria que para esta configuração de bateria, encontrar módulos com capacidade suficiente para gerar falha, provavelmente será a pior configuração global de capacidade possível de ser operada em um veículo deste tipo. Pois a fabricante estipula uma vida útil de 10 anos para o *pack* de baterias, sendo este o cenário da bateria avaliada.

É importante comentar que os módulos da bateria são conectados em série, com isso, a mesma corrente drenada do *pack* completo é exatamente a mesma corrente drenada de cada módulo individual. Este fato faz com que ao existir um módulo com capacidade consideravelmente inferior do restante, ao drenar corrente do *pack* nesta configuração, no momento que este módulo defeituoso oferecer toda a sua capacidade, irá ocorrer uma queda brusca de tensão neste módulo específico e o defeito será revelado.

Para esta análise, foram desenvolvidas cinco montagens diferentes no *pack* de bateria do Toyota Prius e em cada uma das ocasiões foi andado o mesmo percurso, com distância média de 20 km, com subidas e descidas acentuadas e constatado em quais configurações foram geradas falhas referentes ao bloco com o módulo de bateria alterado.

As montagens com as capacidades percentuais em relação à capacidade nominal da bateria são apresentadas na Tabela 3, a qual demonstra também se houve ou não a geração de falhas - DTC.

Tabela 3 - Módulos aplicados a diferentes montagens do pack de baterias para análise de código de falha.

Nº Módulo	Capacidade %	DTC
01	87%	NÃO
05	2%	SIM
06	40%	SIM
07	58%	NÃO
08	47%	NÃO

Fonte: O Autor.

De acordo com as análises desenvolvidas, observando as capacidades dos módulos e o efeito em relação a geração de falhas DTC, foi percebido que módulos com baixa capacidade tem tendência a gerarem falhas e módulos individuais aplicados com capacidades superiores aos demais não geram falhas, problemas ou alterações no funcionamento da bateria. Ensaios desenvolvidos com dois módulos aleatórios do *pack* que não estavam gerando falhas, para validar a condição geral

aproximada da bateria, apresentaram capacidades percentuais relativas ao valor nominal de 56% e 65%, com isso vemos que para esta configuração de bateria, quando instalados módulos com números de capacidade menores ou iguais a 40%, falhas são registradas no veículo. Em contrapartida, o módulo com capacidade muito maior que os outros (87%), não causou condições para geração de falha.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos testes observados para avaliação do desempenho dos métodos de condicionamento não se mostraram eficientes dentro do cenário analisado. Existem algumas possibilidades para tentar justificar tal conclusão. Uma possibilidade é que a não melhoria pode ter relação ao fato das baterias de Ni-MH empregadas em veículos híbridos terem sua utilização gerenciada por uma unidade eletrônica, que verifica constantemente as condições de corrente tensão, e temperaturas, com o objetivo de otimizar ao máximo as condições de uso, assim, evitando o favorecimento de condições para a geração do efeito memória.

Como apresentado na fundamentação teórica, o gerenciamento da bateria do veículo mantém o estado de carga SOC sempre entre um intervalo fixo, com isso, a bateria nunca é descarregada e ou carregada até os seus limites máximos durante a operação no veículo, este fato significa de o DOD (do inglês *depth of discharge*) ou profundidade de descarga da bateria não atinge grandes valores (podendo oscilar entre 2% a 5%) em concordância com Linden e Reddy (2011). De acordo com o modelo de ciclo de vida para baterias de Ni-MH aplicadas em veículos híbridos proposto por Chen (2021), o DOD é o maior e mais importante fator para a redução do ciclo de vida das baterias, com isso a estratégia de redução do DOD aplicado à bateria, além do fato de manter o SOC entre um intervalo delta, faz com que a bateria trabalhe sempre em um intervalo ótimo e fixo, além disso as altas correntes de carga e descarga atuam como um processo de carga e descarga pulsada, que podem ser a justificativa para o favorecimento da não formação de cristais nos eletrodos das células da bateria.

É importante salientar que os testes desenvolvidos não forneceram uma vasta amostragem para ter resultados estatisticamente assegurados, por isso é interessante que as conclusões sejam compreendidas com cautela e uma possibilidade de melhorias futuras para esta pesquisa, seria a ampliação dos ensaios, utilizando uma maior quantidade de módulos de baterias de diferentes origens, veículos e situações de operação.

O resultado das análises avaliando os efeitos em relação a geração de códigos de falha DTC, devido a aplicação de módulos com diferentes capacidades a

um veículo Toyota, pode indicar que módulos com capacidades demasiadamente inferiores aos demais do *pack*, pode estar relacionado a geração de códigos de falha. Em contraposição, a aplicação de módulos com capacidades maiores em relação ao encontrado no *pack*, acabaram não gerando códigos de falha. Com isso, é possível estipular um método de reparação do *pack* de baterias, no qual: direcionado pelo código de falha o reparador encontra qual o bloco é referente ao módulo defeituoso. A partir deste momento, executa-se ensaios de capacidade no bloco (par de módulos) defeituoso e em módulos aleatórios que não apresentem defeitos (para coletar informação sobre a capacidade de módulos não defeituosos). Com essa análise, será possível detectar qual módulo apresenta capacidade baixa e por fim, substitui-se o módulo defeituoso por outro com capacidade similar ou, de preferência, superior aos módulos que não apresentam defeitos.

Da mesma forma relatada para a conclusão relacionada aos métodos de recondicionamento, é importante que sejam efetuadas mais pesquisas e ensaios referentes ao assunto, para que assim seja possível assegurar estatisticamente as conclusões aqui apontadas.

REFERÊNCIAS

AMBROSIO, R. C.; TICIANELLI, E. A. **Baterias de Níquel-Hidreto Metálico - Uma Alternativa Para as baterias de Níquel-Cádmio**. 2001. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/NcSrLNz7h6fbmySd3Lfchzz/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 1 set. 2022.

BNDES - BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. **Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global**. 2013.

BUCHMANN, I. **Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers**. 2. ed. [S.l.]: Cadex Electronics, 2001. ISBN 9780968211823.

DOUTOR-IE. **Quem somos**, 2022. Disponível em: <<https://www.doutorie.com.br/quem-somos>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FUJITA, R. **Modelagem de Baterias Ni-MH e Estimação do Estado de Carga Utilizando Filtro de Kalman Estendido**, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Linden's Handbook of Batteries**. 4. ed. New York, NY, United States: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2011. ISBN 978-0-07-162421-3.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Linden's Handbook of Batteries**. 3. ed. New York, NY, United States: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2001. ISBN 0-07-135978-8.

LIRA, Cauê. **Toyota quer vender SUV elétrico no Brasil, mas infraestrutura ainda não dá conta**. 2022. Disponível em: < <https://autoesporte.globo.com/eletricos-e-hibridos/noticia/2022/08/toyota-quer-vender-suv-eletrico-no-brasil-mas-infraestrutura-ainda-nao-da-conta.ghtml> >. Acesso em: 24. nov 2022.

MICHELINI, A. **Baterias Recarregáveis - Para Equipamentos Portáteis**. 1 ed. 2017. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasrecarregaveis2.pdf>>. Acesso em: 1 set. 2022.

MORAES, Jorge. **Caoa Chery anuncia eletrificação de todos os seus modelos**, 2022. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/carros/colunas/jorge-moraes/2022/05/27/caoa-chery-anuncia-eletrificacao-de-todos-os-seus-modelos.htm> >. Acesso em: 05 out. 2022.

NEOCHARGE. **Número de Carros Elétricos no Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/carros-eletricos-brasil>>. Acesso em: 30 set. 2022.

PANASONIC. **Ni-MH Handbook: Panasonic industrial batteries**. 2014. Acesso em: 1 novembro de 2022. Disponível em: <https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/ni-mh-handbook-2014_interactive.pdf>. Acesso em: 1 set. 2022.

PASSOS, Eduardo. **Como Renault Kwid E-Tech tentará ser primeiro elétrico acessível do Brasil - Quatro Rodas**, 2022. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/como-renault-kwid-e-tech-tentara-ser-primeiro-eletrico-acessivel-do-brasil/>>. Acesso em: 18 nov. 2022.

PERONI, Jady. **Primeiro híbrido da Toyota, Prius se despede do Brasil, mas pode voltar**. Estadão, 2021. Disponível em: <<https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/primeiro-hibrido-da-toyota-prius-se-despede-do-brasil-mas-pode-voltar/>>. Acesso em: 05 out. 2022.

PORSCHE. **The Porsche Newsroom**, 2022. Disponível em: <<https://media.porsche.com/mediakit/porsche-museum/en/the-porsche-museum/exhibitions/cars/egger-lohner-c2-phaeton>>. Acesso em: 30 set. 2022.

ROBOCORE TECNOLOGIA. **Sensor de Tensão - 0 a 25V**. Disponível em: <https://www.robocore.net/sensor-corrente-tensao/sensor-de-tensao-0-a-25v?gclid=Cj0KCQiAm5ycBhCXARIsAPIdzoU1ryO0FWIZ6D8HesWkaXFx6T1IO8UAXvQ54k9JyKRdXdilJAC0YBkaAgdPEALw_wcB>. Acesso em: 24 nov. 2022.

RUFFO, Gustavo Henrique. **O que há de diferente nos motores de ciclo Atkinson e Miller?**. 2021. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/o-que-ha-de-diferente-nos-motores-de-ciclo-atkinson-e-miller/>>. Acesso em: 24 nov. 2022.

SCHNEIDER, E. L.; DOS SANTOS, S. S.; KINDLEIN JR, W. S.; Malfatti, C. de F. **Uma contribuição ao ecodesign: metodologia para avaliação e seleção de células de baterias de NiMH, visando o seu reuso**. Design e Tecnologia, v. 1, n. 01, p. 51-59, 18 set. 2010.

TIS: Technical Information System, 2022. Disponível em: <<https://techinfo.toyota.com>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

TOYOTA. **A short history of hybrid**. 2013. Disponível em: <<https://mag.toyota.co.uk/a-short-history-of-hybrid/>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

TOYOTA SERVICE. **What is Hybrid Synergy Drive?**, 2022. Disponível: <<https://www.toyotaservice.ie/pages/hybrid/world-of-toyota/environmental-technology/what-is-hybrid-synergy-drive.json>>. Acesso em: 20 nov. 2022.