

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA

ALEKSANDER HENRIQUE HINÇA

**APLICAÇÃO DE SUPERCAPACITORES NO SISTEMA DE PARTIDA
DE VEÍCULOS PESADOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2018

ALEKSANDER HENRIQUE HINÇA

APLICAÇÃO DE SUPERCAPACITORES NO SISTEMA DE PARTIDA DE VEÍCULOS PESADOS

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. M. Sc. Olício da Silva Júnior

CURITIBA
2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria
Automotiva



TERMO DE APROVAÇÃO

APLICAÇÃO DE SUPERCAPACITORES NO SISTEMA DE PARTIDA DE VEÍCULOS PESADOS

por

ALEKSANDER HENRIQUE HINÇA

Esta monografia foi apresentada em 05 de Dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. M. Sc. Olício da Silva Júnior
Orientador

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

HINÇA, Aleksander Henrique. **Aplicação de supercapacitores no sistema de partida de veículos pesados.** 2018. 40 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Analisando os sistemas convencionais de partida dos veículos automotores, notou-se uma possibilidade de melhoria no sistema de fornecimento de energia para a partida do veículo, suprida convencionalmente por baterias chumbo-ácido. Em casos extremos de partidas sucessivas, como acontece nos táxis e sistemas start/stop, se não houver um sistema exclusivo para as partidas, a bateria do veículo acaba danificando-se precocemente ao longo do tempo, tendo que esta ser trocada antes do tempo médio de vida útil. Também há casos onde o uso da bateria é elevado com o veículo desligado, como acontece nos caminhões e ônibus, prejudicando o fornecimento de energia necessário para a partida do veículo, impossibilitando o acionamento do motor a combustão. Com o objetivo de viabilizar um novo sistema de partida nos veículos, esta monografia visa analisar o funcionamento dos supercapacitores em paralelo com a bateria. O presente trabalho foi concluído com êxito, sendo possível ressaltar a importância dos supercapacitores na eficiência do sistema de partida principalmente em baixíssimas temperaturas.

Palavras-chave: Supercapacitores. Bateria chumbo-ácido. Partida em veículos utilizando supercapacitores.

ABSTRACT

HINÇA, Aleksander Henrique. **Application of supercapacitors in the heavy vehicle system.** 2018. 40 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Analyzing the conventional starting systems of vehicles, there was a possibility of improvement in the power supply system for starting the vehicle, provided by the lead acid battery. In extreme cases of successive cranking as happens for example in cabs and systems start/stop, if there is no system exclusive for vehicle engine starting, the vehicle's battery eventually becomes damaged early and has to be changed before average life time. There are also cases where battery usage high when the engine off, as in trucks and buses, compromising the power supply required for starting the vehicle, difficulting the engine to start. With the objective of making possible a new starting system in vehicles, this monograph aims to analyze the operation of supercapacitors in parallel with the battery. The present work was concluded with success, being possible to emphasize the importance of the supercapacitors in the efficiency of the starting system mainly in very low temperatures.

Keywords: Supercapacitors. Lead acid battery. Vehicle cranking using supercapacitors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Separação de cargas	13
Figura 2 - Visualização da superfície porosa do supercapacitor carregado	14
Figura 3 - Visualização das partes internas de uma bateria chumbo-ácido	18
Figura 4 - Sulfatação	19
Figura 5 - Comparativo entre as densidades de potência e energia das baterias, capacitores e supercapacitores	22
Figura 6 - Banco de Supercapacitores	23
Figura 7 - Bateria Heliar 225Ah	24
Figura 8 - Alicates amperímetro Ipetronik 352-001-300/03	24
Figura 9 - Resistor Shunt	25
Figura 10 - Ipetronik 512-002-2200	26
Figura 11 - Caminhão Volvo FH	26
Figura 12 - Modelo de instalação do banco de SC em paralelo com a bateria	27
Figura 13 - Instalação real do banco de SCs no caminhão	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos supercapacitores	16
Tabela 2 - Dados técnicos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente ..	17
Tabela 3 - Comparativo: Supercapacitores x Baterias	22

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1 - Capacitância	13
Fórmula 2 - Capacitância equivalente	23

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Degradação da capacitância	14
Gráfico 2 - Degradação da resistência série equivalente	15
Gráfico 3 - Efeito da descarga profunda e da temperatura na vida útil da bateria	20
Gráfico 4 - Tensão e corrente de uma partida no caminhão	29
Gráfico 5 - Ciclo completo de tensão e corrente de uma partida no caminhão	30
Gráfico 6 - Tensão e corrente no sistema paralelo de partida com bateria nova de 225Ah.....	31
Gráfico 7 - Ciclo completo de tensão e corrente do sistema paralelo com a bateria nova de 225Ah	32
Gráfico 8 - Tensão e corrente no sistema paralelo de partida com a bateria usada de 225 Ah.....	33
Gráfico 9 - Ciclo completo de seis partidas no veículo no sistema paralelo com a bateria usada de 225Ah	34
Gráfico 10 - Tensão e corrente no sistema paralelo de partida com a bateria nova de 110Ah.....	35
Gráfico 11 - Tensão e corrente no sistema de partidas sucessivas	36
Gráfico 12 - Tensão e corrente no sistema de partidas sucessivas com a bateria boa de 225Ah.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES DE MEDIDA

A	Ampere
Ah	Ampere-hora
ddp	Diferença de potencial
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> (ou Resistência Série Equivalente)
F	Farad
Hz	Hertz
mA	Mili Amperes
p.	Página
s	Segundos
SCs	Supercapacitores
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt-hora
Wh/Kg	Watt-hora por Quilograma
Ws	Watt-segundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA	10
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo Geral	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 SUPERCAPACITORES	12
2.1.1 Aplicações dos Supercapacitores	16
2.2 BATERIA AUTOMOTIVA	17
2.2.1 Características e Problemas das Baterias Automotivas	18
2.2.2 Vida Útil e a Influência da Temperatura nas Baterias Chumbo-Ácido	19
2.2.3 Densidade de Potência x Densidade de Energia	21
2.2.4 Supercapacitores x Baterias	22
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
2.3.1 Materiais	23
2.3.1.1 Supercapacitores Maxwell	23
2.3.1.2 Bateria chumbo-ácido	24
2.3.1.3 Alicata amperímetro	24
2.3.1.4 Resistor Shunt	25
2.3.1.5 Equipamento Ipetronik	25
2.3.1.6 Veículo de teste	26
2.3.2 Métodos	27
2.3.2.1 Modelo proposto para a instalação do banco de SCs no veículo	27
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
3.1 TESTE I: CONDIÇÃO ORIGINAL DO VEÍCULO COM A BATERIA NOVA DE 225AH	29
3.2 TESTE II: BATERIA NOVA DE 225AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES	31
3.3 TESTE III: BATERIA USADA DE 225AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES	33
3.4 TESTE IV: BATERIA NOVA DE 110AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES	35
3.5 TESTE V: PARTIDAS SUCESSIVAS COM A BATERIA NOVA DE 225AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES	36
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Os supercapacitores (também conhecidos como ultracapacitores) são dispositivos com alta densidade de potência, ou seja, conseguem fornecer elevados níveis de corrente (milhares de amperes) para determinadas aplicações se comparados com as baterias automotivas. Porém, os supercapacitores possuem baixa densidade energética (armazenam pouca energia) e, portanto, não conseguem substituir as baterias. Dentre as características positivas, os SCs podem trabalhar em baixíssimas temperaturas (-40°C), além da capacidade de ser carregado e descarregado centenas de milhares de vezes.

Infelizmente, o supercapacitor atualmente é pouco conhecido no mercado brasileiro. O desinteresse por esse componente pode estar na falta de conhecimento sobre o funcionamento do mesmo ou no custo atual de importação. De acordo com a IndustryARC, estima-se que o mercado de supercapacitores atinja cerca de US\$ 4,2 bilhões de dólares até 2020 em todo o mundo.

Analisando os sistemas convencionais de partida dos veículos pesados (caminhões), notou-se uma possibilidade de melhoria no sistema de fornecimento de energia, colocando um banco de supercapacitores destinado apenas para a partida do caminhão, retirando essa função da bateria, fazendo com que a mesma apenas “alimente” os demais periféricos do veículo.

Em casos extremos de partidas sucessivas, como acontece nas aplicações de mineração, canaveira e madeireira, se não houver um sistema exclusivo para as partidas, a bateria do veículo acaba danificando-se precocemente ao longo do tempo, tendo que esta ser trocada antes do tempo médio de vida útil.

No presente estudo, será abordada uma breve descrição das características gerais, comparações e funcionamento do sistema de partida utilizando baterias chumbo-ácido e supercapacitores. Consequentemente, serão realizados alguns experimentos práticos envolvendo supercapacitores em conjunto com as baterias, para a conclusão dos objetivos propostos deste projeto.

1.1 PROBLEMA

O presente estudo visa melhorar a eficiência do sistema de partida de determinadas aplicações que os veículos pesados são expostos no dia-a-dia, onde sua utilização é intensa, como por exemplo na extração de mineração, canavieira e madeireira, exigindo um elevado número de partidas diárias dos caminhões, comprometendo a vida útil das baterias em menos de um ano. Além disso, muitos motoristas de caminhão fazem de seus veículos suas casas. Durante a noite, estes acabam usando o sistema de iluminação interno do veículo para leitura, escutam rádio, utilizam o sistema de ventilação, assistem TV, entre outros.

Dependendo do tempo de uso desses dispositivos, grande parte da energia armazenada na bateria será consumida, já que o veículo está desligado. Se a tensão cair abaixo do limite mínimo necessário para a partida, o veículo não terá corrente suficiente disponível para acionar o motor de arranque.

Se o veículo possuir um sistema com banco de supercapacitores em paralelo com a bateria, parte deste problema pode ser resolvido já que os supercapacitores serão responsáveis pela partida ao invés da bateria, podendo esta, estar parcialmente descarregada. Além do benefício citado anteriormente, pode-se suspeitar que com a instalação dos supercapacitores, será possível ter um aumento significativo na vida útil das baterias automotivas reduzindo o descarte das mesmas no meio ambiente.

Em regiões com temperaturas muito frias (-20°C) como é o caso da Suécia, muitos veículos pesados sofrem para realizar a partida do motor equipados somente com as baterias chumbo-ácido. Neste caso, estudos realizados utilizando um caminhão da marca Volvo mostram que a utilização de supercapacitores em conjunto com as baterias chumbo-ácido ajudam positivamente na solução deste problema.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção será apresentado o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

1.2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo da proposta desta monografia é analisar as características comportamentais do supercapacitor, inserindo-o paralelamente com a bateria chumbo-ácido para auxiliar no sistema de partida dos veículos pesados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Etapas a serem realizadas para atingir o objetivo geral:

- Fundamentação e análise teórica sobre o funcionamento dos supercapacitores, baterias chumbo-ácido e todos os elementos envolvidos em um sistema de partida de veículos pesados;
- Realizar a instalação física de um banco de supercapacitores no caminhão em paralelo com a bateria chumbo-ácido;
- Utilizar dispositivos para armazenar dados de correntes e tensões dos elementos envolvidos no projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

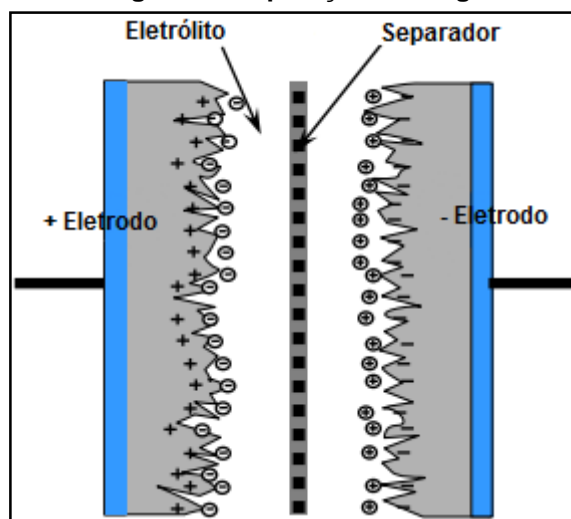
2.1 SUPERCAPACITORES

O supercapacitor (também conhecido como ultracapacitor) é um dispositivo capaz de armazenar níveis elevados de energia por unidade de volume e massa, se comparados com capacitores tradicionais (FERREIRA, 2007, p. 94). Além desta característica, este pode fornecer a energia armazenada a níveis mais elevados de potência que a bateria automotiva, abrindo possibilidades de aplicação para este componente.

O princípio de funcionamento do supercapacitor é o mesmo do capacitor conhecido amplamente em diversos aparelhos eletrônicos. Os capacitores comuns são formados por duas peças de material condutor separadas por um material isolante. Quando uma tensão é aplicada entre estas placas condutoras, chamadas armaduras, ele se carrega: uma armadura armazena cargas positivas e a outra armazena cargas negativas. A diferença do supercapacitor está na natureza porosa de seus eletrodos, a mínima distância entre as cargas e a maior área superficial, proporcionando capacitâncias muito elevadas.

Segundo o material cedido pela fabricante de supercapacitores Maxwell, as especificações de construção do SC são dependentes de seu uso e aplicabilidade. Os materiais podem ser ligeiramente diferentes, mas a estrutura para seu funcionamento não muda, consistindo em dois eletrodos, um positivo e o outro negativo, um separador que impeça a passagem de cargas opostas entre eles e todos estes imersos em um eletrólito preenchendo as porosidades existentes, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Separação de cargas



Fonte: Maxwell (2009).

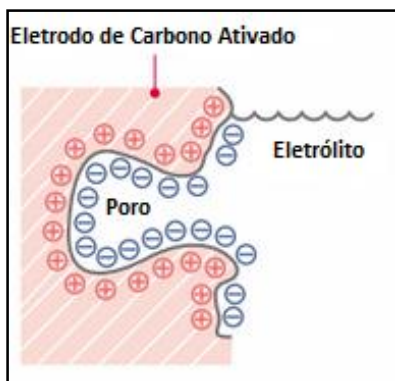
A capacitância é uma grandeza que influencia a capacidade de armazenamento de energia e depende de parâmetros dimensionais e da rigidez elétrica do dispositivo. “Capacitância é a razão entre a carga depositada em uma placa de um capacitor e a diferença de potencial entre as duas placas, medidas em farads (F)” (ALEXANDER; SADIKU, 2008, p. 216). De acordo com a Fórmula 1:

Fórmula 1 - Capacitância

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

onde C é a capacitância medida em farad (F), ϵ é a constante de permissividade do dielétrico, A é a área da superfície das placas do capacitor e d a distância entre as placas do capacitor. O supercapacitor consegue armazenar uma grande quantidade de energia, porque o eletrodo do mesmo contém um material a base de carbono (ativado) altamente poroso. Além de aumentar a superfície de contato, essa característica faz com que a distância entre as cargas opostas presentes no eletrólito e no eletrodo se tornem muito pequena. Com uma menor distância entre o eletrodo e o eletrólito e uma grande área porosa na superfície de contato, a capacitância aumenta significativamente. A Figura 2 mostra a proximidade das cargas e a superfície porosa do supercapacitor.

Figura 2 - Visualização da superfície porosa do supercapacitor carregado



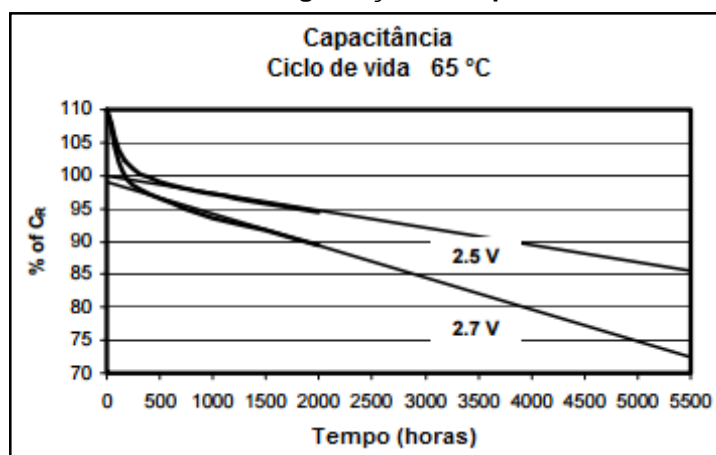
Fonte: LS Mtron (2016).

Pelo fato do armazenamento de energia no SC ser elétrico e não químico igual à bateria chumbo-ácido, isso permite que o processo de carga/descarga da vida útil do componente não seja prejudicado, sendo altamente reversível.

Devido a uma baixa impedância interna, o SC é capaz de entregar correntes muito elevadas em um curto período de tempo, podendo auxiliar as baterias quando ligado em paralelo, impedindo que picos de corrente sejam exigidos da bateria. O SC apresenta uma resistência série equivalente (ou *Equivalent Series Resistance* - ESR) muito baixa, cerca de 0,004 Ohms. Sendo assim, os níveis de corrente podem ser elevados tanto na carga quanto na descarga, sem prejudicar o componente.

O tempo de vida útil do SC é predominantemente definido pela combinação de tensão e temperatura de operação. O SC tem um prazo ilimitado de validade, podendo chegar a centenas de milhares de ciclos de atuação. Quando se refere à degradação, a mudança do desempenho ocorre tipicamente na diminuição de 20% da capacitância e no aumento de 200% da resistência série equivalente. O Gráfico 1 representa esta degradação conforme o tempo e a tensão de trabalho do SC.

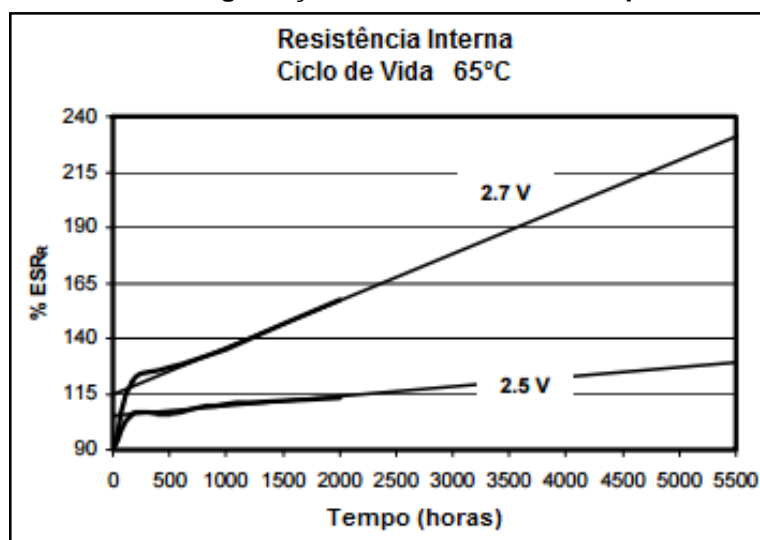
Gráfico 1 - Degradação da capacitância



Fonte: Maxwell (2009).

Representada em formato de porcentagem, a capacitância é influenciada pela temperatura com um decaimento que obedece a aproximação do efeito de duplicação, que prevê a redução da vida útil em duas vezes a cada 10 °C de aumento. Assim como a capacitância, a ESR do SC é alterada conforme o tempo, a tensão aplicada e a temperatura de utilização conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Degradação da resistência série equivalente



Fonte: Maxwell (2009).

Trabalhando com uma temperatura elevada (65 °C), o aumento da ESR conforme o tempo de utilização sofre grande influência da tensão de aplicação no SC, degradando a resposta em frequência a níveis distintos para uma diferença de 0,2 V.

Ao contrário de capacitores eletrolíticos e eletrostáticos, supercapacitores possuem uma característica de baixa tensão nominal, geralmente na faixa de 1 à 2,8 V. A tensão de funcionamento é limitada para não comprometer a estrutura dos eletrodos do SC. Por uma demanda de aplicações, muitas vezes exigindo tensões altas e níveis de entrega de potência rápida, associações com SCs devem ser realizadas. Para atingir níveis elevados de tensão, as células de SC são ligadas em série e para obter uma maior capacitância as mesmas são ligados em paralelo (GRBOVIC, 2013, p. 172).

Considerando que os SCs em uma associação não sejam idênticos e que alguns parâmetros como capacitância e ESR possam variar significativamente, a distribuição de tensão entre as células ligadas em série podem ser diferentes, ocasionando um sobreaquecimento e conseqüentemente uma redução da vida útil ou até mesmo danos irreversíveis em sua estrutura. Para viabilizar a associação de SCs, os principais parâmetros regulados são a tensão individual de cada célula, controle de

temperatura e balanceamento de cargas, buscando aumentar a vida útil do módulo, também conhecidos como banco de supercapacitores.

A Tabela 1 apresenta as principais características do banco de supercapacitores modelo ESM – ULTRA 31/1100/24V utilizado nos testes.

Tabela 1 - Principais características dos supercapacitores

Especificações do ESM	ULTRA 31/1100/24V
Motor Diesel	15 L máx
<i>Cold Cranking Amps</i> (CCA)	1100 CCA
Potência de Pico	50,7 kW
Tensão de Entrada	9,5V até 32V no Terminal B+
Tensão de Saída Máx	28,5V (0° ou menos)
Tensão de Saída Nominal	26,5V (25°C até 65°C)
Tensão de Saída Ext.	20,0V (65°C ou mais)
Recarga Nominal	5 min (depois de uma partida)
Recarga Máx.	10 min (de 14,5V até 25V)
Recarga Inicial	20 min
Corrente de Fuga	10 mA da bateria
Corrente de Carga	20A
Capacidade do banco	340F
Resistência do banco	0,004 Ohm
Descarga do banco	0,15 V por dia
Dimensão	330 mm L x 173 mm W x 240 mm H
Peso	8,2 Kg
Terminal	3/8"
Torque	17 a 22,5 N-m
Temperatura de Operação	(-40°C a 65°C)
Vida útil	8 anos

Fonte: Maxwell (2009).

2.1.1 Aplicações dos Supercapacitores

Na área automotiva, o supercapacitor pode ser encontrado está presente nos sistemas *start-stop* dos automóveis, desligando o motor quando o usuário para o veículo, evitando assim a queima desnecessária de combustível.

Internamente nos veículos, esse componente está presente na direção hidráulica, abertura das portas elétricas, pré-aquecimento do catalisador, sistemas de sons potentes, etc.

Na área industrial, o supercapacitor é utilizado em turbinas eólicas, guindastes, empilhadeiras, elevadores, robôs móveis, etc. Ou seja, são sistemas que demandam grandes picos de corrente para saírem do repouso.

2.2 BATERIA AUTOMOTIVA

A bateria chumbo-ácido, também conhecida como “acumulador eletroquímico”, amplamente difundida na área automotiva, transforma a energia química em energia elétrica através do processo de oxidação/redução e vice-versa. Uma das principais funções da bateria automotiva é alimentar todos os dispositivos elétricos do veículo como rádio, painel, luzes, faróis, etc. Além disso, a bateria fornece energia suficiente para o motor de arranque do automóvel, fornecendo uma grande quantidade de corrente elétrica inicial. Quando o veículo é ligado, o alternador que está conectado ao motor, começa a funcionar e sua principal função é converter o trabalho mecânico fornecido pelo motor em energia elétrica para carregar a bateria e alimentar todos os equipamentos elétricos do veículo.

Normalmente a bateria chumbo-ácido é a mais utilizada no setor automotivo, pois economicamente, é a mais viável (menor custo Wh) se comparado as baterias de níquel-cádmio, por exemplo, apesar de estas possuírem características melhores como vida útil e densidade energética. A Tabela 2 mostra o comparativo entre esses dois tipos de baterias.

Tabela 2 - Dados técnicos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente

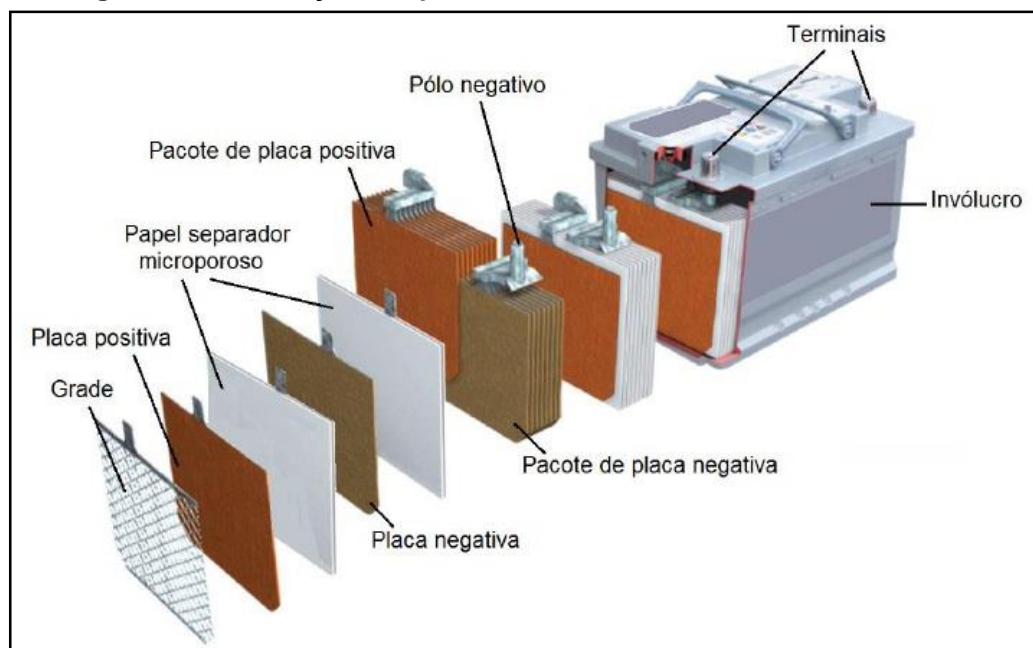
Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência η_{Wh} [%]	Vida útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de operação		Aplicações típicas (exemplos)
							Carga padrão [°C]	Descarga [°C]	
Chumbo ácido ⁷ (Pb-ácido)	H ₂ SO ₄	20–40	50–120	80–90	3–20	250–500	-10 a +40	-15 a +50	Uso estacionário, tração, automotiva
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30–50	100–150	60–70	3–25	300–700	-20 a +50	-45 a +50	Mesmo tipo de aplicações das baterias chumbo-ácido, ferramentas, veículos elétricos

Fonte: Luque e Hegedus (2011).

A bateria automotiva do caminhão é composta por 12 células de aproximadamente 2V cada, que ligadas em série, totalizam 24V (duas baterias de 12V). Para haver uma diferença de potencial de 2V em cada célula, esta é composta por dois eletrodos, o ânodo e o cátodo. Cada eletrodo possui uma certa quantidade de material ativo estruturados em uma grade, formando o dióxido de chumbo (PbO₂) na placa catódica e o chumbo metálico (Pb) na placa anódica. Para evitar o curto-circuito entre as placas positivas e negativas, são utilizados separadores (isolantes) feitos de papel microporoso para facilitar a passagem do eletrólito. Todo esse conjunto está imerso numa solução eletrolítica de ácido sulfúrico com água destilada,

responsável pelo transporte de íons entre os eletrodos. A Figura 3 mostra a estrutura interna de uma bateria chumbo-ácida.

Figura 3 - Visualização das partes internas de uma bateria chumbo-ácida



Fonte: Zobaa (2013).

A unidade de medida de capacidade de carga da bateria adotada universalmente é o (Ah). Ou seja, uma bateria de caminhão de 225Ah, teoricamente, deve fornecer uma corrente elétrica de 225Ah durante 1 hora, ou 75A por 3 horas e assim por diante.

2.2.1 Características e Problemas das Baterias Automotivas

É desejável que a solução eletrolítica interna da bateria, sempre esteja em movimento (o próprio “balanço” do automóvel agita o eletrólito) para melhorar o processo químico interno de carregamento e descarregamento da bateria e também para que o ácido sulfúrico (mais denso que a água destilada) não se deposite no fundo da célula, levando a um estágio de corrosão da parte inferior dos eletrodos, prejudicando assim o acúmulo de carga na bateria.

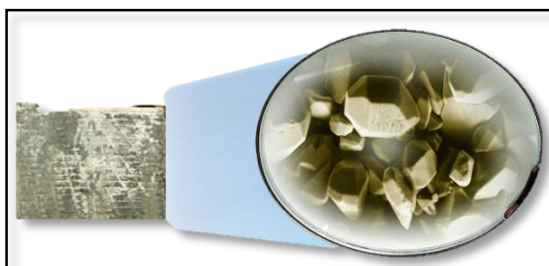
Um fator interessante que ocorre devido às perdas químicas internas da bateria quando esta não é utilizada, é a autodescarga. Segundo Pinho e Galdino (2014, p. 166):

Quando as baterias de chumbo-ácido não estão sendo utilizadas, podem perder de 5 a 30% por mês sua capacidade, dependendo da temperatura e composição química de suas células. Comparativamente, a faixa média de autodescarga das baterias de níquel cádmio é de 3 a 6% ao mês.

Por outro lado, se houver uma sobrecarga na bateria, “toda a corrente elétrica passa a ser consumida no processo da eletrólise da água presente no eletrólito, o que resulta na formação de bolhas de Hidrogênio (H₂) e de Oxigênio (O₂)” (PINHO; GALDINO; 2014, p. 171). Ou seja, parte do eletrólito é quebrado e portanto perdido, reduzindo o armazenamento de carga na bateria.

A própria corrente de pico de partida fornecida pela bateria ao motor de arranque, prejudica a “saúde” da bateria. Esse pico de corrente é tão elevado chegando a 1700A nos caminhões para que o motor saia do repouso e comece a funcionar. Esses picos elevados de corrente contribuem para um problema da bateria conhecido como sulfatação. “Que é o processo de formação e deposição de cristais de sulfato de Chumbo (PbSO₄) sobre as placas das células” (PINHO; GALDINO, 2014, p. 192), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Sulfatação



Fonte: Doutor_Bateria (2018).

Esse fenômeno ocorre na descarga da bateria, fazendo com que o sulfato de chumbo não consiga mais ser revertido em dióxido de chumbo (PbO₂) e chumbo metálico (Pb) nas placas dos eletrodos. Gradativamente as placas vão perdendo a qualidade original de seu material ativo e conseqüentemente seu poder de carga e descarga. O acúmulo de sulfato de chumbo piora quando a bateria é totalmente descarregada e/ou à medida que muitas partidas sucessivas são realizadas aumentando portanto a resistência interna da bateria ao longo do tempo.

2.2.2 Vida Útil e a Influência da Temperatura nas Baterias Chumbo-Ácido

Segundo os especialistas, a durabilidade de uma bateria não se mede por quilômetros rodados, mas por tempo de uso. Normalmente uma bateria chumbo-ácido chega a durar em média de 2 a 3 anos dependendo da utilização. Fatores como deixar os faróis ligados e usar o desembaçador de ar quando o veículo estiver desligado por

exemplo, acaba comprometendo o tempo de vida útil da bateria, fazendo com que pequenas porções de materiais ativos presos nos eletrodos, se desprendam e se depositem no fundo da bateria. Esse depósito de material ativo (altamente condutivo), pode causar um curto-circuito entre as placas da bateria, danificando-a.

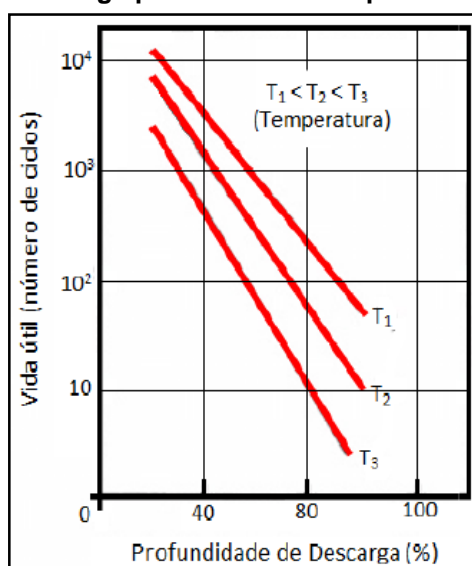
Quanto menos material ativo depositado nas placas dos eletrodos, menor será a capacidade de armazenamento da bateria. Um problema bastante frequente das baterias se deve a uma possível descarga profunda da mesma. Segundo Villalva e Gazoli (2012, p. 105):

Uma bateria automotiva convencional normalmente se descarrega apenas 20% durante o uso normal, o que é necessário para prolongar sua vida útil. Já a bateria estacionária é projetada para ser descarregada completamente várias vezes, algo que não é possível numa bateria automotiva convencional.

Normalmente as baterias estacionárias são instaladas à parte nos veículos, juntamente com um sistema de som que demande grande potência para um longo período de funcionamento. “Nas baterias de chumbo-ácido, o fim da vida útil é geralmente considerado como o instante em que a bateria, estando totalmente carregada, pode armazenar apenas 80% da sua capacidade nominal especificada pelo fabricante” (VILLALVA; GAZOLI; 2012, p. 109).

A temperatura de operação (geralmente 25° C) da bateria convencional, está diretamente ligada com a vida útil da bateria. No Gráfico 3 pode-se observar que quanto maior for a temperatura de operação e/ou a descarga profunda da bateria de chumbo-ácido, menor será o tempo de vida útil da mesma.

Gráfico 3 - Efeito da descarga profunda e da temperatura na vida útil da bateria



Fonte: Imamura, Helm e Palz (1992).

Se houver um sobreaquecimento na bateria, parte da água destilada composta na solução eletrolítica tende a evaporar, deixando a solução mais ácida, levando a um processo de corrosão dos eletrodos, podendo danificar para sempre a bateria. Entretanto, no frio, a dificuldade para dar partida nos veículos é maior. Isso se deve porque “a redução da temperatura causa a redução da mobilidade dos portadores de carga no eletrólito, o que se traduz num aumento da resistência interna e redução da capacidade (Ah) da bateria” (PINHO; GALDINO; 2014, p. 190).

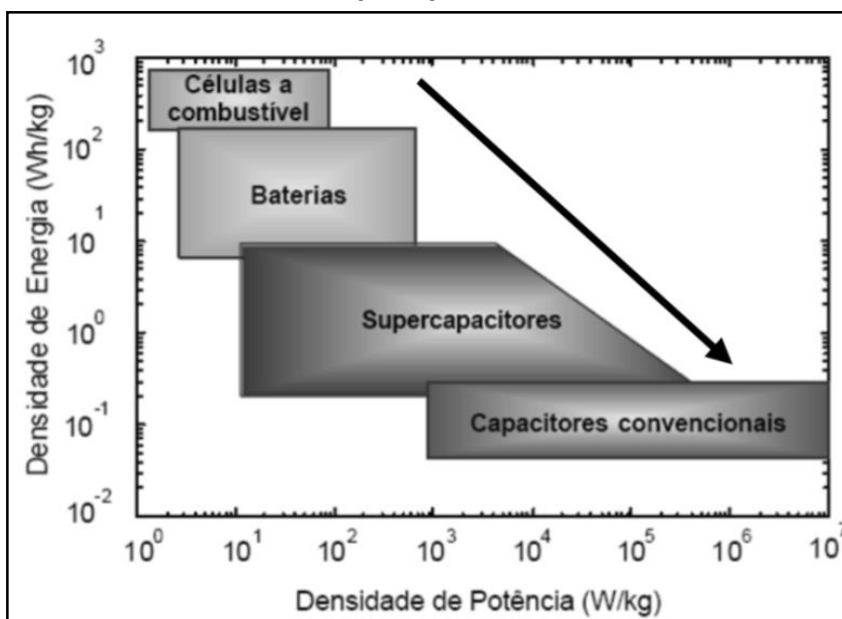
A bateria chumbo-ácido possui componentes de alta toxicidade como o chumbo por exemplo, representando um grande risco para a saúde humana e especialmente para o meio ambiente. Penalidades previstas na Lei de Crimes Ambientais (Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998), podem ser aplicadas caso o usuário descarte a bateria no lixo comum. Ao final da vida útil, a bateria deve ser entregue ao fabricante, distribuidor ou a um reciclador licenciado para as devidas finalidades cabíveis.

2.2.3 Densidade de Potência x Densidade de Energia

As baterias de chumbo-ácido conseguem armazenar energia da mesma maneira que um supercapacitor armazena, porém existe uma grande diferença na distribuição e na quantidade de acumulação dessa energia. A bateria possui uma grande densidade de energia se comparada ao supercapacitor, aproximadamente 10 Wh/Kg para 1 Wh/Kg do supercapacitor, como mostra a Figura 5. Ou seja, a bateria consegue armazenar muito mais energia dada em watt-hora por quilograma de massa.

Já o supercapacitor tem característica oposta. Por possuir uma grande densidade de potência, aproximadamente 1000 W/Kg para 10 W/Kg da bateria, o mesmo consegue fornecer uma grande quantidade de potência em um curtíssimo espaço de tempo na ordem de poucos segundos. Seu carregamento e descarregamento são rápidos, porém não suportam armazenar uma grande quantidade de energia por quilograma de massa como as baterias.

Figura 5 - Comparativo entre as densidades de potência e energia das baterias, capacitores e supercapacitores







Fonte: LS Mtron (2016).

2.2.4 Supercapacitores x Baterias

A Tabela 3 resume as diferenças entre os supercapacitores e as baterias de chumbo-ácido.

Tabela 3 - Comparativo: Supercapacitores x Baterias

	 Supercapacitores	 Baterias
Tecnologia de Armazenamento de Energia	 Eletrostático Sem chumbo e ácido	Eletroquímico Contém chumbo e ácido
 Temperatura de Operação	-40°C a +65°C	-20°C a +55°C
 Ciclo de Carga/Descarga	Centenas de Milhares	Milhares
 Durabilidade	8 anos	12 a 36 Meses
 Peso	8 Kg	20 a 36 Kg

Fonte: Maxwell (2009).

Pode-se observar que os supercapacitores podem operar em um range maior e menor de temperatura, possuem ciclos de carga e descarga muito superiores, vida útil de operação maior e pesam bem menos se comparado as baterias.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

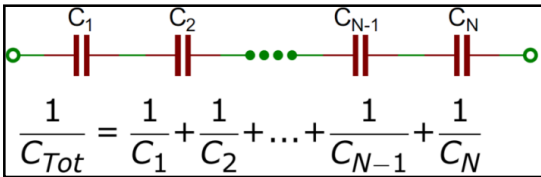
2.3.1 Materiais

Para comprovar o funcionamento do sistema de partida utilizando um banco de supercapacitores, serão utilizados os seguintes materiais para a composição dos experimentos.

2.3.1.1 Supercapacitores Maxwell

Para a realização dos testes, foi utilizado um banco de supercapacitores contendo 12 SCs de 340F cada, que ligados em série totalizam 4080 F. A Fórmula 2 foi usada para calcular a capacitância equivalente do banco em série, onde $N = 12$ (número de SCs).

Fórmula 2 - Capacitância equivalente



$$\frac{1}{C_{Tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_{N-1}} + \frac{1}{C_N}$$

$$\frac{1}{C_{Tot}} = \frac{1}{340} + \frac{1}{340} + \dots + \frac{1}{340} + \frac{1}{340}$$

Cequivalente = 4080F

A Figura 6 mostra um banco de supercapacitores de 24V (para caminhão) com controle de balanceamento de cargas utilizado no teste prático.

Figura 6 - Banco de Supercapacitores



Fonte: Maxwell (2009).

2.3.1.2 Bateria chumbo-ácido

Com a instalação do banco de supercapacitores, a bateria continuará fornecendo energia para os periféricos do veículo, entretanto, a mesma não contribuirá significativamente na partida do veículo. Posteriormente será analisado o comportamento de carga/descarga da bateria Heliar com capacidade de 225Ah, juntamente com o banco de supercapacitores em paralelo. A Figura 7 mostra as duas baterias de chumbo-ácido, 12V cada que em série totalizam 24V, utilizada nos testes.

Figura 7 - Bateria Heliar 225Ah



Fonte: Autoria própria.

2.3.1.3 Alicate amperímetro

Auxiliará na medida de corrente contínua fornecida pela bateria. O alicate Ipetronik possui um fundo de escala de 300A, suficiente para essa aplicação. A Figura 8 mostra o alicate amperímetro conectado na saída do polo positivo da bateria do veículo.

Figura 8 - Alicate amperímetro Ipetronik 352-001-300/03



Fonte: Autoria própria.

2.3.1.4 Resistor Shunt

Para medir a corrente do banco de supercapacitor, foi utilizando um resistor *shunt* para expandir a escala de medida da corrente elétrica. Basicamente essa resistência deriva uma parte da corrente do circuito de modo a possibilitar a medida de correntes de maior valor do que a obtida pelo fundo de escala de um alicate comum, visto que a corrente de partida de um caminhão alcança aproximadamente 1700A. A Figura 9 mostra o resistor conectado no polo S+ (*Starter*) do banco de supercapacitores.

Figura 9 - Resistor Shunt

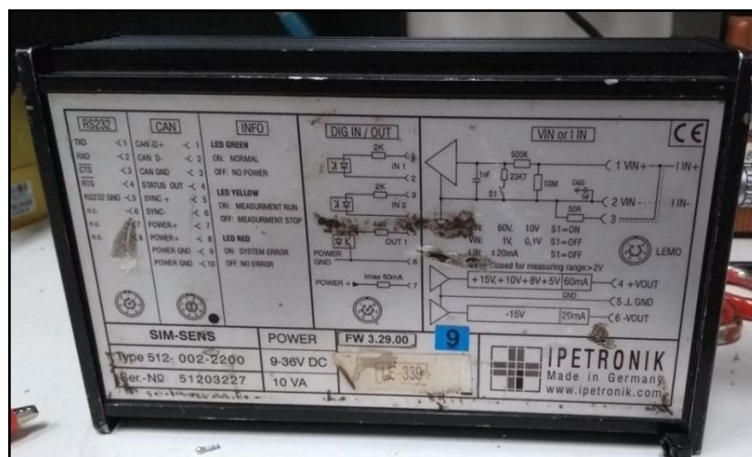


Fonte: Autoria própria.

2.3.1.5 Equipamento Ipetronik

Equipamento utilizado para medir e armazenar as informações de tensão entre os polos do SC e da bateria e no armazenamento de dados de corrente coletadas através do alicate amperímetro do SC e da bateria. Para a presente aplicação, o equipamento foi configurado em uma frequência de amostragem de 1000 Hz, para obter a melhor compreensão detalhada do comportamento do sistema proposto para análise. A Figura 10 mostra o equipamento utilizado no teste.

Figura 10 - Ipetronik 512-002-2200



Fonte: Autoria própria.

2.3.1.6 Veículo de teste

A comprovação do funcionamento do banco de SCs instalado juntamente com o sistema de partida do veículo foi realizado em um caminhão Volvo FH. A Figura 11 mostra o veículo de teste.

Figura 11 - Caminhão Volvo FH



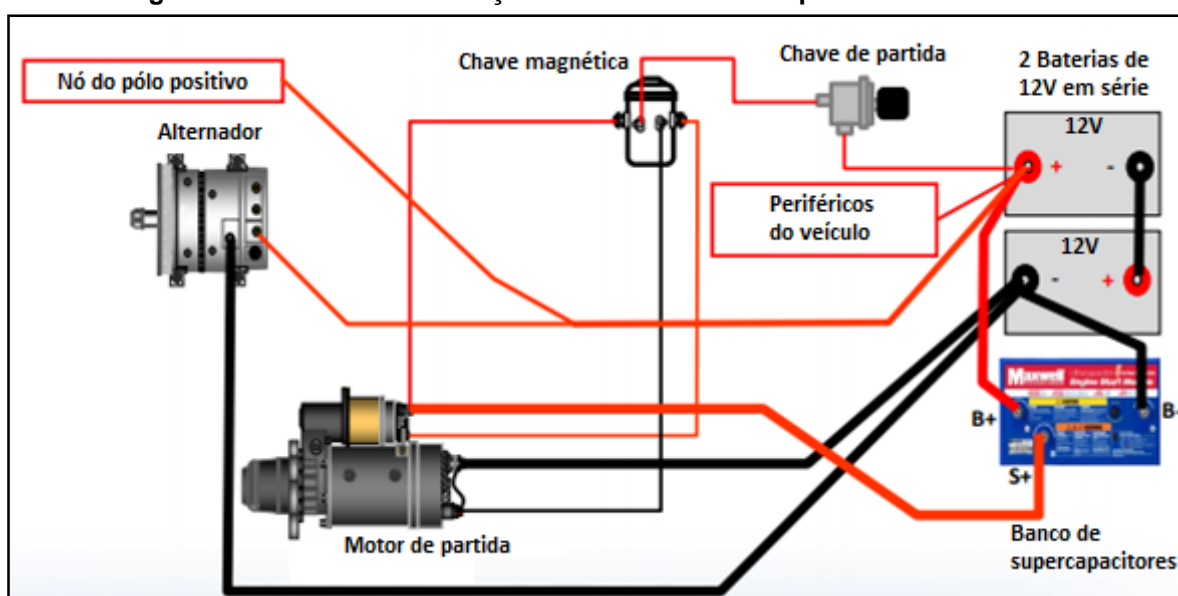
Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Métodos

2.3.2.1 Modelo proposto para a instalação do banco de SCs no veículo

Com o objetivo de verificar o comportamento e seguindo a recomendação do fabricante, o polo S+ do banco de SCs foi exclusivamente conectado ao motor de partida do veículo. Os polos B+ e B- do SC foram conectados respectivamente nos polos positivo (+) e negativo (-) da bateria (ligação em paralelo). A Figura 12 mostra a representação desse modelo.

Figura 12 - Modelo de instalação do banco de SC em paralelo com a bateria

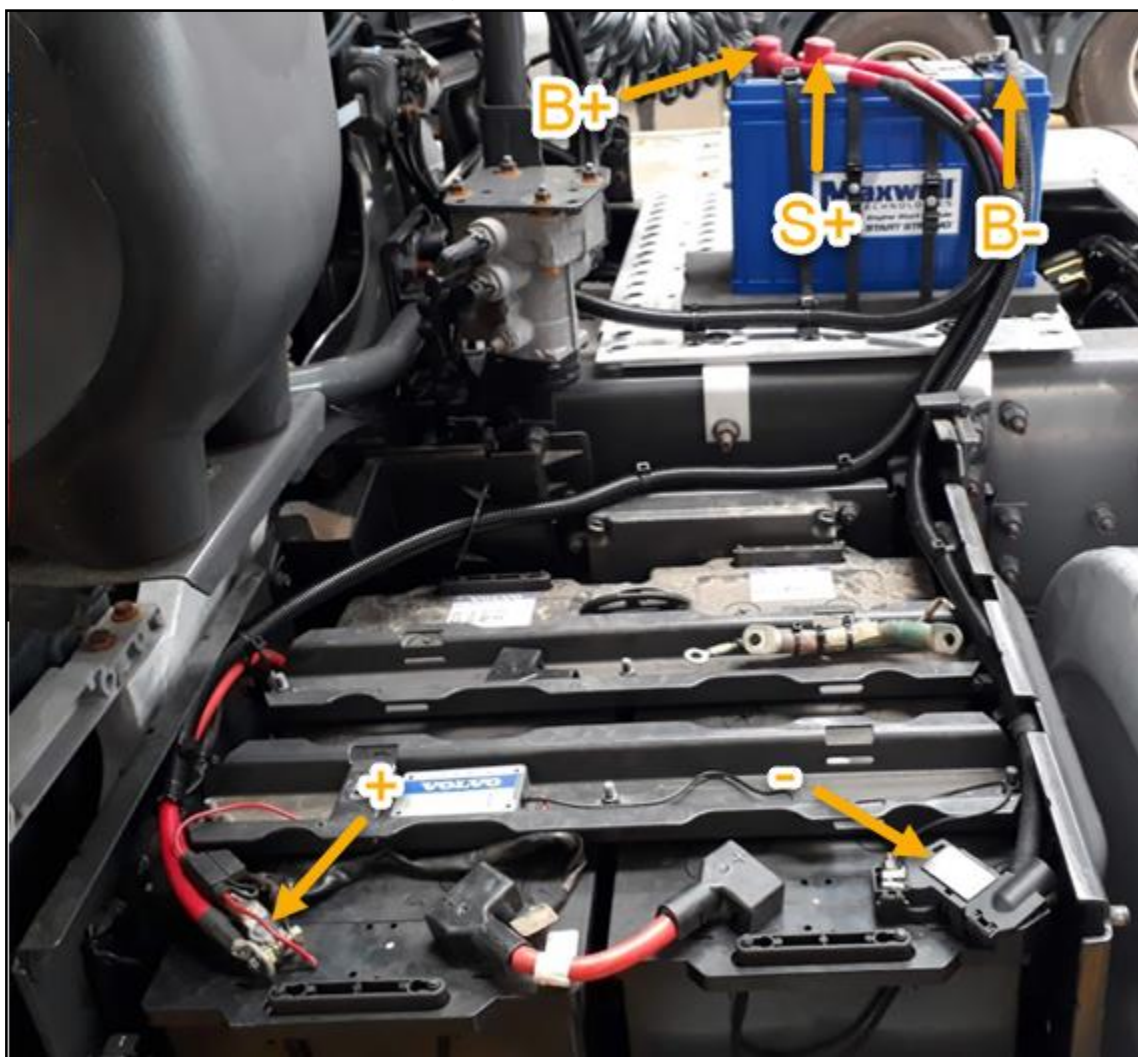


Fonte: Maxwell (2009).

Através do modelo proposto, pode-se observar que toda a energia necessária para alimentar os dispositivos do veículo (luzes, unidades eletrônicas, etc.) estão exclusivamente conectados na bateria. Nesta configuração, quando o motor do veículo é acionado, o mesmo transfere energia para o alternador que por sua vez carrega as baterias que carrega o banco de SCs ligado em paralelo. Desse modo, a bateria não consegue fornecer grandes quantidades de corrente para o motor de partida visto que o banco de SCs (3 polos) tem um polo exclusivo (S+) para tal finalidade. O banco de SC não tem tensão própria, ele depende da tensão da bateria para o funcionamento.

A Figura 13 mostra o resultado da instalação real do modelo proposto anteriormente.

Figura 13 - Instalação real do banco de SCs no caminhão



Fonte: Autoria própria.

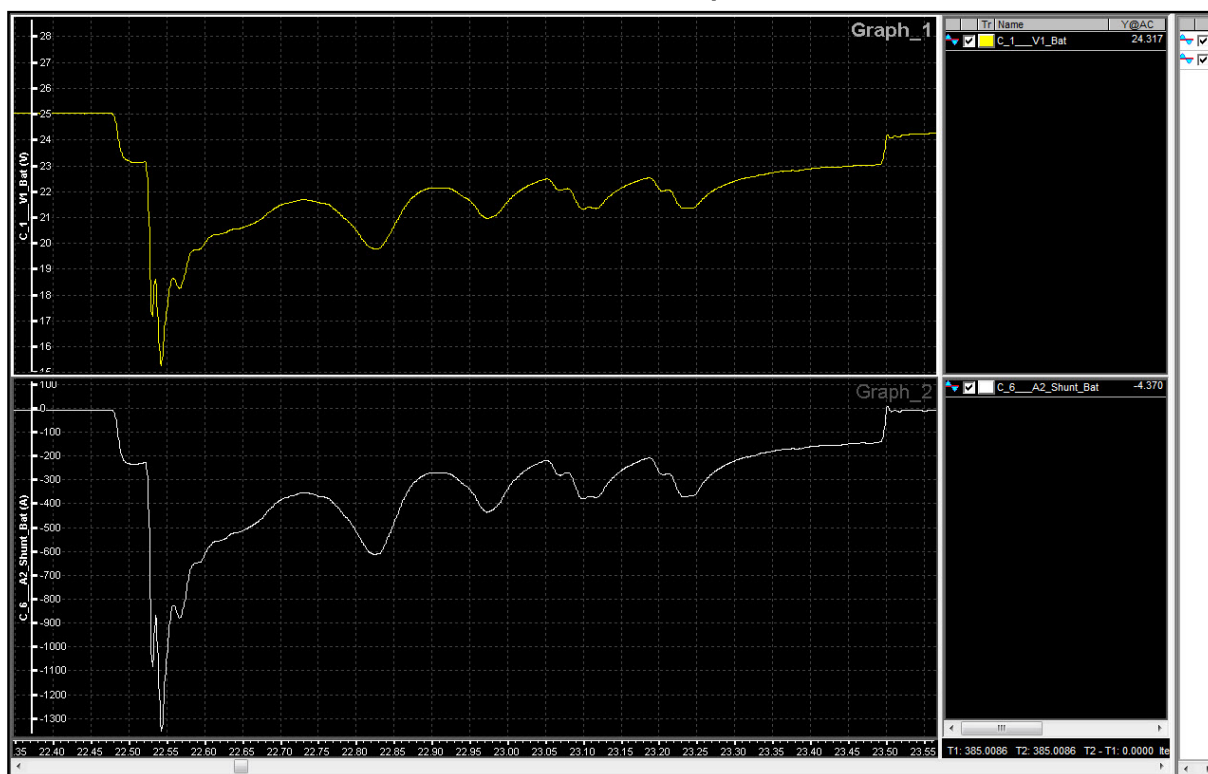
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para fins de comparação e análise de comportamento, todos os testes foram realizados no mesmo veículo, buscando as mesmas condições de ambiente e temperatura no momento da captação das informações.

3.1 TESTE I: CONDIÇÃO ORIGINAL DO VEÍCULO COM A BATERIA NOVA DE 225AH

O primeiro teste no veículo foi realizado para verificar o comportamento de partida original do caminhão. Para a realização do teste, foram captadas informações de corrente e tensão na bateria de 225Ah. O alicate amperímetro foi inserido no polo positivo para medir a corrente elétrica e a tensão elétrica foi captada utilizando o equipamento da Ipetronik conectado nos polos positivo e negativo da bateria. O Gráfico 4 mostra o comportamento de tensão (amarelo) e corrente (branco) da bateria em uma partida detalhada do veículo.

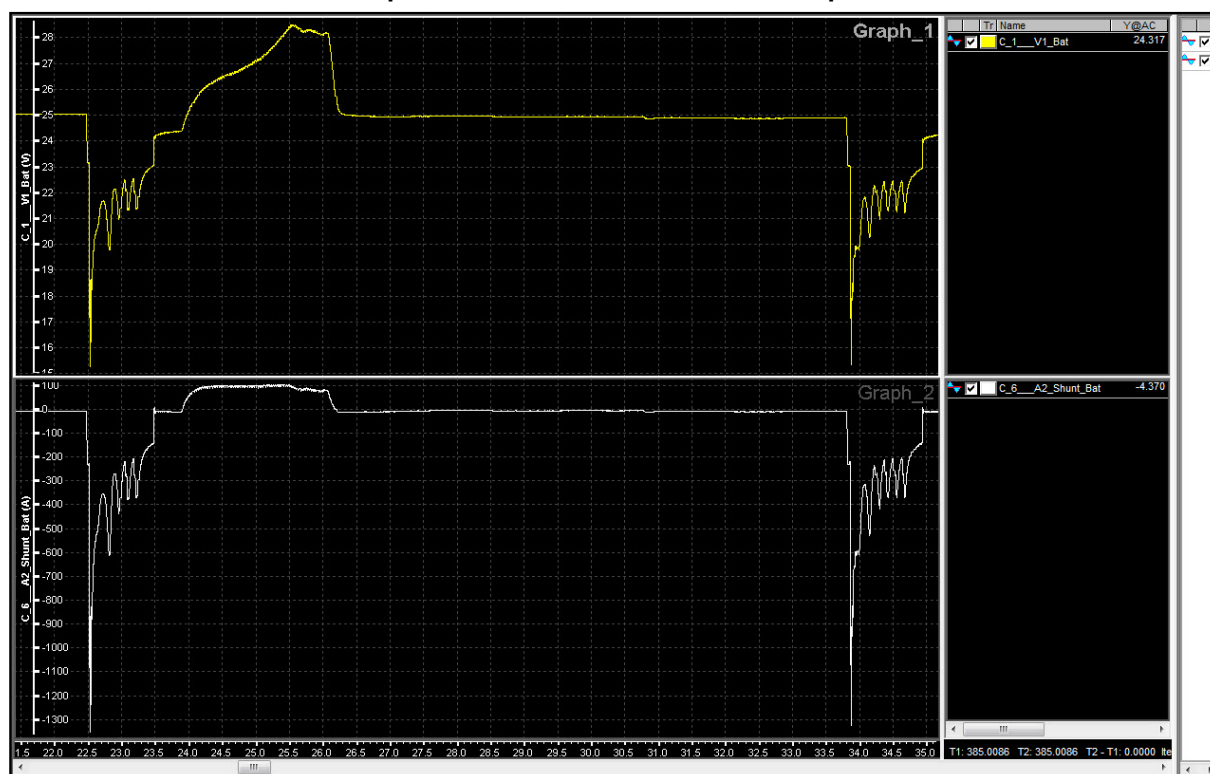
Gráfico 4 - Tensão e corrente de uma partida no caminhão



Fonte: Autoria própria.

Observando o comportamento da bateria no sistema de partida original do veículo, a 22,48s uma queda de aproximadamente -230A e 2V acontece quando o motor de partida acopla no virabrequim no motor do caminhão. Em seguida, um pico de corrente de aproximadamente -1350A a 22,54s ocorre para retirar o motor do caminhão do repouso. A variação da tensão no momento da partida sofre uma queda de 25V à 15V aproximadamente. Posteriormente, vários formatos de onda ocorrem até que o motor de partida seja desacoplado do motor. O Gráfico 5 apresenta o ciclo completo de uma partida no veículo.

Gráfico 5 - Ciclo completo de tensão e corrente de uma partida no caminhão



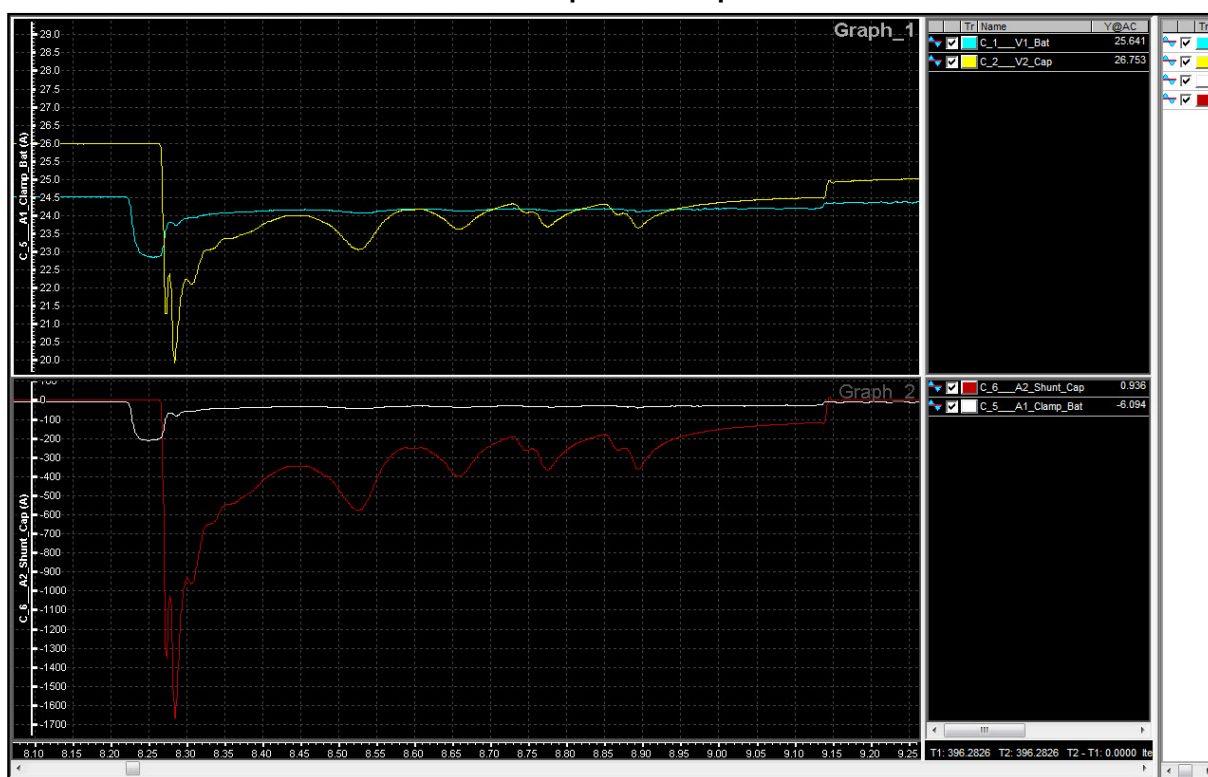
Fonte: Autoria própria.

É possível notar que o alternador entra em ação para carregar a bateria entre aproximadamente 23,9s e 26,1s fornecendo uma corrente de aproximadamente 100A. A partir deste momento, o veículo é desligado retornando a condição inicial de 0A e 25V. Em aproximadamente 33,8s, podemos observar um novo ciclo de partida muito semelhante ao primeiro realizado.

3.2 TESTE II: BATERIA NOVA DE 225AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES

O segundo teste no veículo foi realizado para verificar o comportamento de partida quando o banco de supercapacitores está instalado em paralelo com a bateria nova do caminhão. Para a realização do teste, foram captadas informações de corrente e tensão da bateria e do banco de SCs. O Gráfico 6 mostra o comportamento de tensão da bateria (azul), tensão do banco de SCs (amarelo), corrente da bateria (branco) e corrente do banco de SCs (vermelho) de uma partida detalhada no veículo.

Gráfico 6 - Tensão e corrente no sistema paralelo de partida com bateria nova de 225Ah



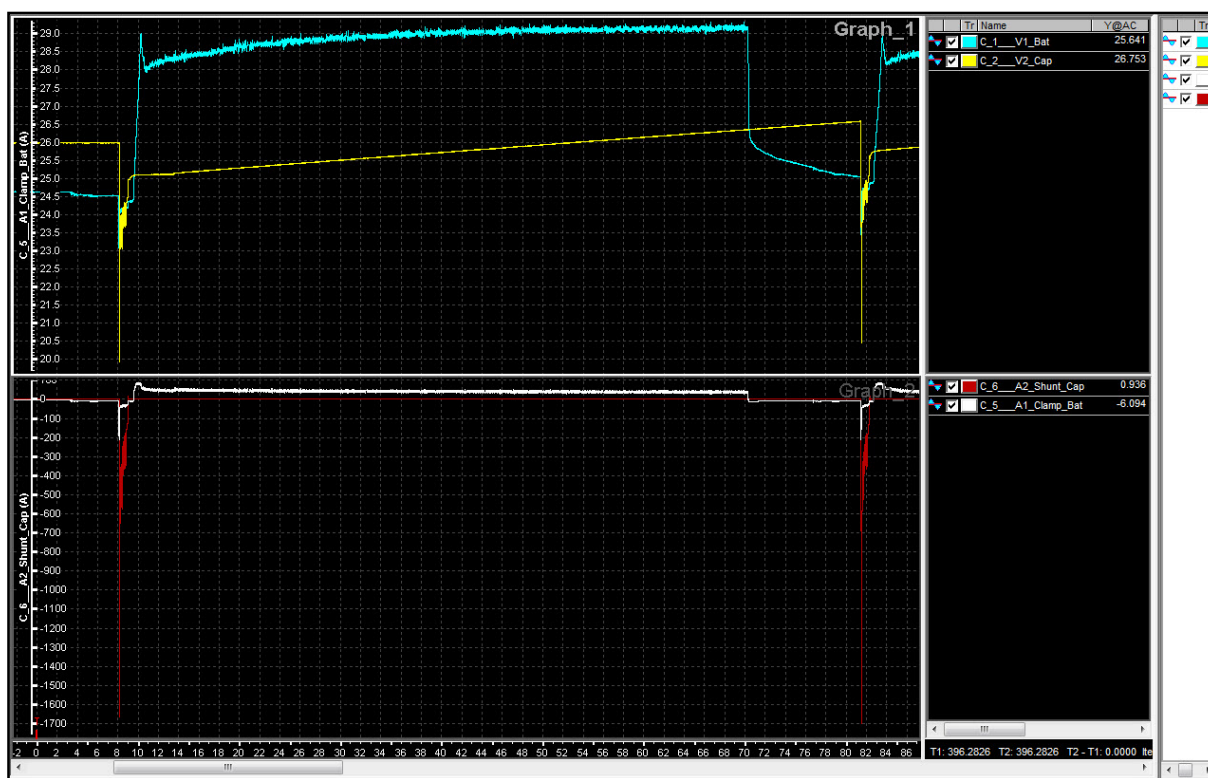
Fonte: Autoria própria.

Observando o comportamento do banco de SCs em paralelo com a bateria nova, a 8,22s uma queda na bateria de aproximadamente -200A e 1,7V acontece quando o motor de partida acopla no virabrequim do motor do caminhão. É interessante observar que as condições iniciais de tensão e corrente do banco de SCs permanecem inalteradas. Em seguida, um pico de corrente do banco de SCs de aproximadamente -1680A a 8,28s ocorre para acionar o motor do veículo. Neste momento, a bateria contribui com apenas -100A na partida do veículo devido a sua

resistência interna. É possível notar que bateria nesta configuração em paralelo contribui muito pouco na partida do veículo, cerca de aproximadamente 6%.

A variação da tensão do banco de SCs e da bateria no momento da partida sofre uma queda de aproximadamente 26V à 20V e 24,5V à 23,7V respectivamente. Posteriormente, a corrente e a tensão da bateria tendem a estabilizar nos padrões iniciais, enquanto vários formatos de ondas de corrente e tensão do banco de SCs ocorrem até que o motor de partida seja desacoplado do motor do caminhão. O Gráfico 7 apresenta o ciclo completo de uma partida no veículo com o veículo ligado por aproximadamente 60s.

Gráfico 7 - Ciclo completo de tensão e corrente do sistema paralelo com a bateria nova de 225Ah



Fonte: Autoria própria.

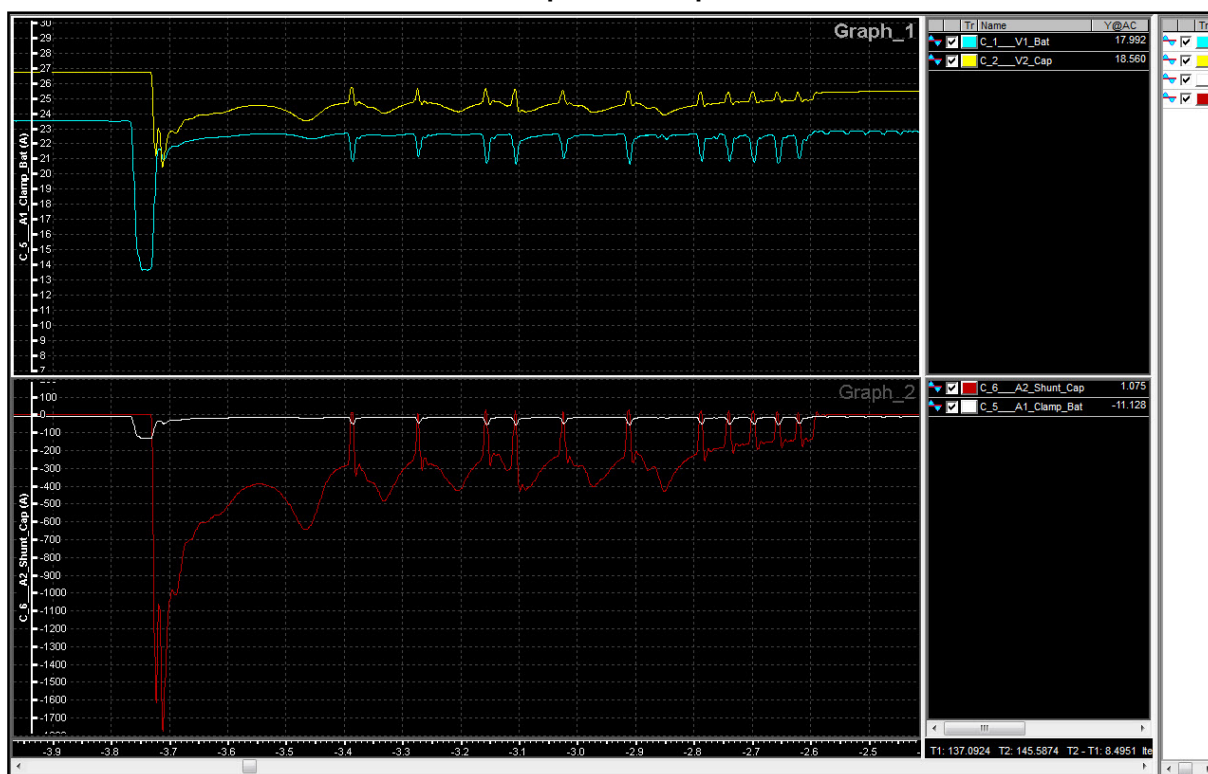
É possível notar que o alternador entra em ação para carregar a bateria e consequentemente o banco de SCs a 9,5s, fornecendo uma corrente média de aproximadamente 40A para a bateria. A partir dos 10s, com o veículo ligado, a bateria sofre um pico de tensão de 29V enquanto que o banco de SCs permanece carregando linearmente até o estágio inicial. No instante de 70,2 o veículo é desligado, a tensão da bateria sofre uma queda, porém, o banco de SCs continua absorvendo energia da bateria até atingir a tensão nominal de 26,5V. A partir deste momento, um novo ciclo

de partida acontece com características muito semelhantes a primeira partida realizada.

3.3 TESTE III: BATERIA USADA DE 225AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES

O terceiro teste no veículo foi realizado para verificar o comportamento de partida do veículo quando o banco de supercapacitores está instalado em paralelo com uma bateria usada no caminhão. Para a realização do teste, foram captadas informações de corrente e tensão da bateria e do banco de SCs. O Gráfico 8 mostra o comportamento de tensão da bateria (azul), tensão do banco de SCs (amarelo), corrente da bateria (branco) e corrente do banco de SCs (vermelho) de uma partida detalhada no veículo.

Gráfico 8 - Tensão e corrente no sistema paralelo de partida com a bateria usada de 225 Ah



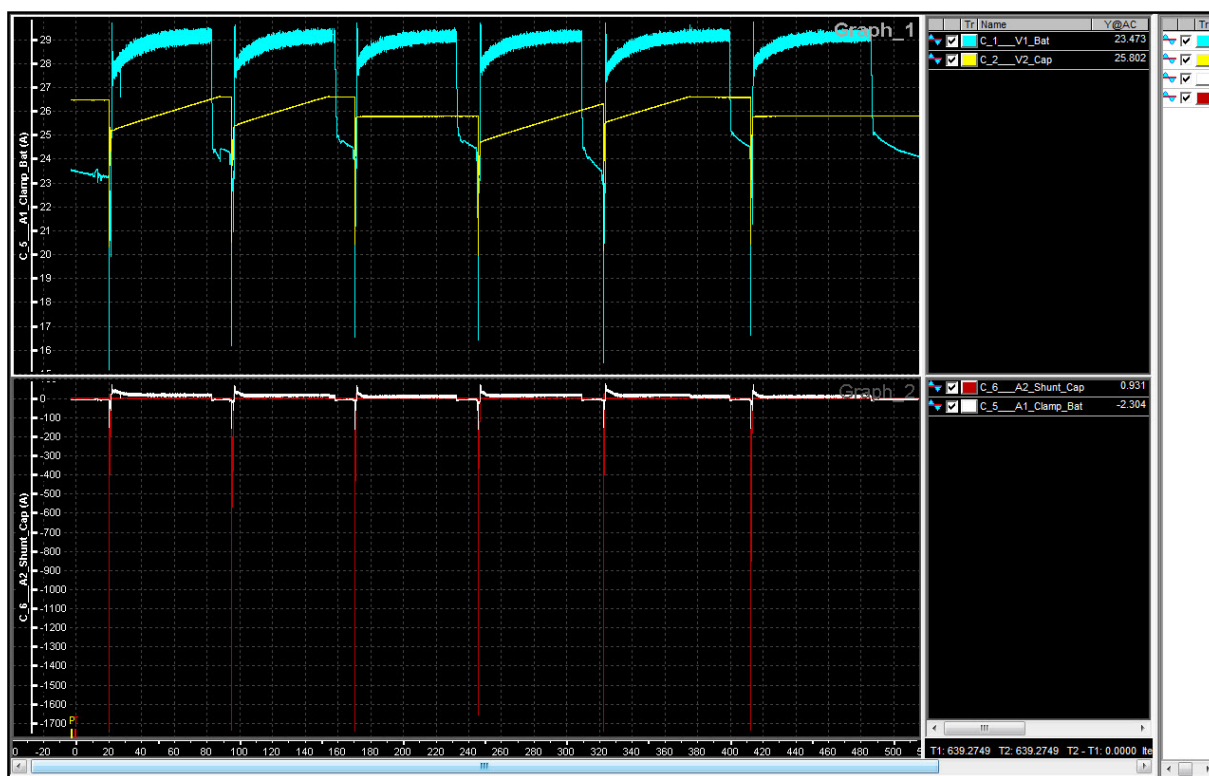
Fonte: Autoria própria.

Observando o comportamento do banco de SCs em paralelo com a bateria usada, a -3,75s uma queda de aproximadamente -120A e 9,7V acontece quando o motor de partida acopla no virabrequim do motor do caminhão. Se comparado com a bateria nova, a contribuição de corrente foi aproximadamente metade e a queda de

tensão -8V. Em seguida, um pico de corrente do banco de SCs de aproximadamente -1780A a -3,71s ocorre para acionar o motor do caminhão. Neste momento a bateria contribui com apenas -50A na partida do veículo devido a sua resistência interna.

A variação da tensão do banco de SCs e da bateria no momento da partida sofre uma queda de aproximadamente 26,9V à 20,5V e 23,6V à 13,8V respectivamente. Posteriormente, a corrente da bateria tende a estabilizar nos padrões iniciais, enquanto vários formatos de ondas irregulares de corrente e tensão do banco de SCs e da bateria ocorrem até que o motor de partida seja desacoplado do motor do caminhão. O Gráfico 9 apresenta seis ciclos completos de partidas no veículo com o veículo ligado por aproximadamente 60s em cada partida.

Gráfico 9 - Ciclo completo de seis partidas no veículo no sistema paralelo com a bateria usada de 225Ah



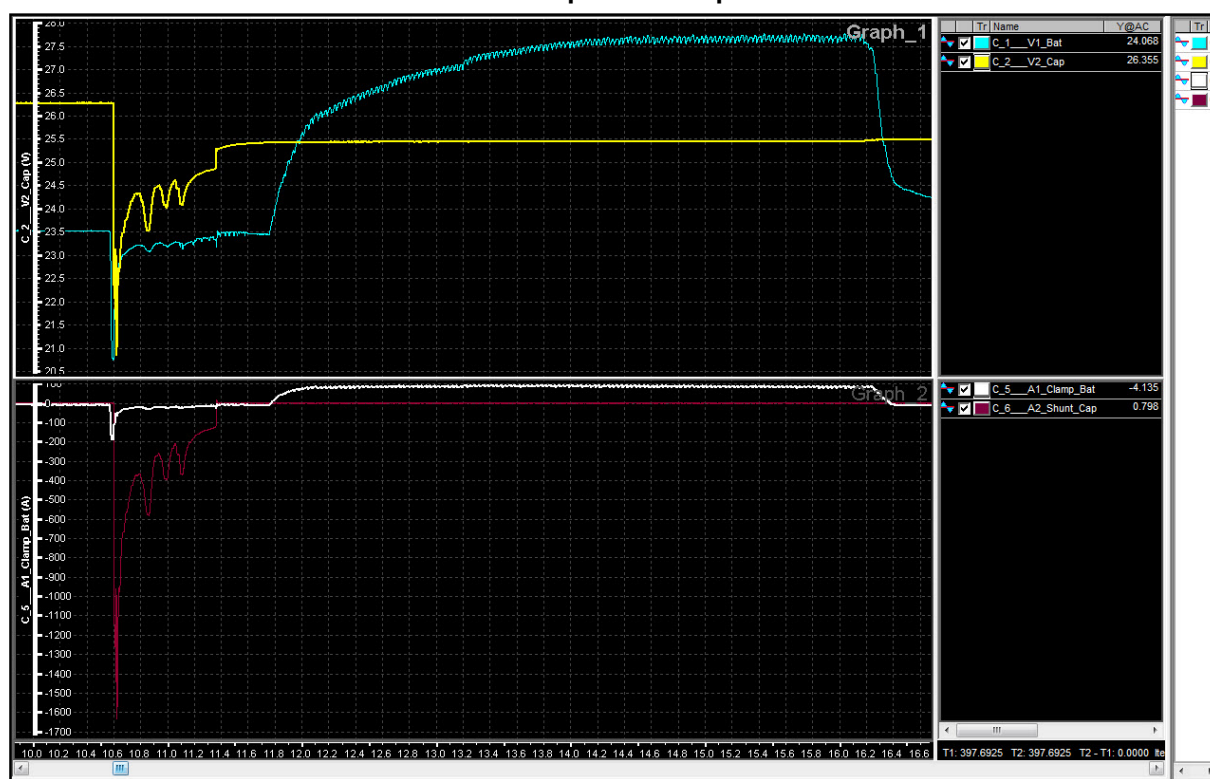
Fonte: Autoria própria.

É possível notar que o alternador entra em ação para carregar a bateria e consequentemente o banco de SCs de forma muito semelhante em todas as partidas. Basicamente a diferença está na rampa de tensão (amarelo) de carregamento do banco de SCs devido a estabilidade de tensão do componente a cada duas partidas consecutivas.

3.4 TESTE IV: BATERIA NOVA DE 110AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES

O quarto teste no veículo foi realizado com uma bateria nova de menor capacidade de armazenamento de 110Ah para verificar as divergências no comportamento de partida, quando o banco de supercapacitores está instalado em paralelo com a bateria do caminhão. Para a realização do teste, foram captadas informações de corrente e tensão da bateria e do banco de SCs. O Gráfico 10 mostra o comportamento de tensão da bateria (azul), tensão do banco de SCs (amarelo), corrente da bateria (branco) e corrente do banco de SCs (vermelho) de uma partida detalhada no veículo.

Gráfico 10 - Tensão e corrente no sistema paralelo de partida com a bateria nova de 110Ah



Fonte: Autoria própria.

Observando o comportamento do banco de SCs em paralelo com a bateria de menor capacidade, a 10,58s uma queda de aproximadamente -200A e 2,8V acontece quando o motor de partida acopla no virabrequim do motor do caminhão. É interessante observar que as condições iniciais de tensão e corrente do banco de SCs permanecem inalteradas. Em seguida, um pico de corrente do banco de SCs de aproximadamente -1620A a 10,61s ocorre para acionar o motor do caminhão. Neste

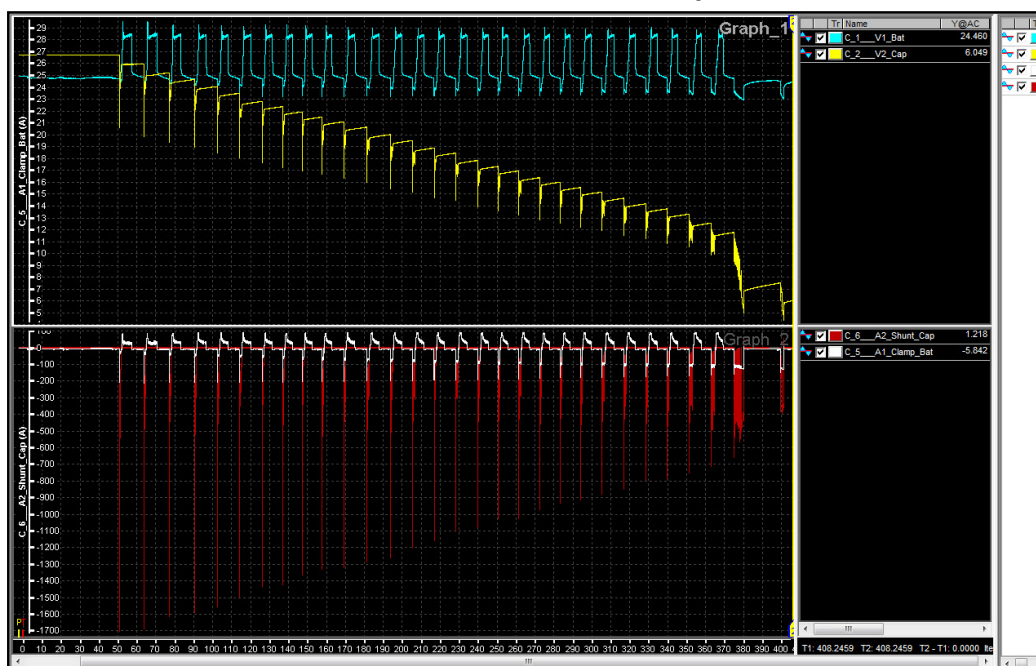
momento a bateria contribui com -200A na partida do veículo devido a sua resistência interna.

A variação da tensão do banco de SCs e da bateria no momento da partida sofre uma queda de aproximadamente 23,5V à 20,7V e 26,3V à 20,8V respectivamente. A 11,75s o alternador do caminhão é acionado para o carregamento da bateria e do banco de SCs. A corrente que chega até a bateria (branco) é de aproximadamente 100A enquanto que a corrente do banco de SCs não é afetada. A bateria é carregada a uma tensão (azul) crescente com pico máximo de 27,7V, enquanto que a tensão do banco de SCs cresce muito lentamente.

3.5 TESTE V: PARTIDAS SUCESSIVAS COM A BATERIA NOVA DE 225AH EM PARALELA COM O BANCO DE SUPERCAPACITORES

O quinto teste no veículo foi com o intuito de levar o funcionamento do sistema ao extremo, realizando várias partidas sucessivas com o banco de SCs em paralelo com a bateria do veículo, totalizando 28 partidas completas. Para a realização do teste, foram captadas informações de corrente e tensão da bateria e do banco de SCs. O Gráfico 11 mostra o comportamento de tensão da bateria (azul), tensão do banco de SCs (amarelo), corrente da bateria (branco) e corrente do banco de SCs (vermelho) de uma partida detalhada no veículo.

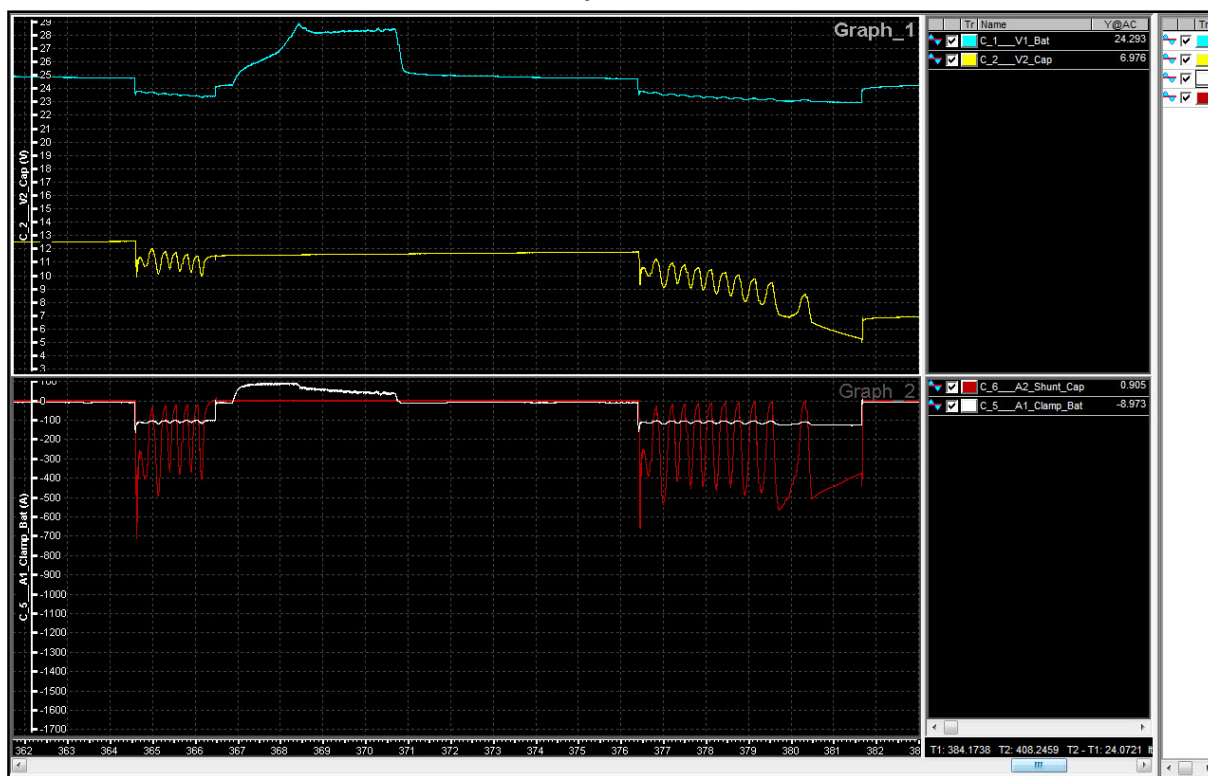
Gráfico 11 - Tensão e corrente no sistema de partidas sucessivas



Fonte: Autoria própria.

Observando o comportamento do banco de SCs em paralelo com a bateria nova de 225Ah na configuração de partidas sucessivas em um intervalo de aproximadamente 10s, tempo no qual o banco de SCs não consegue carregar, pode-se notar uma queda gradativa da tensão e da corrente do banco a cada partida, entre os limites de 26,8V à 10V e -1700A à -720A respectivamente. Diferentemente do banco de SCs, a tensão e a corrente da bateria do caminhão se manteve praticamente constante a cada partida realizada permanecendo entre os limites de 23V à 29V e -200A a 100A respectivamente. Após a 28ª partida, o banco de SCs não consegue fornecer uma tensão suficiente para girar o virabrequim do veículo conforme podemos observar no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Tensão e corrente no sistema de partidas sucessivas com a bateria boa de 225Ah



Fonte: Autoria própria.

É possível notar que se a tensão inicial do banco de SCs estiver abaixo de 13V, o mesmo fornece um pico de corrente de aproximadamente -700A, não sendo suficiente para acionar o motor de partida do veículo. Uma segunda tentativa de partida foi realizada a partir do segundo 376, porém, sem sucesso, chegando ao extremo do banco de SCs no limite de tensão em 5V.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste presente trabalho, foi possível ressaltar a importância dos supercapacitores aplicado na área automotiva. O mesmo pode contribuir na eficiência do sistema de partida do veículo, principalmente em baixíssimas temperaturas entre -20°C e -40°C se comparado às baterias de chumbo-ácido.

Mesmo com a instalação do banco de SCs, foi possível observar que a bateria do veículo contribui na partida do caminhão, fornecendo uma corrente relativamente pequena se comparada a corrente do banco de SCs, otimizando o tempo de vida útil da bateria chumbo-ácido, reduzindo o descarte das mesmas no meio ambiente. A degradação da bateria e conseqüentemente a redução da vida útil da mesma, vem justamente dos picos de corrente no momento da partida, problema este conhecido como sulfatação.

Quando o motor de partida acopla no virabrequim do motor, a queda de tensão na bateria velha (usada) é oito vezes maior se comparada à bateria nova e a contribuição de corrente na partida da bateria usada foi aproximadamente metade em relação à bateria nova, forçando a compensação por parte do banco de SCs na corrente de partida. A variação da tensão da bateria nova no momento da partida sofre uma queda de 0,8V enquanto que a bateria usada sofre uma variação de 9,8V. O resultado dos testes utilizando uma bateria de menor capacidade (110Ah) foi muito semelhante ao teste realizado com a bateria de maior capacidade (225Ah).

Se a bateria do veículo estiver totalmente descarregada, o banco de SCs não tem tensão suficiente para realizar a partida no veículo visto que a ligação entre os dispositivos é paralela. A bateria do veículo precisa ter uma tensão mínima para alimentar as unidades de controle básicas do veículo, caso contrário, não será possível realizar a partida no motor.

A instalação do banco de SCs no caminhão foi realizada com sucesso, seguindo as orientações do manual do fabricante e de acordo com as regras de segurança impostas pela Volvo do Brasil.

Com a evolução da tecnologia e com o aumento da densidade energética, futuramente os supercapacitores, por apresentarem altas densidades de potência, extremos de temperatura ambiente de trabalho superior a da bateria, baixíssima resistência interna, peso reduzido, vida útil elevada e centenas de milhares de ciclo carga/descarga, poderão substituir as baterias chumbo-ácido.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

DOUTOR_BATERIA. **Porque as baterias morrem prematuramente?** Copyright© Doutor Bateria, 2018. Disponível em: <<http://www.doutorbateriassa.com.br/tratamento/porque-as-baterias-morrem-prematuramente/>>. Acesso em: 15 set. 2018.

FERREIRA, André Augusto. **Sistema supervisorio de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos elétricos**. 2007. 219 f. Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 26 fev. 2007. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260860/1/Ferreira_AndreAugusto_D.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2018.

GRBOVIC, Petar J. **Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems: Analysis, Modeling and Design in Theory and Practice**. Somerset, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.

IMAMURA, M. S.; HELM, P.; PALZ, W. **Photovoltaic system technology: An european handbook**. 1. ed. Taylor & Francis, 1992. 566 p.

LSMTRON. **Manuals & User Guidelines**. Copyright © LS Mtron Ultracapacitor Biz team, 2016. Disponível em: <<http://www.ultracapacitor.co.kr/support/manuals-and-user-guidelines.html?list=v&p=1&n=9>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. 2. ed. United Kingdon: John Wiley & Sons, 2011. 1162 p.

MAXWELL. **Product Guide**: Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors, Doc. No. 1014627.1. Copyright© Maxwell Technologies®, Inc. 2009. Disponível em: <http://www.maxwell.com/images/documents/PG_boostcap_product_guide.pdf>. Acesso em: 17 set. 2018.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Pualo: Érica Ltda, 2012.

ZOBAA, Ahmed F. **Energy Storage: Technologies and Applications**. Published by InTech, 2013. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications>>. Acesso em: 10 ago. 2018.