



Recebido em: 05/05/2024.

Aceito em: 03/09/2024.

Revista SODEBRAS – Volume 19
Nº 222 – SETEMBRO/ DEZEMBRO - 2024

MODELO DE CARREGAMENTO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO

ELECTRIC BUS CHARGING MODEL CONNECTED TO THE DISTRIBUTION NETWORK

Jacques Henry Lambert¹
Rogerio Issamu Yamamoto²
Ricardo Janes³
Alex Lopes de Oliveira⁴
Victor Inacio de Oliveira⁵
Marcos Rosa dos Santos⁶

Resumo – *O presente trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade da implantação de ônibus elétricos em uma linha de transporte público em urbano. Para isso, foi desenvolvido um modelo de carregamento de ônibus elétricos utilizando o software MATLAB. O modelo foi testado para diferentes cenários, incluindo o carregamento de um, dois, cinco, dez e dezesseis ônibus elétricos simultaneamente. Os resultados mostraram que, independentemente da quantidade de ônibus, o modelo apresentou a mesma curva característica de carregamento e funcionamento. Além disso, não houve alteração no espectro de frequências, nas formas de onda de carregamento e nos valores de tensão e corrente com o uso de mais ônibus. Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a implantação de ônibus elétricos não representa um risco para a rede elétrica.*

Palavras-chave: *ônibus elétrico, carregamento de veículos elétricos, MATLAB, rede elétrica.*

Abstract - *This paper investigates the feasibility of deploying electric buses in an urban public transportation line. To this end, a model of electric bus charging was developed using the MATLAB software. The model was tested for different scenarios, including the charging of one, two, five, ten, and sixteen electric buses simultaneously. The results showed that, regardless of the number of buses, the model presented the same charging characteristic curve and operation. In addition, there was no change in the frequency spectrum, charging waveforms, and voltage and current values with the use of more buses. Based on the results obtained, it is possible to conclude that the deployment of electric buses does not represent a risk to the power grid.*

¹ Engenheiro Eletricista pela Universidade Presbiteriana Mackenzie.

² Doutor e Mestre em Engenharia de Controle e Automação Mecânica pela Escola Politécnica da USP

³ Doutor e Mestre em Engenharia Elétrica pela USP. Docente do Centro Universitário da FEI e da Mackenzie.

⁴ Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP (2000). Mestre em Sistemas Eletrônicos pela mesma instituição. Doutorando em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia pela Universidade Presbiteriana Mackenzie.

⁵ Doutor em Engenharia de Automação e Controle pela escola Politécnica da USP e Mestre em Física Aplicada pelo IFSC da USP. Docente da Faculdade Engenheiro Salvador Arena e da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

⁶ Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pelo Centro Universitário da FEI. Mestre em Sistemas de Potência pela Escola Politécnica da USP. Doutor em Sistemas de Potência, pela Escola Politécnica da USP. Docente da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Keywords: *electric bus, electric vehicle charging, MATLAB, power grid.*

I. INTRODUÇÃO

A falta de um sistema de transporte público coletivo de qualidade foi o principal motivo para a realização desta pesquisa, visando revisar os conceitos de transporte atualmente empregados e apresentar uma nova perspectiva de solução (Araújo *et al.* 2019). Segundo Moraes (2023) a crescente preocupação com o meio ambiente e os esforços para combater o aquecimento global têm levado autoridades e órgãos reguladores a estabelecerem exigências cada vez mais rigorosas em relação às emissões de gases de efeito estufa. Isso tem impulsionado estudos e avanços tecnológicos na área de energias limpas, incluindo o setor de transporte, conforme análise da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sobre ‘Mudanças climáticas e Transição energética’.

Diariamente, pode-se observar de forma evidente as consequências decorrentes de ações sem planejamento por parte de indivíduos, organizações e até mesmo países. Isso inclui o agravamento do efeito estufa, a ocorrência de chuva ácida, a diminuição dos recursos hídricos, a extinção de espécies e a grave poluição do ar (Campos, 2023). Esses problemas resultam em doenças na população e nos demais seres vivos, afetando constantemente a qualidade de vida de todos os indivíduos (Albuquerque, 2007).

Considerando que o setor de transporte é um dos principais responsáveis pela poluição global (Carvalho, 2011), este trabalho tem como foco verificar a viabilidade da implantação de ônibus elétricos em uma linha de transporte público em urbano. De acordo com o Relatório Integrado da Administração de São Paulo (SPtrans, 2020), a infraestrutura municipal oferece condições favoráveis e facilidades para uma possível transição do sistema. Elementos como corredores exclusivos e áreas disponíveis para reestruturação nas proximidades das linhas, tornam esse objetivo alcançável.

Segundo Boçon (2019), o aumento da utilização de veículos elétricos, resultando em um aumento de carregamentos residenciais, representa um novo tipo de carga a ser inserido na rede de distribuição de energia elétrica. Esta nova carga irá alterar as condições de operação da rede, principalmente aumentando consideravelmente a potência de ponta demandada.

Estas modificações nas cargas podem causar alguns impactos na qualidade da energia elétrica distribuída, como queda ou desequilíbrio de tensão e alguns impactos na própria rede e em alguns equipamentos, como sobrecarga de condutores e transformadores. A qualidade da energia elétrica distribuída é perdida quando se tem qualquer variação fora do padrão na magnitude, frequência e forma de onda da corrente ou tensão elétrica (Boçon, 2019).

Com relação à frequência, alguns equipamentos de residências e da própria rede de distribuição não suportam variações da frequência, sendo sensíveis e apresentando o risco de se danificarem, caso algum distúrbio deste tipo venha a acontecer. Por isso, por questões de segurança muitas partes do sistema são desligadas evitando prejuízos maiores, ocorrendo um blecaute. Com relação à tensão, variações na tensão fora do padrão nominal podem sobrecarregar as linhas, causando um colapso da rede e fadigando os equipamentos da rede (Boçon, 2019).

No entanto, o aumento do uso de ônibus elétricos também representa um desafio para o sistema elétrico de distribuição, que precisa lidar com a carga adicional dos veículos elétricos. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que simule a carga na rede de distribuição de energia elétrica gerada pelo uso de ônibus elétricos.

Para isso foi realizada a modelagem do sistema elétrico de distribuição num ambiente de simulação onde será analisado o impacto dos carregadores de ônibus elétricos, e criação de modelo de recarga de ônibus elétrico no MATLAB.

II. REVISÃO DA LITERATURA

A crescente demanda por mobilidade urbana limpa e sustentável tem levado a um aumento no uso de ônibus elétricos em várias cidades ao redor do mundo, conforme ‘Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico’ disponibilizado pela EPE. De acordo com BALTISSERA (2016), o uso de ônibus elétricos oferece benefícios significativos em termos de redução das emissões de gases de efeito estufa, melhoria na qualidade do ar e redução do ruído nas cidades.

2.1 Motor Elétrico

O motor elétrico é um dispositivo utilizado para converter energia elétrica em energia mecânica, responsável por gerar o movimento necessário para o funcionamento dos veículos elétricos. De acordo com LANA et al. (2013), os motores elétricos podem ser classificados em diferentes tipos, como motores de corrente contínua (DC) e motores de corrente alternada (AC). Cada um deles possui características distintas em relação ao desempenho, eficiência e controle de velocidade.

2.2 Bateria Elétrica

A bateria elétrica é um componente essencial nos veículos elétricos, sendo responsável pelo armazenamento da energia elétrica que alimenta o motor. Segundo CASTRO et al. (2010), as baterias utilizadas em ônibus elétricos são geralmente do tipo íon-lítio (Li-íon), devido à sua alta densidade energética e vida útil relativamente longa. No entanto, é importante considerar a capacidade de armazenamento, o tempo de recarga e a eficiência energética das baterias ao projetar o sistema de carregamento do ônibus elétrico.

2.3 Funcionamento de um Ônibus Elétrico

De acordo com DE SOUZA LIMA et al. (2019), o ônibus elétrico é alimentado pelo motor elétrico e pela energia armazenada na bateria. Durante a operação, o motor elétrico converte a energia elétrica da bateria em energia mecânica, que impulsiona o veículo. É importante considerar as curvas de demanda de carga do ônibus elétrico ao longo do dia para dimensionar o sistema de carregamento de forma adequada.

2.4 Modelo de Circuito no Matlab

O MATLAB é uma ferramenta amplamente utilizada para a simulação e modelagem de sistemas elétricos. Segundo LUNA FILHO (2017), é possível desenvolver modelos de circuitos elétricos no MATLAB para simular o funcionamento do sistema de carregamento de ônibus elétricos. Esses modelos podem considerar parâmetros como tensão de alimentação, corrente de carga, eficiência do carregador e características da bateria. Essa simulação permite avaliar o desempenho e o impacto do carregamento na rede elétrica.

2.5 Impacto na Rede Elétrica com a Conexão de Várias Cargas

A conexão de várias cargas de ônibus elétricos na rede elétrica pode gerar impactos. Conforme demonstrado por João Lima (2023), o carregamento simultâneo de ônibus elétricos múltiplos pode resultar em uma demanda de energia elétrica

concentrada em um curto período, causando sobrecarga e instabilidade na rede de distribuição. É fundamental desenvolver estratégias de gerenciamento de carga para evitar esses problemas, como a aplicação de técnicas de controle de demanda ou a adoção de sistemas de carregamento inteligentes.

2.6 Viabilidade do Uso de Ônibus Elétricos

A carga dos ônibus elétricos pode ser feita em momentos de baixa demanda de energia, como à noite, para minimizar o impacto na rede elétrica (Baltisserra, 2016).

O estudo realizado por Matos (2021) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) analisou o impacto do uso de ônibus elétricos na rede elétrica de distribuição e destacou a importância do uso de fontes renováveis de energia na geração de eletricidade para os ônibus elétricos.

Outro estudo realizado por Baltisserra (2016) na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) analisou a viabilidade técnica e econômica do uso de ônibus elétricos na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, e mostrou que o uso de ônibus elétricos é viável tanto tecnicamente quanto economicamente, especialmente quando combinado com a utilização de energia solar.

A Eletropaulo, concessionária que foi responsável pela distribuição de energia elétrica na cidade de São Paulo, também realizou um estudo que mostrou que a rede elétrica da cidade pode suportar a demanda de energia gerada pelo uso de ônibus elétricos, desde que haja um planejamento adequado do sistema elétrico, como adição de subestações e cabines primárias. A empresa destacou a importância da colaboração entre as empresas de transporte público e as concessionárias de energia elétrica para garantir a viabilidade do uso de ônibus elétricos (Bazani, 2018).

Um estudo realizado por Yuri Lima (2023) no instituto Unisinos analisou a implantação de um sistema de carregamento de ônibus elétricos em uma garagem de uma empresa de transporte público. O trabalho mostrou que a utilização de um sistema inteligente de carregamento, que prioriza o uso de energia renovável e distribui a carga ao longo do dia, pode representar um grande avanço em termos de sustentabilidade e redução da poluição. No entanto, esse avanço enseja atenções especiais em relação ao planejamento e gerenciamento da rede de distribuição de energia elétrica.

De acordo com Deb et al. (2018), o carregamento de veículos elétricos pode impactar negativamente a rede de distribuição elétrica, uma vez que requer alta demanda de energia elétrica em curtos períodos. Essa alta demanda pode gerar sobrecarga na rede elétrica, afetando a sua estabilidade. Nesse sentido, é importante realizar estudos e simulações para avaliar o impacto dos carregamentos de veículos elétricos na rede elétrica e desenvolver estratégias que permitam o gerenciamento adequado da carga, como proposto por Nimalsiri et al. (2021) para garantir a estabilidade da rede elétrica e a eficiência do carregamento dos veículos elétricos.

De acordo com Baltisserra (2016), a utilização de ferramentas de simulação de redes elétricas é essencial para a realização de estudos detalhados sobre o impacto do carregamento de veículos elétricos na rede de distribuição. Essas ferramentas permitem que sejam simulados diferentes cenários de carga, o que permite avaliar o desempenho da rede elétrica em condições extremas e projetar estratégias para o gerenciamento da carga.

Já o estudo realizado por Rocha (2019) mostra que o gerenciamento da carga de veículos elétricos pode ser realizado de diferentes formas, incluindo a utilização de sistemas inteligentes de gerenciamento de carga e a implementação de estratégias de carregamento em horários de menor demanda elétrica. Segundo os autores, a implementação dessas estratégias pode reduzir significativamente o impacto da carga

dos veículos elétricos na rede de distribuição, garantindo a estabilidade e o fornecimento de energia elétrica de qualidade para os usuários.

Outro aspecto importante a ser considerado é a capacidade da rede elétrica de suportar a demanda de veículos elétricos. Segundo reportagem do BAZANI (2018), a rede elétrica da cidade de São Paulo já é capaz de suportar a demanda de todos os ônibus da cidade se eles fossem elétricos. No entanto, o estudo realizado por SILVA (2019) aponta que, em algumas regiões do país, a capacidade da rede de distribuição pode ser um obstáculo para a expansão do uso de veículos elétricos.

Segundo Júnior et al. (2021), a utilização de veículos elétricos no transporte público pode trazer inúmeros benefícios, como a redução da poluição, a melhoria da qualidade do ar e a redução dos custos operacionais. No entanto, esses benefícios só serão alcançados se forem adotadas medidas para garantir a estabilidade e a qualidade da rede de distribuição elétrica.

2.7 Implantação de Veículos Elétricos no Transporte Público

Em resumo, é possível afirmar que o desenvolvimento de um modelo para o carregamento de veículos elétricos na rede de distribuição requer a realização de estudos detalhados sobre o impacto desses carregamentos na rede elétrica e a implementação de estratégias para o gerenciamento do aumento na demanda de energia elétrica para a recarga desses veículos, tendo em vista que as sobrecargas na rede elétrica podem causar interrupções no fornecimento de energia elétrica. Por isso, é necessário um planejamento adequado da expansão da rede elétrica e a implementação de sistemas inteligentes de gerenciamento de carga, visando garantir a confiabilidade e a estabilidade do sistema elétrico (Silva, 2019).

Um exemplo de solução para esse problema é o uso de tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio e supercapacitores, que podem ser usados para reduzir picos de demanda e fornecer energia em horários de pico. Além disso, os sistemas de gerenciamento de carga inteligente, que monitoram a demanda de energia em tempo real e fazem ajustes automáticos na carga, também representam uma opção viável para evitar sobrecargas na rede elétrica (Costa, 2016).

A implementação de veículos elétricos no transporte público é uma alternativa viável e benéfica, porém, é importante destacar que a expansão dessa tecnologia deve ser acompanhada de um planejamento adequado da infraestrutura elétrica, com o uso de tecnologias inteligentes de gerenciamento de carga e armazenamento de energia, visando garantir a confiabilidade e a estabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, será possível aproveitar todos os benefícios que a mobilidade elétrica pode oferecer, sem comprometer a segurança e a qualidade do fornecimento de energia elétrica (Pereira, 2017).

III. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica para embasamento teórico, coleta de dados junto a empresas de transporte público e fabricantes de ônibus elétricos, utilização de softwares de simulação, a partir dos modelos desenvolvidos. As limitações e considerações pertinentes estão devidamente discutidas ao longo da seção

Foram analisadas as diferentes tecnologias de carregadores elétricos disponíveis, como carga lenta, carga rápida e carga ultrarrápida, bem como as características das baterias utilizadas nos ônibus elétricos.

Foi desenvolvido um modelo de recarga de ônibus elétrico utilizando o software MATLAB. Esse modelo considerou a capacidade de carga dos carregadores elétricos, a capacidade de carregamento das baterias dos ônibus elétricos e outros parâmetros relevantes. Com base nesse modelo, foi possível simular e analisar o processo de recarga dos ônibus elétricos, levando em conta diferentes cenários e condições. Nesse modelo, são considerados o ponto de entrada de energia trifásica, além dos pontos de carregamento dos ônibus elétricos

Foi utilizada a linha de ônibus municipal de São Paulo, 809A-10 Jardim D’Abril – Terminal Pinheiros, por essa linha ser relativamente plana, para efeito dos estudos, supondo que todos os veículos desta linha fossem elétricos e que necessitassem de serem carregados ao mesmo tempo na mesma proporção ao final do dia. Conforme consultado com SPTRANS (2023), em dias úteis no sentido ao Terminal Pinheiros, no período das 5 às 7hs a linha chega a alcançar o pico de 16 veículos em toda a linha simultaneamente. A partir desta informação, foi utilizado o limite de 16 carregadores para veículos elétricos no software de simulação MATLAB.

Figura 1 - Consulta da linha 809A-10 no sistema SPTrans

Número da Linha: 809A-10 **Nome da Linha:** JD. D'ABRIL - TERM. PINHEIROS

Área: 8 **Consórcio:** CONSÓRCIO TRANSVIDA **Empresa:** TRANSPPASS TRANSPORTE DE PASSAGEIROS LTD

DADOS GERAIS

PARTIDAS POR SENTIDO

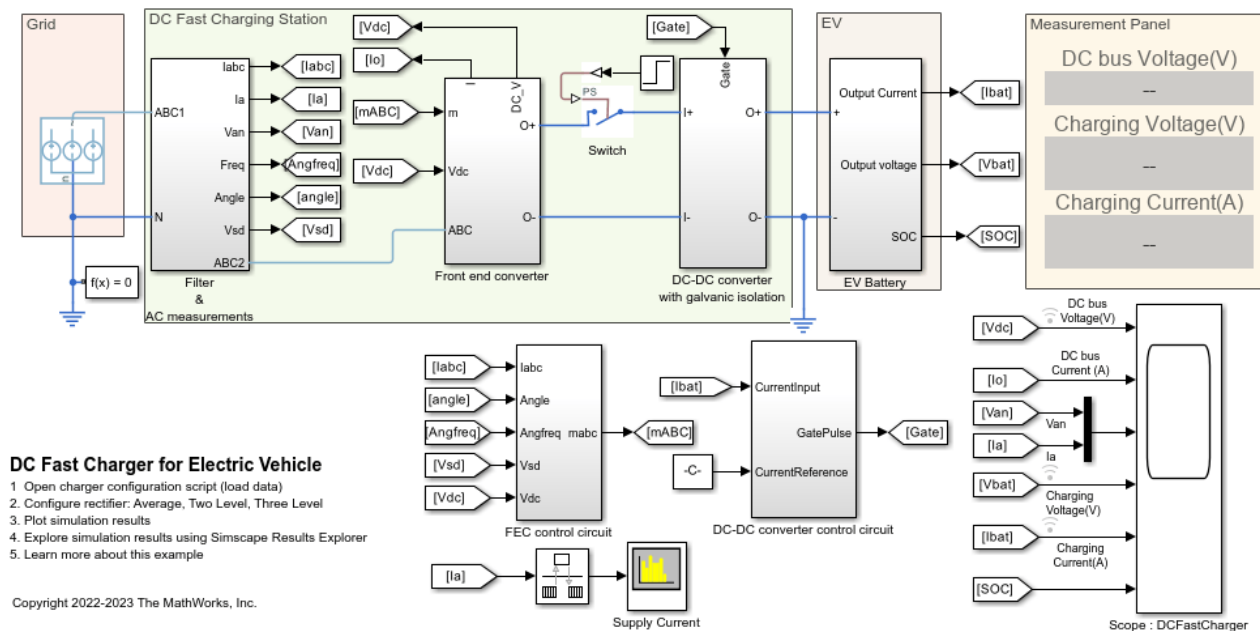
Tipo de Dia: **Útil** Ponto Inicial: indo para TERM. PINHEIROS Ponto Final: indo para JD. D'ABRIL

FAIXA HORÁRIA	TOTAL DE PARTIDAS	HORÁRIOS PROGRAMADOS * (Veículo Acessível)
04:00 - 04:59	3	04:30 - 04:40 - 04:50
05:00 - 05:59	7	05:00 - 05:09 - 05:18 - 05:26 - 05:34 - 05:43 - 05:51
06:00 - 06:59	9	06:00 - 06:06 - 06:12 - 06:18 - 06:24 - 06:33 - 06:41 - 06:50 - 06:57
07:00 - 07:59	6	07:07 - 07:18 - 07:30 - 07:40 - 07:48 - 07:56

Fonte: SPTrans, (2023)

Após análise das tecnologias de carregadores para veículos elétricos disponíveis, foi utilizado o modelo de carregamento rápido para veículo elétrico (DC Fast Charger for Electric Vehicle) disponível no MATLAB (Mathworks, 2023). Este modelo foi adicionado ao MATLAB, versão 2023b, através do comando “openExample('simscapeelectrical/DCFastChargerExample’)”. Por meio deste comando, o modelo de carregamento rápido para veículo elétrico foi aberto no MATLAB Simulink:

Figura 2 – DC Fast Charger for Electric Vehicle



Fonte: MATHWORKS (2023)

No script do modelo, a frequência foi alterada para 60Hz. Clicou-se em ‘Run’ para que as alterações fossem acatadas, e o script foi salvo como “ee_dc_fast_charger_data_60Hz”:

Figura 3 – Alteração do script do modelo de carregamento para veículo elétrico para 60Hz

```

Normal
Code Control Task Refactor Run Run and Advance Run Step Stop
TEXT CODE SECTION RUN

OneDrive - Church of Jesus Christ Desktop Henry TCC
Live Editor - C:\Users\marcellayvesdasilva\OneDrive - Church of Jesus Christ\Desktop\Henry\TCC\ee_dc_fast_charger_data_60Hz.mlx
ee_dc_fast_charger_data_60Hz.mlx

Rectifier - Front-End Converter
1 rectifier.ACVoltagePP = 415; % V % RMS value of Phase- phase voltage
2 rectifier.ACVoltagePN = rectifier.ACVoltagePP/sqrt(3); % V % RMS value of Phase- phase voltage
3 rectifier.ACVoltagePeak = rectifier.ACVoltagePN * sqrt(2); % V
4 rectifier.DCcurrent = 700; % A
5 rectifier.DCVoltage = 800; % V
6
7 rectifier.SystemFrequency = 60; % Hz
8 rectifier.SwitchFrequency = 10e3; % Hz
9
10 rectifier.minVdcPossible = rectifier.ACVoltagePP*sqrt(2/3)/0.5; % V
11 rectifier.acCurrent = sqrt(2)*rectifier.DCcurrent*rectifier.DCVoltage/(sqrt(3)*rectifier.ACVoltagePP);
12
13 rectifier.maxLval = 0.95*((rectifier.DCVoltage*0.5)-rectifier.ACVoltagePP*sqrt(2/3))/(2*pi*rectifier.;
14 rectifier.maxACcurrent = 100; % A
15 rectifier.minACcurrent = -100; % A
16 rectifier.maxACVoltage = 515; % V
17 rectifier.minACVoltage = -515; % V
18 rectifier.minDCVoltage = 0.5*rectifier.DCVoltage; % V
19
20 rectifier.lineInductance = 0.1e-3; % H
21 rectifier.lineResistance = 20e-3; % ohm
22

```

Fonte: Autor.

O número de carregadores para veículos elétricos foi aumentado gradativamente, buscando compreender se havia alteração no espectro de frequências, nas formas de onda de carregamento, e nos valores de tensão e corrente dos carregadores simultâneos.

As TAGs dos blocos originais foram renomeadas para facilmente indicar que fazem parte do 1º carregador para veículo elétrico, conforme a tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – TAGs renomeadas para o 1º Carregador para Veículo Elétrico

Nome da TAG no Bloco Original	Nome da TAG Renomeada para o 1º Carregador para Veículo Elétrico
Angfreq	Angfreq1
angle	Angle1
Gate	Gate1
Ia	Ia1
Iabc	Iabc1
Ibat	Ibat1
Io	Io1
mABC	mABC1
SOC	SOC1
Van	Van1
Vbat	Vbat1
Vdc	Vdc1
Vsd	Vsd1

Fonte: Autor.

O modelo de carregamento rápido duplo para veículos elétricos foi obtido através da cópia de todos os blocos do modelo de carregamento rápido para veículo elétrico (DC Fast Charger for Electric Vehicle) (MATHWORKS, 2023), excetuando-se a cópia do bloco ‘grid’, que simula a entrada da rede elétrica trifásica/ponto de conexão. Com a cópia dos blocos, eles são automaticamente renomeados para não haver duplicidade, como no caso ‘Filter & AC measurements1’ renomeado para ‘Filter & AC measurements2’, e assim subsequente para os blocos copiados. As TAGs dos blocos copiados, ou seja, as TAGs duplicadas foram renomeadas manualmente para facilmente indicar que fazem parte do 2º carregador para veículo elétrico, conforme a tabela a seguir:

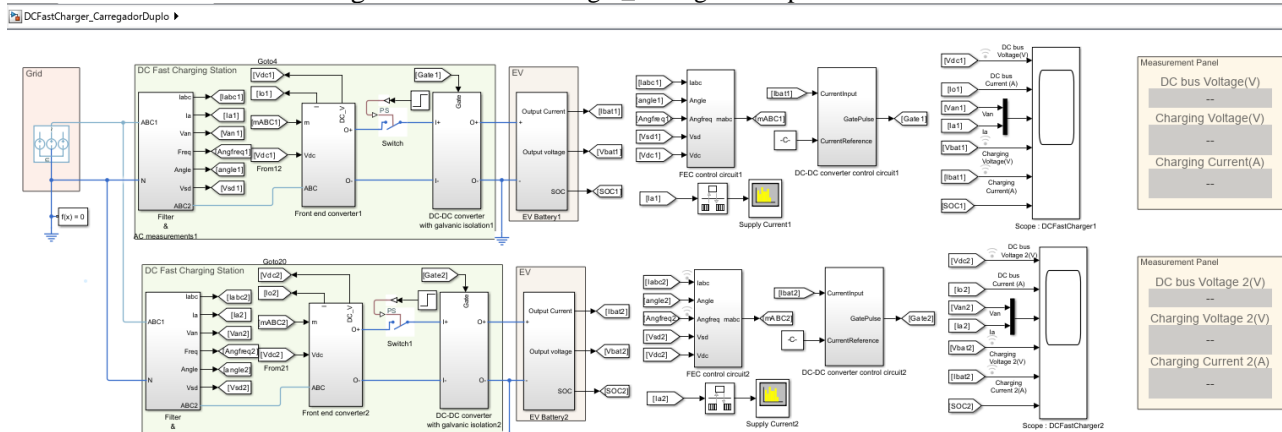
Tabela 2 – TAGs renomeadas para o 2º Carregador para Veículo Elétrico

Nome da TAG do 1º Carregador para Veículo Elétrico	Nome da TAG Renomeada para o 2º Carregador para Veículo Elétrico
Angfreq1	Angfreq2
Angle1	Angle2
Gate1	Gate2
Ia1	Ia2
Iabc1	Iabc2
Ibat1	Ibat2
Io1	Io2
mABC1	mABC2
SOC1	SOC2
Van1	Van2
Vbat1	Vbat2
Vdc1	Vdc2
Vsd1	Vsd2

Fonte: Autor.

O modelo de carregamento rápido duplo para veículos elétricos foi salvo como ‘DCFastCharger_CarregadorDuplo’:

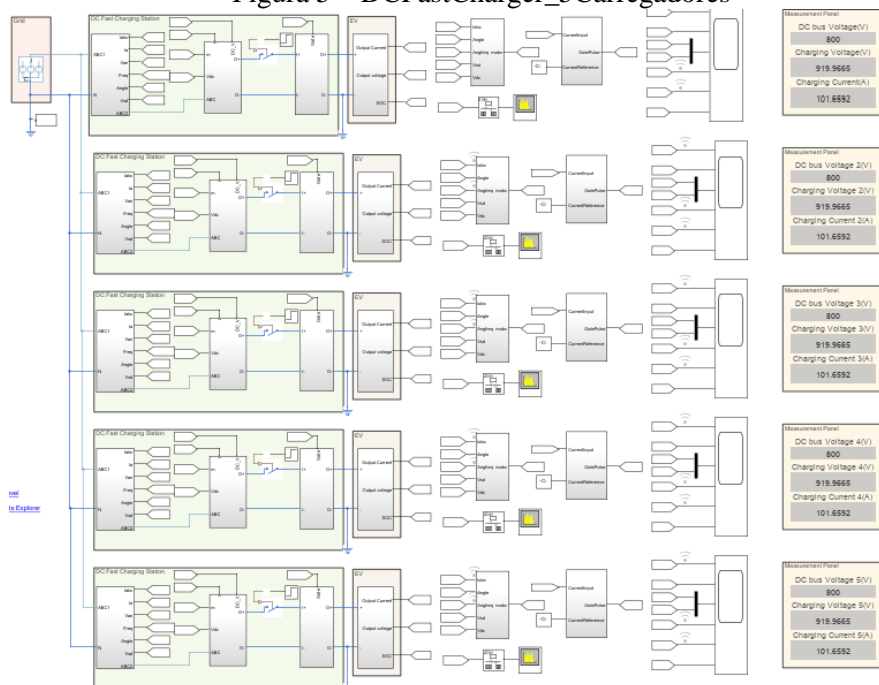
Figura 4 – DCFastCharger_CarregadorDuplo



Fonte: Autor.

Semelhantemente, o modelo de carregamento rápido para cinco veículos elétricos simultâneos foi obtido através da cópia de todos os blocos do modelo de carregamento rápido duplo para veículo elétrico, excetuando-se a cópia do bloco ‘grid’, que simula a entrada da rede elétrica trifásica/ponto de conexão. As TAGs dos blocos copiados, ou seja, as TAGs duplicadas foram renomeadas manualmente para facilmente indicar as que fazem parte do 3º, 4º e 5º carregador para veículo elétrico, como por exemplo ‘Angfreq3’, ‘Angfreq4’ e ‘Angfreq5’, e assim subsequente para todas as TAGs dos carregadores para veículos elétricos. O modelo de carregamento rápido para cinco veículos elétricos simultâneos foi salvo como ‘DCFastCharger_5Carregadores’:

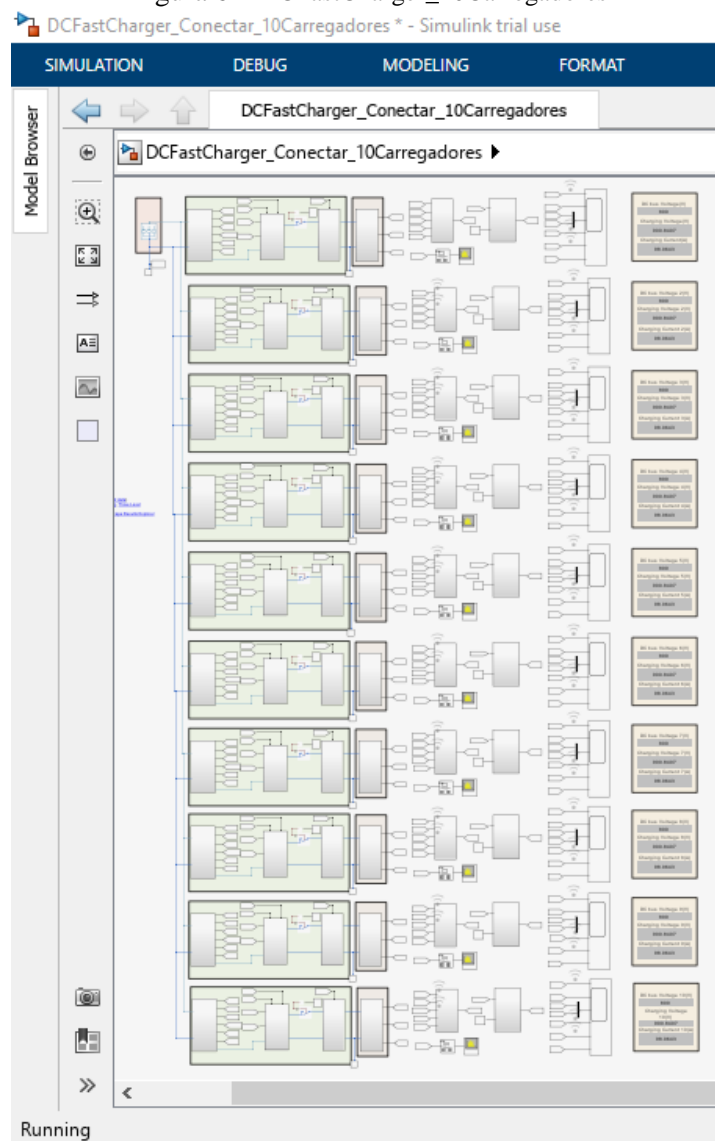
Figura 5 – DCFastCharger_5Carregadores



Fonte: Autor.

Semelhantemente, o modelo de carregamento rápido para 10 veículos elétricos simultâneos foi obtido através da cópia de todos os blocos do modelo de carregamento rápido para cinco veículos elétricos simultâneos, excetuando-se a cópia do bloco ‘grid’, que simula a entrada da rede elétrica trifásica/ponto de conexão. As TAGs dos blocos copiados, ou seja, as TAGs duplicadas foram renomeadas manualmente para facilmente indicar as que fazem parte do 6º, 7º 8º, 9º e 10º carregador para veículo elétrico, como por exemplo ‘Angfreq6’, ‘Angfreq7’, ‘Angfreq8’, ‘Angfreq9’ e ‘Angfreq10’, e assim subsequente para todas as TAGs dos carregadores para veículos elétricos. O modelo de carregamento rápido para 10 veículos elétricos simultâneos foi salvo como ‘DCFastCharger_10Carregadores’.

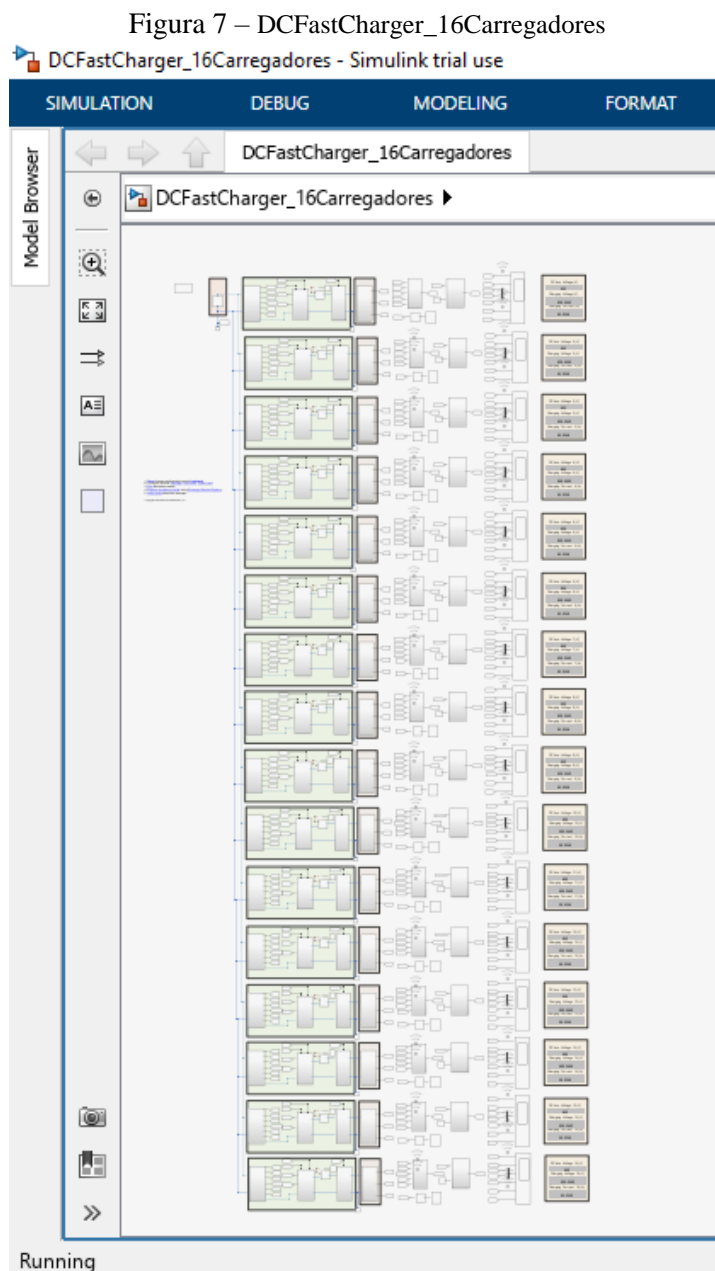
Figura 6 – DCFastCharger_10Carregadores



Fonte: Autor.

Semelhantemente, o modelo de carregamento rápido para 16 veículos elétricos simultâneos foi obtido através da cópia de todos os blocos do modelo de carregamento rápido para 10 veículos elétricos simultâneos, excetuando-se a cópia do bloco ‘grid’, que simula a entrada da rede elétrica trifásica/ponto de conexão. As TAGs dos blocos copiados, ou seja, as TAGs duplicadas foram renomeadas manualmente para facilmente

indicar as que fazem parte do 11º, 12º 13º, 14º, 15º e 16º carregador para veículo elétrico, como por exemplo ‘Angfreq11’, ‘Angfreq12’, ‘Angfreq13’, ‘Angfreq14’, ‘Angfreq15’ e ‘Angfreq16’, e assim subsequente para todas as TAGs dos carregadores para veículos elétricos. O modelo de carregamento rápido para 16 veículos elétricos simultâneos foi salvo como ‘DCFastCharger_16Carregadores’.



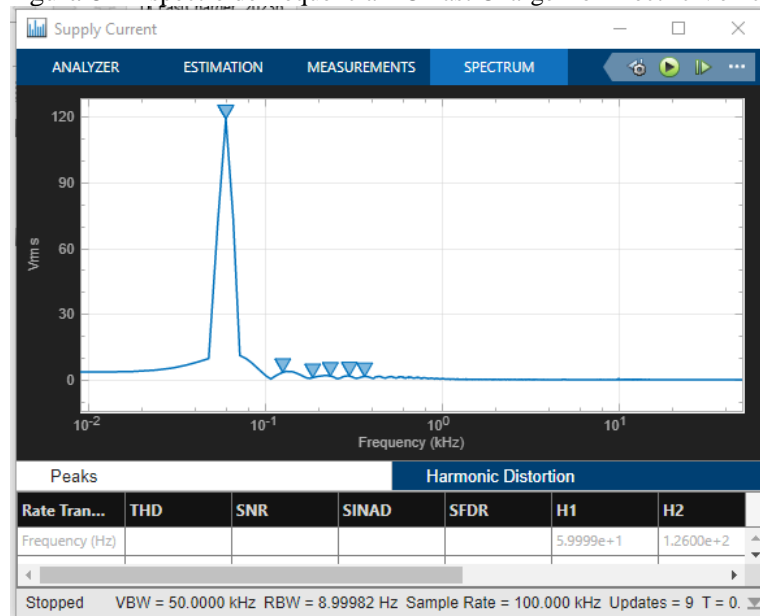
Fonte: Autor.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o modelo de carregamento rápido para veículo elétrico, considerando um carregador (DC Fast Charger for Electric Vehicle) disponível no MATLAB (MATHWORKS, 2023) alterado para a frequência de 60HZ, no Simulink, ao clicar em

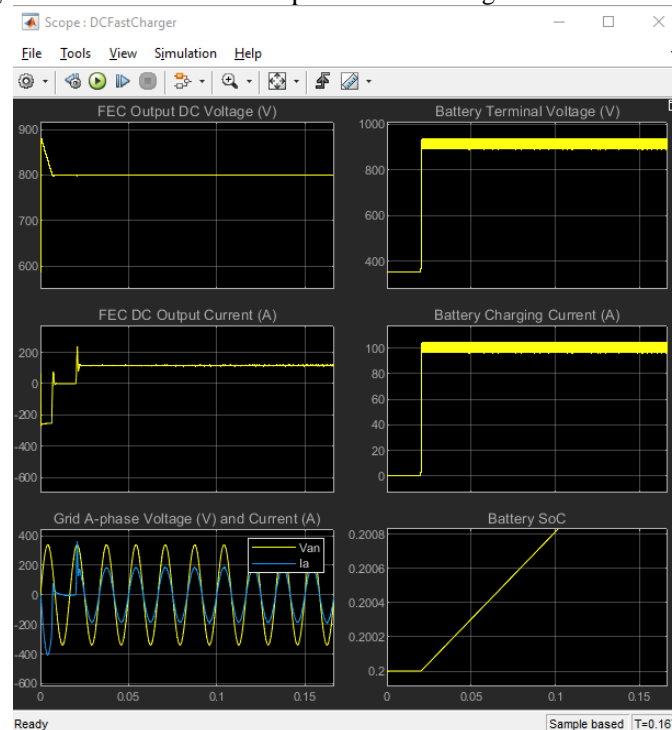
'Run', foram obtidos os seguintes gráficos de espectro de frequências, ondas no osciloscópio e valores de tensão e corrente:

Figura 8 – Espectro de frequência DC Fast Charger for Electric Vehicle



Fonte: Autor.

Figura 9 – Saídas Osciloscópio DC Fast Charger for Electric Vehicle



Fonte: Autor.

Figura 10 – Painel de Tensão e Corrente DC Fast Charger for Electric Vehicle

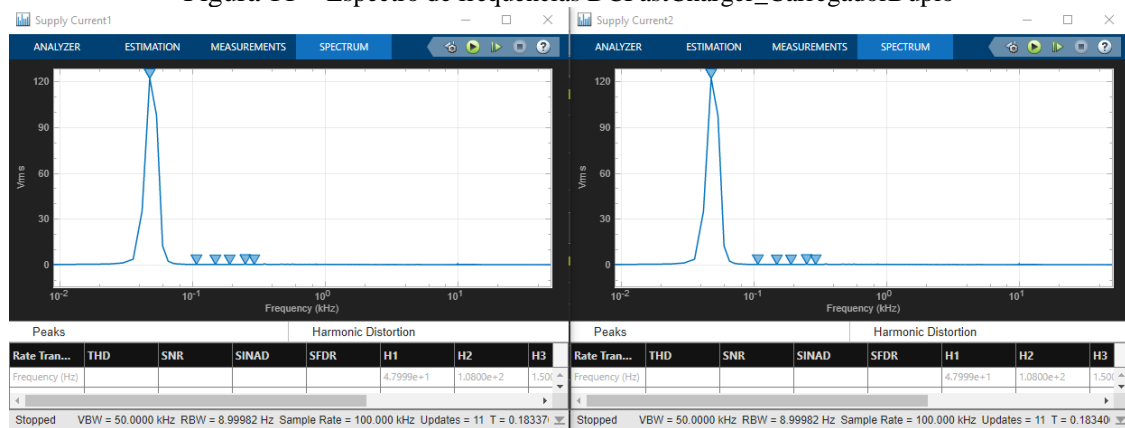
Measurement Panel	
DC bus Voltage(V)	800
Charging Voltage(V)	896.7751
Charging Current(A)	97.5145

Fonte: Autor.

Foi verificado que o modelo realiza suas funções adequadamente, de forma que o gráfico de espectros fornece uma frequência próxima de 60Hz, uma corrente constante do carregador a bateria em torno de 100 A, e uma tensão constante de carregamento próxima de 900V.

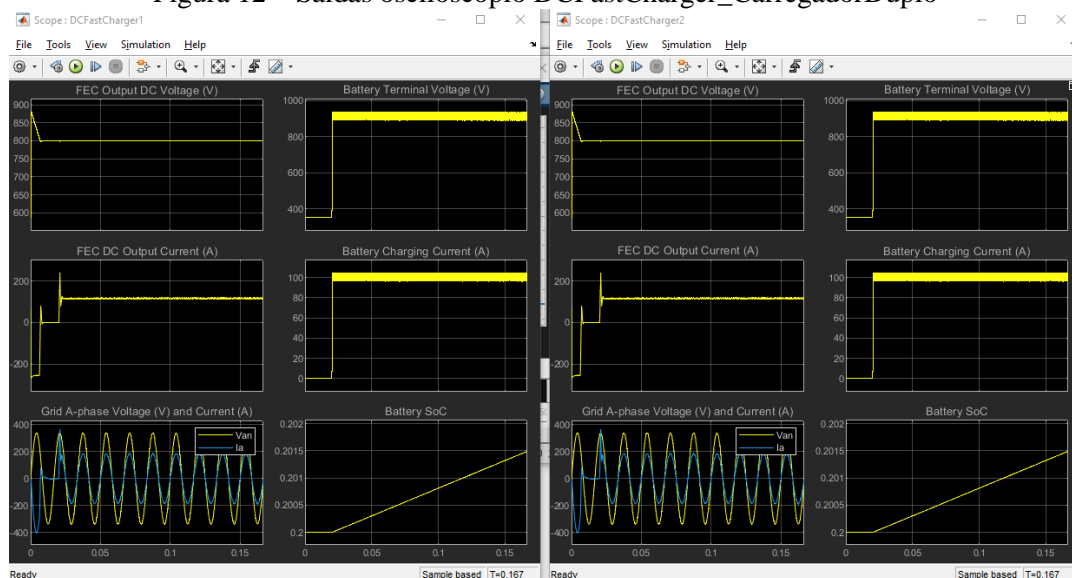
Para o 'DCFastCharger_CarregadorDuplo', ao clicar em 'Run', foram obtidos os seguintes gráficos de espectro, ondas no osciloscópio e valores de tensão e corrente:

Figura 11 – Espectro de frequências DCFastCharger_CarregadorDuplo



Fonte: Autor.

Figura 12 – Saídas osciloscópio DCFastCharger_CarregadorDuplo



Fonte: Autor.

Figura 13 – Painel de Tensão e Corrente DCFastCharger_CarregadorDuplo

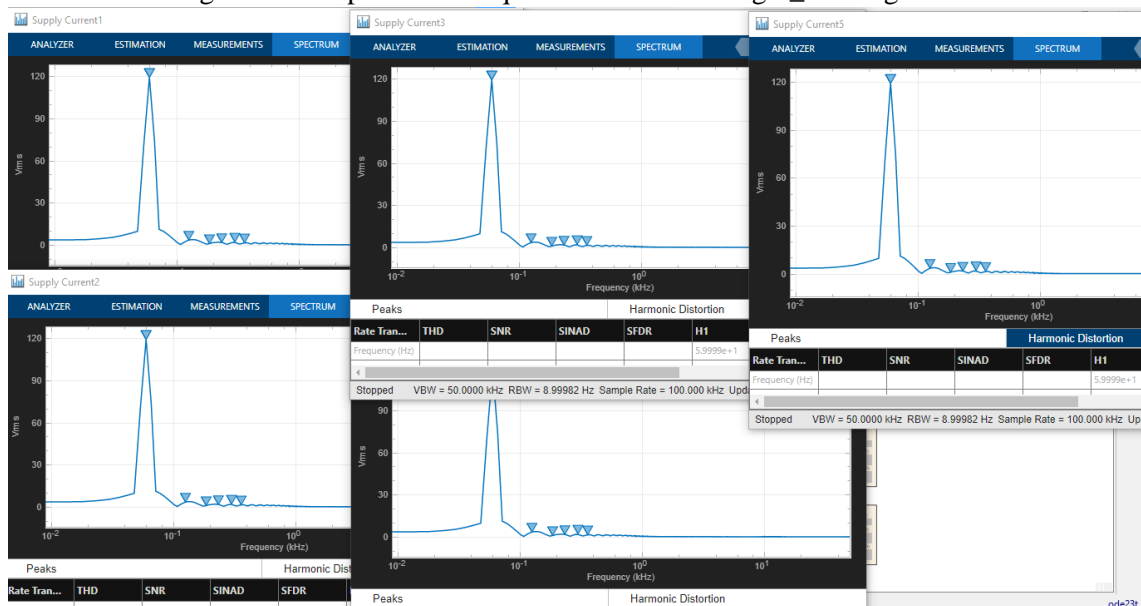
Measurement Panel		Measurement Panel	
DC bus Voltage(V)	800	DC bus Voltage 2(V)	800
Charging Voltage(V)	904.5693	Charging Voltage 2(V)	904.5693
Charging Current(A)	98.9074	Charging Current 2(A)	98.9074

Fonte: Autor.

Foi verificado que não houve alteração no espectro de frequências, nas formas de onda de carregamento, e nos valores de tensão e corrente com o uso de dois carregadores simultâneos, de forma que os gráficos de espectros permanecem fornecendo uma frequência próxima de 60Hz, há uma corrente constante dos carregadores às baterias em torno de 100 A, e uma tensão constante de carregamento próxima de 900V.

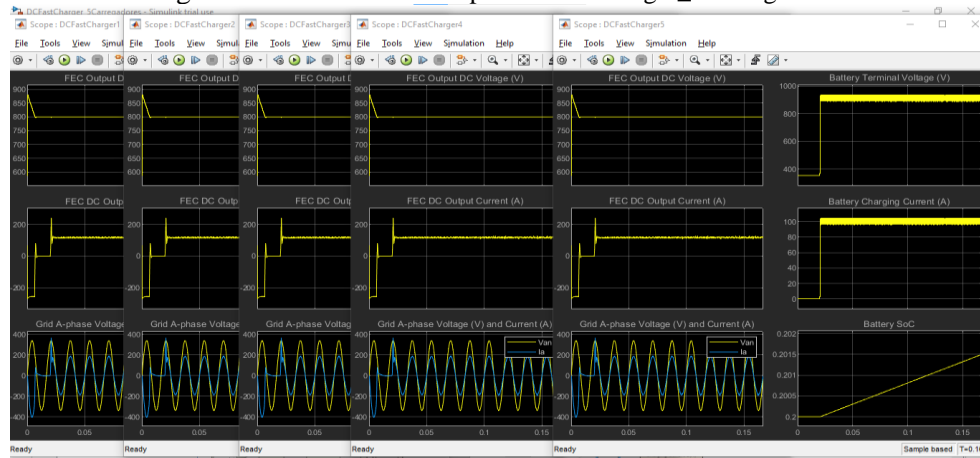
Para o ‘DCFastCharger_5Carregadores’, ao clicar em ‘Run’, foram obtidos os seguintes gráficos de espectro, ondas no osciloscópio e valores de tensão e corrente:

Figura 14 – Espectro de frequências DCFastCharger_5Carregadores



Fonte: Autor.

Figura 15 – Saídas osciloscópio DCFastCharger_5Carregadores



Fonte: Autor.

Figura 16 – Painel Tensão e Corrente DCFastCharger_5Carregadores

Measurement Panel	Measurement Panel	Measurement Panel	Measurement Panel	Measurement Panel
DC bus Voltage(V)	DC bus Voltage 2(V)	DC bus Voltage 3(V)	DC bus Voltage 4(V)	DC bus Voltage 5(V)
800	800	800	800	800
Charging Voltage(V)	Charging Voltage 2(V)	Charging Voltage 3(V)	Charging Voltage 4(V)	Charging Voltage 5(V)
919.9665	919.9665	919.9665	919.9665	919.9665
Charging Current(A)	Charging Current 2(A)	Charging Current 3(A)	Charging Current 4(A)	Charging Current 5(A)
101.6592	101.6592	101.6592	101.6592	101.6592

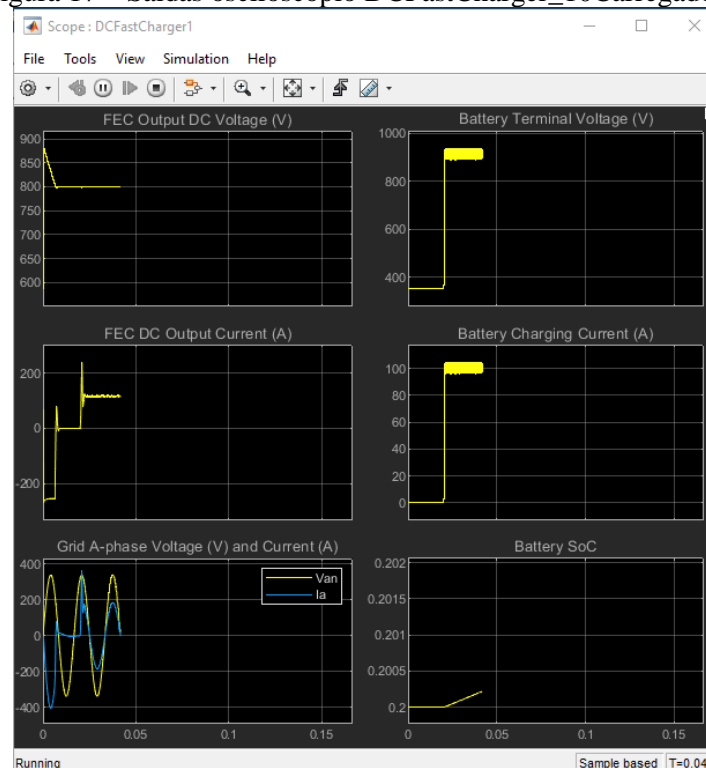
Fonte: Autor.

Foi verificado que não houve alteração no espectro de frequências, nas formas de onda de carregamento, e nos valores de tensão e corrente com o uso de cinco carregadores simultâneos, de forma que os gráficos de espectros permanecem fornecendo uma frequência próxima de 60Hz, há uma corrente constante dos carregadores às baterias em torno de 100 A, e uma tensão constante de carregamento próxima de 900V.

Como no modelo com cinco carregadores simultâneos foi verificado que não houve alteração no espectro de frequências e nos valores de tensão e corrente, com o mesmo resultado para o uso de 10 e 16 carregadores simultâneos.

Para o 'DCFastCharger_10Carregadores', devido à complexidade do circuito pela grande quantidade de carregadores, os gráficos com resultados demoraram mais tempo a serem apresentados devido à limitação do computador utilizado nas simulações. Portanto, ao clicar em 'Run', foram obtidas as seguintes ondas iniciais no osciloscópio:

Figura 17 – Saídas osciloscópio DCFastCharger_10Carregadores

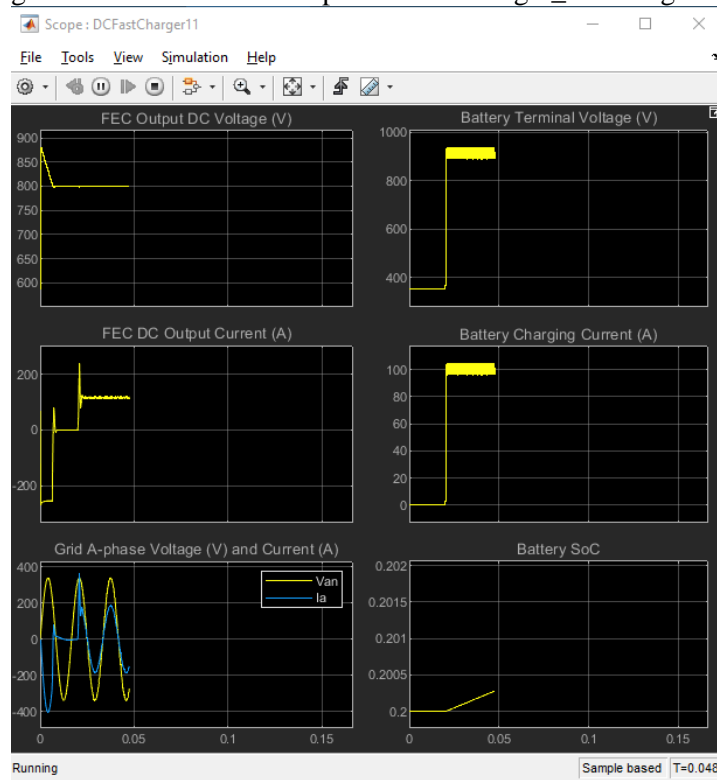


Fonte: Autor.

Foi verificado que não houve alteração nas formas de onda de carregamento, com o uso de 10 carregadores simultâneos de forma que há uma corrente constante dos carregadores às baterias em torno de 100 A, e uma tensão constante de carregamento próxima de 900V.

Semelhanemente, para o ‘DCFastCharger_16Carregadores’, devido à complexidade do circuito pela grande quantidade de carregadores, os gráficos com resultados demoraram mais tempo a serem apresentados devido à imitação do computador utilizado nas simulações. Portanto, ao clicar em ‘Run’, foram obtidas as seguintes ondas iniciais no osciloscópio:

Figura 18 – Saídas osciloscópio DCFastCharger_16Carregadores



Fonte: Autor.

Foi verificado que não houve alteração nas formas de onda de carregamento, com o uso de 10 carregadores simultâneos de forma que há uma corrente constante dos carregadores às baterias em torno de 100 A, e uma tensão constante de carregamento próxima de 900V.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível determinar o funcionamento de carregadores de veículos elétricos funcionando simultaneamente através de simulação virtual no MATLAB, assim como ter uma previsão do impacto à rede elétrica com a utilização simultânea deles.

O modelo criado permite visualizar a curva característica de carregamento de 16 carregadores para veículos elétricos simultaneamente, assim como os valores de tensão e corrente de carregamento, e um espectro de frequências. Portanto, é possível concluir que tanto com o uso de um único carregador para veículo elétrico como o uso de 16 carregadores para veículos elétricos simultâneos, produzem a mesma quantidade de harmônicos na rede elétrica e possuem a mesma curva característica de carregamento e

funcionamento.

Devido à limitação na biblioteca utilizada no modelo de carregamento para veículos elétricos no MATLAB, já que ela não permite conectar um dispositivo de medição na entrada, há espaço para pesquisas futuras, principalmente da conexão de um dispositivo de medição de tensão e/ou corrente na entrada da rede onde são conectados os carregadores para veículos elétricos, de forma a determinar se há alteração na corrente e tensão no ponto de conexão da rede elétrica com o uso da grande quantidade de carregadores elétricos simultâneos.

VI. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Bruno Pinto de. As relações entre o homem e a natureza e a crise socioambiental. Rio de Janeiro, RJ. Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio, Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), 2007. Disponível em <https://www.epsjv.fiocruz.br/upload/monografia/13.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- ARAÚJO, Maley Rosana Melo. de et al. Transporte público coletivo: discutindo acessibilidade, mobilidade e qualidade de vida. **Psicologia & Sociedade**, v. 23, n.3, p. 574–582, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-71822011000300015>. Acesso em 13 nov. 2023
- BALTISSERA, Luciano Bonato. Análise do Impacto da Utilização do Transporte Elétrico Coletivo no Sistema Elétrico de Distribuição. 2016. **Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica)**, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8604/BALDISSERA%2c%20LUCIANO%20BONATO.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2023.
- BAZANI, Adamo. Rede de São Paulo já poderia suportar demanda se todos os ônibus fossem elétricos, garante Eletropaulo. São Paulo, [19 de setembro de 2018]. **Diário do Transporte**. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2018/09/19/rede-eletrica-de-sao-paulo-ja-poderia-suportar-demanda-se-todos-os-onibus-fossem-eletricos-garante-eletropaulo/>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- BOÇON, Gustavo Schafhauser. Análise do impacto de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica. **Dissertação (Graduação em Engenharia de Energia)**, Universidade de Brasília (UnB). Faculdade UnB Gama (FGA), Brasília, 2019. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24732/1/2019_GustavoSchafhauserBocon_tcc.pdf. Acesso em: 05 abr. 2023.
- CAMPOS, Mateus. Impactos Ambientais. **Mundo Educação**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/impactos-ambientais.htm>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Urbano. **IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, 05 jun. 2011. Disponível em:

https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/boletim_regional/111125_boletimregional5_cap13.pdf. Acesso em: 13 nov. 2023.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de et al. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial, BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 32, p. 267-310, set. 2010. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1764>. Acesso em 05 jun. 2023.

COSTA, Yáscara FF et al. Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: Características, oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, v. 22, n 1, 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/download/59343379/351-Texto_do_artigo-332-1-10-2018030820190521-82839-qbd34p.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

DEB, Sanchari et al. **Impact of electric vehicle charging station load on distribution network**. *Energies*, v. 11, n. 1, p. 178, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11010178>. Acesso em 03 abr. 2023.

SOUZA LIMA, Gregório Costa Luz et Al. Mobilidade elétrica: o ônibus elétrico aplicado ao transporte público no Brasil. **Revista dos Transportes Públicos-ANTP**-Ano, v. 41, 2019.

JÚNIOR, Kleiber et al. Incentivos Fiscais Para Operações Com Veículos Automóveis Elétricos E/Ou Híbridos: **Projeto de Lei nº 5.308/20**. 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/20934>. Acesso em: 24 mai. 2023.

LANA, Geraldo Leão et al. Estudo Comparativo do Motor de Indução Trifásico e Motor Síncrono de Imã Permanente no Acionamento de Veículos Elétricos. **In: Proceedings of International Conference on Engineering and Computer Education**. p. 165-168, 2013. Disponível em: <https://copec.eu/congresses/icece2013/proc/works/37.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

LIMA, João Fernandes Mansano. Análise de Viabilidade para o Uso de Veículos Elétricos, com Dimensionamento de Posto de Recarga para Ônibus Elétricos. **Dissertação (Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade)**, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/5687>. Acesso em: 23 mai. 2023.

LIMA, Yuri Ferraz. Eletrificação de ônibus no Brasil: desafios e oportunidades. São Paulo, [15 de maio de 2023]. **Instituto Humanistas Unisinos**. Disponível em: <https://www.ihu.unisinos.br/categorias/628680-eletrificacao-de-onibus-no-brasil-desafios-e-oportunidades>. Acesso em: 03 jun. 2023.

LUNA FILHO, Gustavo José. Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26342>. Acesso em: 10 mai. 2023.

MORAES, Paula. Especialistas dizem que esforços do Brasil para reduzir emissões de gases do efeito estufa são insuficientes. **Agência Câmara de Notícias**, 18 out. 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1008326-especialistas-dizem-que-esforcos-do-brasil-para-reduzir-emissoes-de-gases-do-efeito-estufa-sao-insuficientes/>. Acesso em: 13 nov. 2023.

MATHWORKS, INC, THE. **DC Fast Charger for Electric Vehicle**. 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/dc-fast-charger.html>. Acesso em: 15 set. 2023.

MATOS, Júlia Ribeiro. Estudo de viabilidade econômica para utilização de ônibus elétrico no transporte público da Cidade de Porto Alegre - RS. **Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica)**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8604/BALDISSERA%2c%20LUCIANO%20BONATO.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2023.

NIMALSIRI, Nanduni I. et al. Coordinated charging and discharging control of electric vehicles to manage supply voltages in distribution networks: Assessing the customer benefit. **Applied Energy**, v. 291, p. 116857, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116857>. Acesso em: 02 abr. 2023.

PEREIRA, Renata Covisi. Mobilidade urbana sustentável: alternativas energéticas para o transporte coletivo urbano no município de Campinas/SP. **Dissertação (Pós-Graduação em Sustentabilidade)**, Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC Campinas), Campinas, 2017. Disponível em: http://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/bitstream/handle/123456789/15244/cea_ppgsust_me_Renata_CP.pdf. Acesso em: 05 jun. 2023.

ROCHA, Lucas Guedes de Almeida et al. Integração de veículos elétricos ao sistema de smart grid como banco de baterias. **Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica)**, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Engenharia Elétrica e Informática (CEEI). Campina Grande, 2019. Disponível em <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/19061>. Acesso em: 12 abr. 2023.

SILVA, Guilherme Manoel da et al. Análise de impactos elétricos gerados pela penetração de veículos elétricos nas redes de distribuição de baixa tensão. **Dissertação (Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade)**. Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215144>. Acesso em 05 mai. 2023.

SPTRANS. **Relatório Integrado da Administração**. São Paulo, SP, SPTRANS, 2020. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/relatorio-integrado-da-administracao-2020>. Acesso em: 13 nov. 2023.

SPTRANS. **Consulta Detalhe da Linha 809A-10 – Jardim D’Abril - Terminal Pinheiros**. São Paulo, SP, SPTRANS, 2023. Disponível em: <https://sistemas.sptrans.com.br/PlanOperWeb/detalheLinha.asp?TpDiaID=0&CdPjOID=202497&TpDiaIDpar=&project=OV&DfSenID=1>. Acesso em: 13 abr. 2023.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.