

ANÁLISE DOS IMPACTOS DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS FRENTE À QUALIDADE DE ENERGIA

Josué de Souza Silva¹; Klayvin Oliveira Osuna¹; Richard Vieira do Espírito Santo^{2,6}; Jair Antônio Longo Junior^{3,6}; Victor Molieri de Oliveira^{4,6}; Mariana Costa Falcão^{5,6*}

¹ Graduando em engenharia Elétrica, Faculdades Integradas de Três Lagoas – AEMS; ² Esp. em Engenharia de Software – Universidade Estácio de Sá; ³ Mestre em Engenharia Elétrica – UNESP; ⁴ Graduação em Engenharia Elétrica – UNESP; ⁵ Mestra em Engenharia Elétrica – UNESP; ⁶ Docente na Faculdades Integradas de Três Lagoas – AEMS

* autor correspondente: profmarianafalcao@gmail.com

RESUMO

Com a advinda dos carros elétricos, existem muitos fatores que devem ser estudados para que a qualidade de energia não seja comprometida. Para tal existem inúmeras literaturas que abordam o respectivo tema. Para que os veículos elétricos tenham suas baterias recarregadas, é necessário que o mesmo seja conectado na rede de energia elétrica por meio de dispositivos que deverá retificar a energia elétrica em corrente alternada em energia elétrica em corrente contínua, e é a partir desse ponto que inicia-se a preocupação em estudar a qualidade de energia, pois os carregadores de veículos elétricos ou estação de recargas são compostos de circuitos de eletrônica de potência com chaveamento em altíssimas frequências, gerando assim distorções harmônicas, além de promover baixo fator de potência, queda de tensão entre outros problemas que influenciam diretamente na qualidade de energia. Tendo em vista a análise e estudo para solução desses possíveis problemas, foram realizados estudos do tipo revisão bibliográfica em duas literaturas que foram desenvolvidas de formas distintas, porém com objetivos em comum. Os temas abordados no presente artigo trazem análise e resultados de modelagem computacional desenvolvido no software MATLAB dando sugestões de tipos configuração de estações de carregamento para redução dos possíveis impactos ocasionados por esses dispositivos, além de trazer também análise de carregamento de veículos elétricos reais e resultados que superaram as expectativas.

PALAVRAS CHAVES: veículo elétrico; distorção harmônica; estação de carga; impacto; rede elétrica; carregadores; conversores.

1 INTRODUÇÃO

Há quem acredite que a chegada dos veículos elétricos (VE) em nosso meio é algo muito distante e que está longe de se tornar realidade, entretanto a presença dos VE, é atualmente, mais real do que parece. Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), de janeiro-junho de 2021 houve o emplacamento de 13.899 novos VE os quais representam 1,4% do total de veículos comercializados no mercado brasileiro neste primeiro semestre de 2021. Desses novos VE emplacados, 58,02% são veículos elétricos híbridos (HEV),

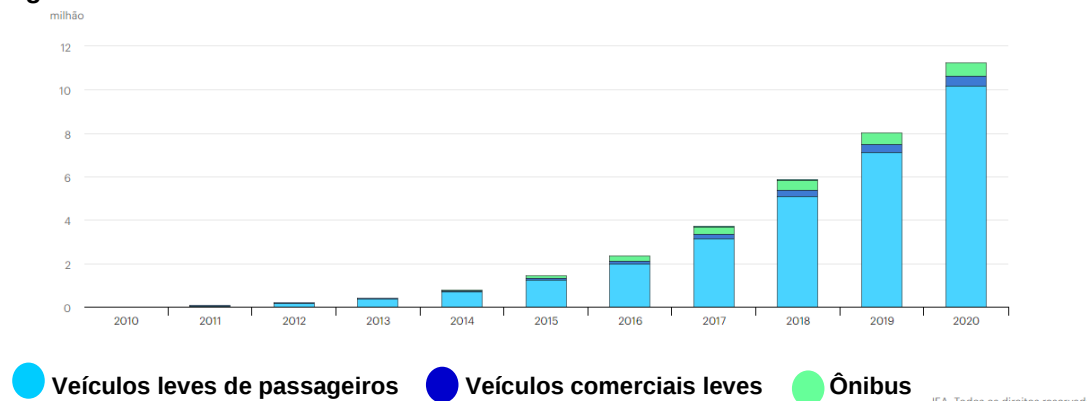
36,70% são HEV plug-in (PHEV) e 5,26% são VE apenas a bateria (BEV). No período de 2012-2021, a frota de VE vem crescendo anualmente atingindo a marca de 56.168 VE em circulação no país (ABEV, s.d.).

Em meio aos dados ascendentes da adesão de VE, é possível observar que a corrida rumo a mobilidade do futuro segue trabalhando intensamente mesmo em meio a um cenário pandêmico e sob crise econômica, o que leva deduzir que essa migração dos veículos a combustão para os VE está em constante crescimento (UM SÓ PLANETA, 2021).

A adesão de VE a nível global, ultrapassou o marco de 10 milhões de unidades segundo o relatório publicado pela

International Energy Agency (IEA) entre 2010 e 2020 (Figura 1).

Figura1. Gráfico do aumento dos VE entre 2010-2021



Fonte: Extraído de <https://www.iea.org>, s.d.

Baseado nesses dados, o presente artigo tem como objetivo apresentar os tipos de impactos que o sistema elétrico pode sofrer com o aumento da inserção de VE no mesmo. Para isso, foi realizado pesquisas sobre trabalhos que tem o mesmo tema em comum com foco em modelagem computacional, e posteriormente foi realizado a mesma pesquisa com foco em análise de carregamento real de VE. Depois, foi realizado a comparação do resultado de ambos os trabalhos obtidos.

2 CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os BEV e PHEV são dois tipos de VE que tem suas particularidades, porém que tem a utilização da bateria como ponto em comum. Os PHEVs são VE que funcionam de forma híbrida utilizando combustíveis como etanol e gasolina para funcionar o motor a combustão e a bateria para funcionar o motor elétrico, tendo duas fontes de energia alternativa para seu funcionamento. Já os BEVs são veículos completamente elétricos tendo a bateria como fonte única de energia para sua locomoção. A bateria de ambos os tipos de VE é composto por várias células de bateria ligadas em

série, sendo necessário a realização de recarga quando a mesma estiver com baixos níveis de energia dando altas autonomias ao mesmo (NeoCharge, s.d).

Existem dois métodos de carregamento das baterias dos VE que são o carregamento do tipo convencional onde o carro é conectado à rede de Corrente Alternada (CA) através de cabos de alimentação e plugue, e o tipo de carregamento por indução, o qual ainda está sendo estudado a possibilidade de implementação dessa metodologia, visando assim possibilitar o carregamento das baterias dos VE pela a transferência de energia através de uma bobina transmissora contida no interior do carregador e uma bobina receptora contida no interior do VE, eliminando assim a necessidade de utilização de cabos e plugues. Esses carregadores e/ou estação de carga de veículos elétricos são compostos por circuitos de eletrônica de potência que tem como objetivo retificar a tensão CA da rede elétrica externa para tensão CC, visando controlar a corrente e tensão de saída para oferecer um correto carregamento das baterias (CARDOSO et al., 2019).

Segundo a norma internacional SAE-J1772 (2010), os carregamentos de veículos elétricos são classificados em

três níveis diferentes, cada um com seus respectivos conectores para impedir possíveis erros. O nível 1 tem a potência de até 1,92 Kw, tensão CA 120 V, corrente até 16 A, que corresponde ao nível de carregamento lento do tipo doméstico, podendo levar até mais de 24 Horas para carregamento total dependendo da carga da bateria e do sistema de carregamento. O nível 2 tem potência de até 19,2 Kw, tensão CA 240 V, corrente até 80 A, em que é possível utilizar tanto tomada doméstica quanto estação de carga, desde que seja respeitado os valores de tensão e corrente nominal. (As classes de níveis de carregamento 1 e 2 são do tipo *on-board*, onde a energia CA é direcionada ao VE sendo retificada de CA - CC no interior do mesmo). No nível 3 em que a potência é de 240 Kw, tensão CC 208 - 600 V, corrente até 40 A, é considerado nível de carregamento rápido onde é necessária uma estação de carregamento tendo carregador *off-board* devido o retificador, filtro, conversor e demais componentes estarem dentro da

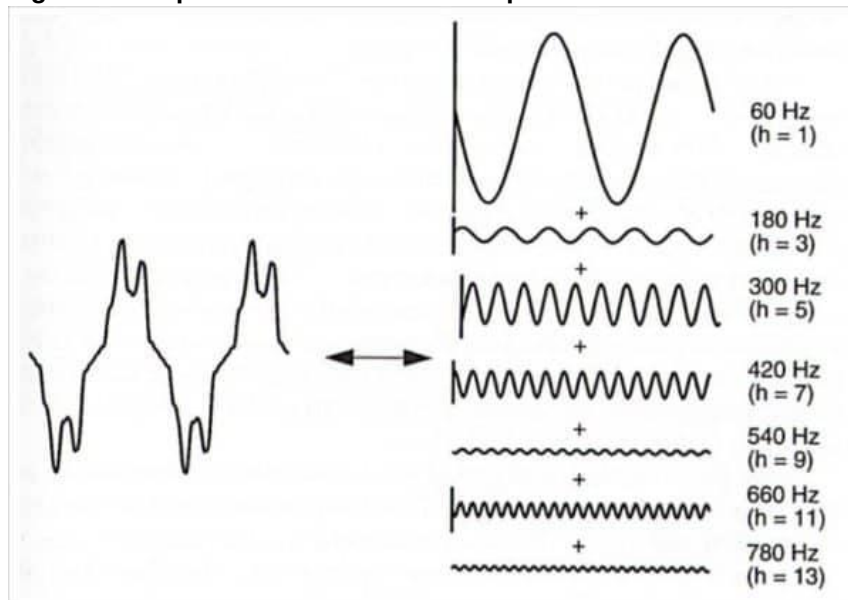
estação de carga, alimentando assim o VE diretamente com CC (CAETANO, 2021).

3 ANÁLISE DE MODELAGEM DE SISTEMA DE CARREGAMENTOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

3.1 Distorções harmônicas

As distorções harmônicas são grandezas que mais são levadas em considerações nesses estudos, devido a eletrônica de potência obtida nas estações de cargas, tendo conversores com altas frequências de chaveamento caracterizando assim, cargas não lineares. Essas distorções são a somatória de componentes senoidais de correntes e tensão múltiplas da frequência fundamental (60 Hz) que são criadas por cargas não lineares, e que resultam em uma senoide deformada de corrente e tensão perturbando e comprometendo a qualidade de energia (Figura 2) (PAZINATTO; OLIVEIRA, 2021).

Figura 2. Frequência fundamental e frequências até a 13ª ordem



Fonte: Extraído de <https://celulaenergia.com>, s.d.

A IEEE- 519/2014 é uma recomendação internacional que delimita os níveis de distorções harmônicas individual de tensão de até 5% para alimentação

abaixo de 1 Kv e até 8% em distorções harmônicas total de tensão em alimentação abaixo de 1 Kv.

No Brasil, existem os Procedimen-

tos de Distribuição de Energia Elétrica (Prodist), que são documentos elaborados pela ANEEL que tem como objetivo normatizar e padronizar o funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica o qual

são divididos em onze módulos, sendo o módulo 08 o responsável em abordar sobre qualidade de energia estabelecendo limites de distorções harmônicas aceitáveis (Tabela 1).

Tabela 1. Limites de distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ KV}$	$1,0\text{KV} < V_n < 69\text{Kv}$	$69\text{KV} \leq V_n < 230\text{Kv}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{s95%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Extraído de Prodíst - 08.

3.2 Modelagem computacional utilizando o matlab, de acordo com Caetano, 2021

Para iniciação da modelagem representado na figura 6, foi necessário a realização do dimensionamento dos componentes do carregador do VE e para tal foi levado em consideração as informações dos manuais do PHEV Nissan Leaf. Foi considerado uma estação de carga de 2,4 Kw de potência, com tensão de alimentação de 220-240 Vca e corrente de trabalho de 8-10 A, se enquadrando no nível 2 de potência da norma internacional SAE-J1772 mostrado no item 2 do presente artigo. Para tal estação de carga, foi dimensionado um conversor Boost CC-CC para trabalhar em modo de condução contínua,

com chaveamento (f_{ch}) de 50 Hz, ondulação de corrente (Δi) de 30%. O objetivo deste conversor é controlar o fator de potência, ajustar a corrente no indutor e amplificar a tensão de saída para 360 Vca através da variação da razão cíclica. As perdas no conversor boost foram considerados desprezíveis, ou seja, a potência de entrada é a mesma potência de saída ($P_{in} = P_{out}$).

A partir da análise da Figura 5 que representa o circuito do conversor, pode-se estabelecer as equações desenvolvidas abaixo para definição do Duty Cycle (D) (Equações 1-3). Para a definição do indutor (L_b) teve como ponto de partida a equação 4 (Equações 4-9).

$$\begin{aligned} \text{(Eq. 1)} \quad \frac{V_o}{V_{in}} &= \frac{1}{1-D} \quad \text{(Eq. 2)} \quad D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad \text{(Eq. 3)} \quad D = 1 - \frac{200}{360} \rightarrow D = 0,45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(Eq. 4)} \quad P_{in} &= P_{out} \rightarrow V_{in} I_{Lb} = 220 \quad \text{(Eq. 5)} \quad I_{Lb} = \frac{2200}{200} \rightarrow I_{Lb} = 11 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(Eq. 7)} \quad \Delta i_{Lb} &= \frac{V_{in} D}{L_b f_{ch}} \quad \text{(Eq. 8)} \quad L_b = \frac{V_{in} D}{\Delta i_{Lb} f_{ch}} \quad \text{(Eq. 9)} \quad L_b = \frac{200 * 0,45}{0,3 * 11 * 50 * 10^3} \rightarrow L_b = 545 \mu\text{H} \end{aligned}$$

Para dimensionamento do capacitor, foi levado em consideração a forma de onda da corrente no capacitor em modo de condução contínua como mostrado na Figura 3.

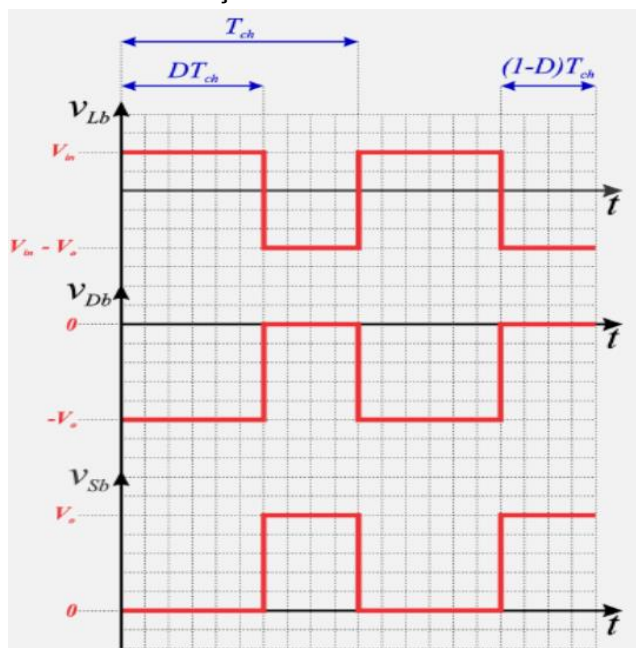
A análise da forma de onda representada na Figura 4, é possível desenvolver as Equações 10, 11 e 12 para dimensionamento do capacitor.

Após observação por meio de

testes que a ondulação no capacitor está mais associada à sua resistência do que à sua capacitância, estabeleceu-se por testes comparativos que a capacitância ideal para o capacitor manter a ondulação na saída o mais constante possível, ou seja, com 1% de ondulação, seria um capacitor de $2000 \mu F$.

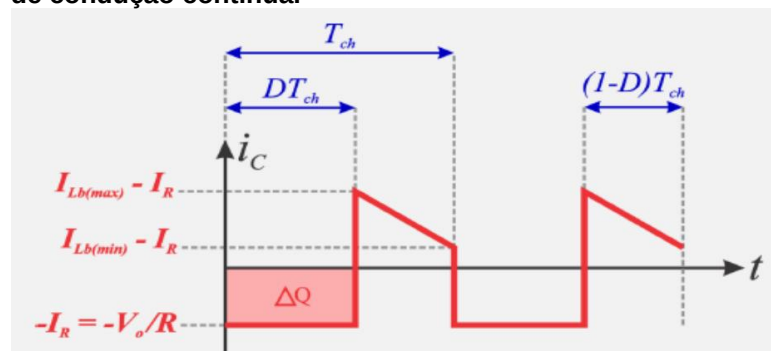
Para representação da bateria do VE, utilizou-se carga resistiva de 60Ω na modelagem, conforme as Equações 13 e 14, pois como as baterias levam muito tempo para serem carregadas, caso fosse utilizado na modelagem levaria muito tempo para simulação do mesmo, tornando o experimento inviável.

Figura 3. Forma de onda do conversor *boost* operando em condução contínua.



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

Figura 4. Forma de onda da corrente no capacitor em forma de condução contínua.



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

(Eq. 10)

$$|\Delta Q| = \frac{V_o}{R} DT_{ch} = C \Delta V_o \rightarrow$$

(Eq. 11)

$$C = \frac{V_o}{R \Delta V_o f_{ch}} \rightarrow$$

$$C = 15 \mu F.$$

(Eq. 12)

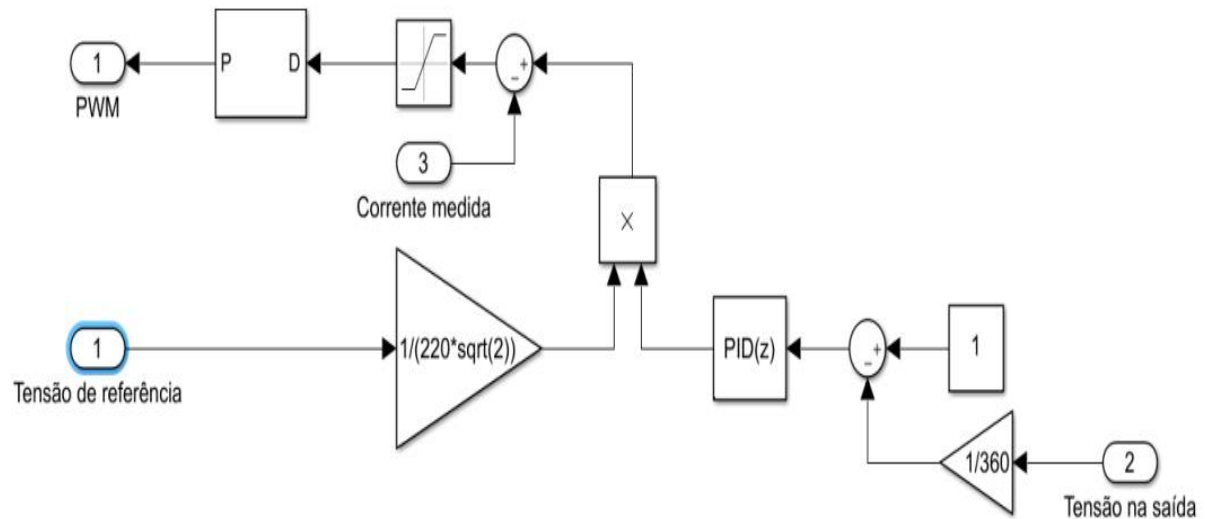
$$C = \frac{360 * 0,45}{60 * 0,01 * 360 * 50 * 10^3}$$

(Eq. 13)

(Eq. 14)

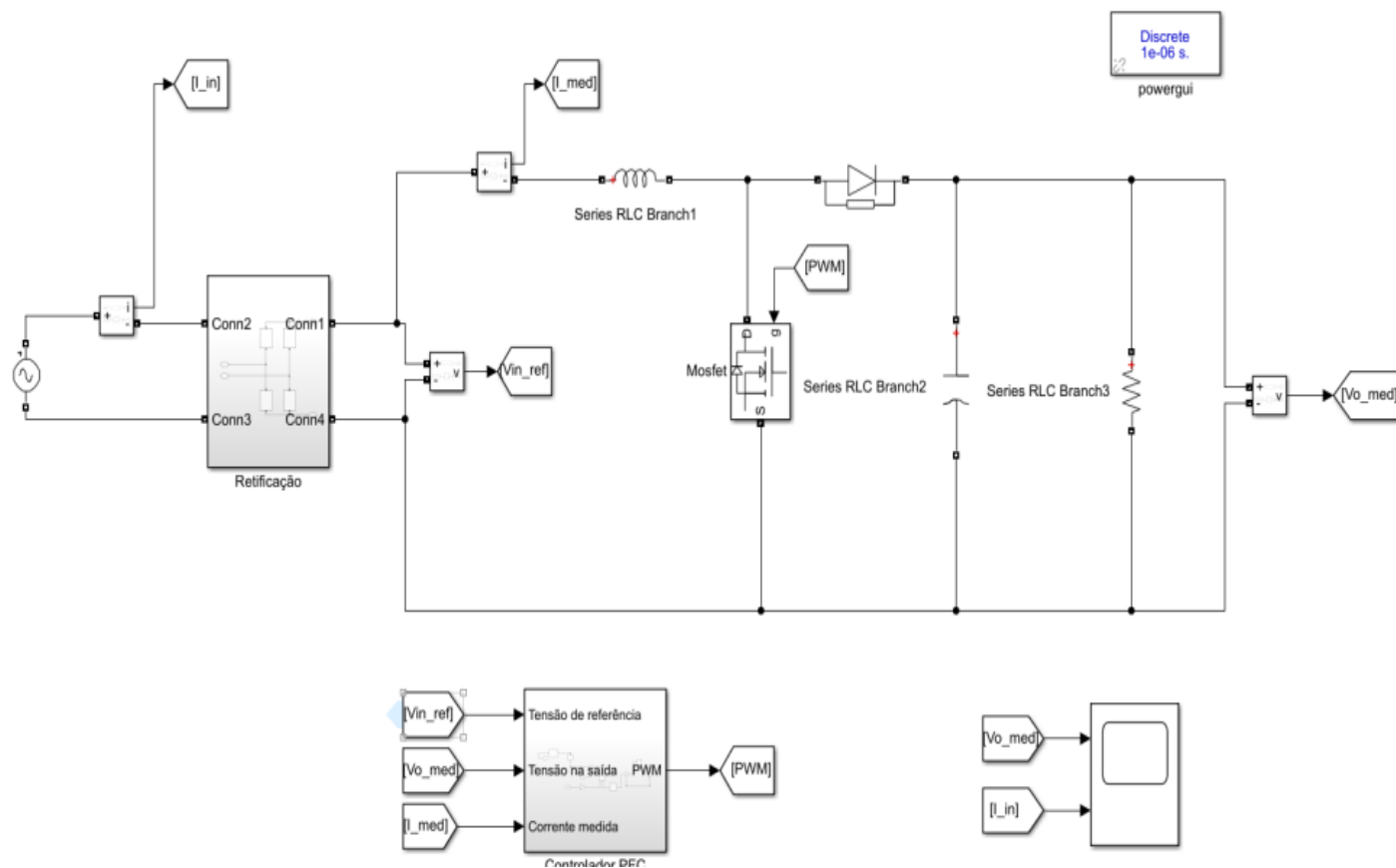
$$\frac{V_o^2}{R} = 2200 \rightarrow R = \frac{360^2}{2200} \rightarrow R = 60 \Omega$$

Figura 5. Controlador de fator de potência (PFC).



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

Figura 6. Modelagem de carregador de veículo elétrico.



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

3.3 Análise do carregamento real de veículo elétrico, de acordo Pinto, 2014

A Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Rio, Covilhã (Portugal), em conjunto com a empresa ENFORCE, adquiriram uma estação de carga com tecnologia fotovoltaica a qual tem sua cobertura constituída por fibra de vidro em formato de folha e pode recarregar até três VE, simultaneamente. O VE utilizado para o experimento nessa estação de carga foi o *Renault Zoe* (Figura 7).

Figura 7. Protótipo de estação de carregamento de VE a energia solar.



Fonte: Extraído de Pinto, 2014.

O comportamento do posto de carregamento e os possíveis impactos às redes elétricas foi verificado por meio de ensaios de carregamentos parciais e totais, e os resultados dessa nova tecnologia foram analisados por grandezas elétricas.

3.3.1 Informações técnicas da análise

3.3.1.1 Veículo

A potência do motor do *Renalt Zoe* é Igual a 65 Kw, capacidade de carga útil da bateria igual a 22 Kw e autonomia de 100-150 Km.

3.3.1.2 Posto de carregamento

O posto de carregamento atende as normas EN 61851 e NP 61581 de 2013, tendo tensão de alimentação máxima a 690 V, Frequência de 50 HZ com tolerância de 1%, temperatura de funcionamento tolerável de -30 °C a 50 °C, Humidade relativa aceitável de 5% a 95%,

índice de proteção IP44, regime de neutro TT e ponto de conexão com DR. O trabalho fonte, não forneceu mais informações técnicas sobre o posto de carregamento.

3.3.1.3 Analisador Fluke

O analisador *Fluke 434* Série II, foi utilizado nos ensaios realizados, o qual tem quatro sondas flexíveis e finas, podendo medir 600 A por fase, tensões de até 1000 V entre fase e neutro, realiza medições de fator de potência, potência ativa e reativa, distorções harmônicas e harmônicas individuais até a quinquagésima ordem, opera sob temperatura de 0-50 °C com bateria, humidade relativa de até 95% e até 2000 m de altitude. O *Fluke 434* dispõe também de um *software* que gera gráficos e relatório e podem ser exportados para uma melhor visualização e análise (Figura 8).

Figura 8. Analisador Fluke 434.



Fonte: Extraído de Pinto, 2014.

3.3.2 Metodologia de ensaio

As metodologias abordadas tiveram como objetivo verificar o funcionamento do posto de carregamento nas mais variadas condições possíveis de níveis de carga da bateria do VE, sendo assim, foi realizado o carregamento completo do *Renault Zoe* através do carregamento rápido de 63-100% da carga das baterias. Os outros carregamentos tiveram perfil de carregamento parcial os quais todos os carregamentos para fins

analíticos tiveram o seguinte proceder, (1º carregamento completo) – de 63-100%; (2º carregamento, parcial) – de 11-72%; (3º carregamento, parcial) – de 49-98%; (4º carregamento, parcial) – de 67-98%; (5º carregamento, parcial) – de 79-98% e (6º carregamento, parcial) – de 91-98%.

4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISE DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICO REAL E SIMULADO

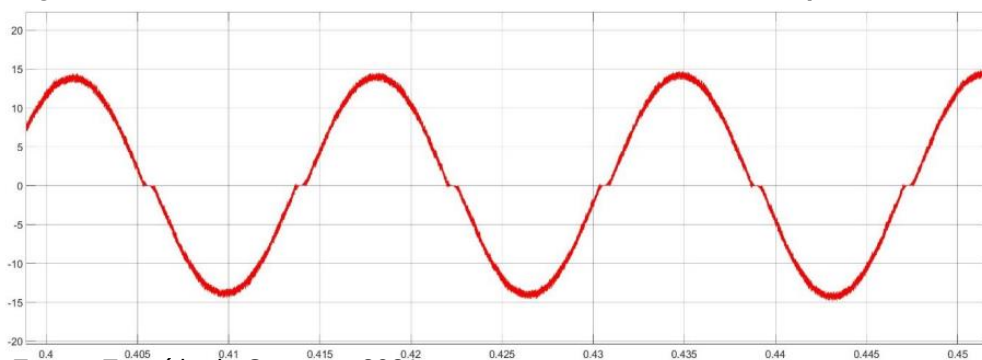
As duas literaturas abordadas neste artigo têm finalidades em comum, porém foram elaboradas de formas diferentes, onde a literatura proposta por Caetano (2021) visa o desenvolvimento de uma modelagem computacional tendo

como objetivo analisar o impacto do carregamento de VE na qualidade de energia e a literatura proposta por Pinto (2014) visa analisar o comportamento do posto de carregamento real na recarga do VE *Renault Zoe*.

4.1 Resultados da modelagem, conforme Caetano, 2021

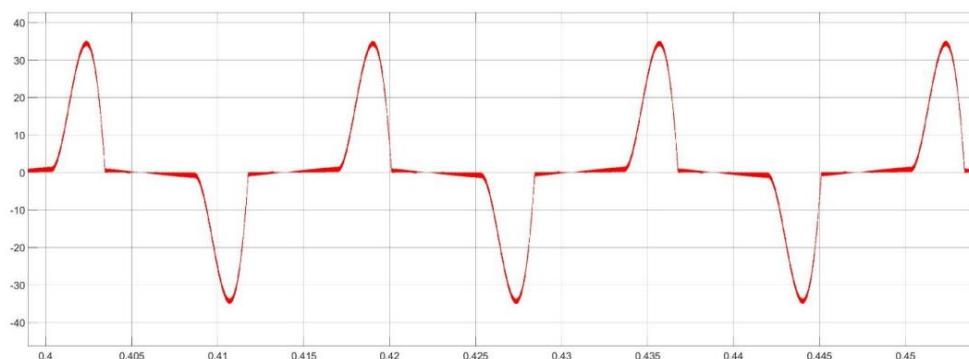
Como resultado em sua modelagem, quando o PFC está incluso no circuito, os valores de distorções harmônicas são menores do que se não o tivesse. Visivelmente é possível observar que quando o PFC não está presente no circuito, a forma de onda de corrente de entrada é distorcida modificando a sua forma de onda senoidal e quando o PFC está incluso a forma de onda é quase uma senoide perfeita (Figuras 9 e 10).

Figura 9. Forma de onda da corrente de entrada no circuito ampliada com PFC



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

Figura 10. Forma de onda de corrente de entrada no circuito ampliada sem o PFC.



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

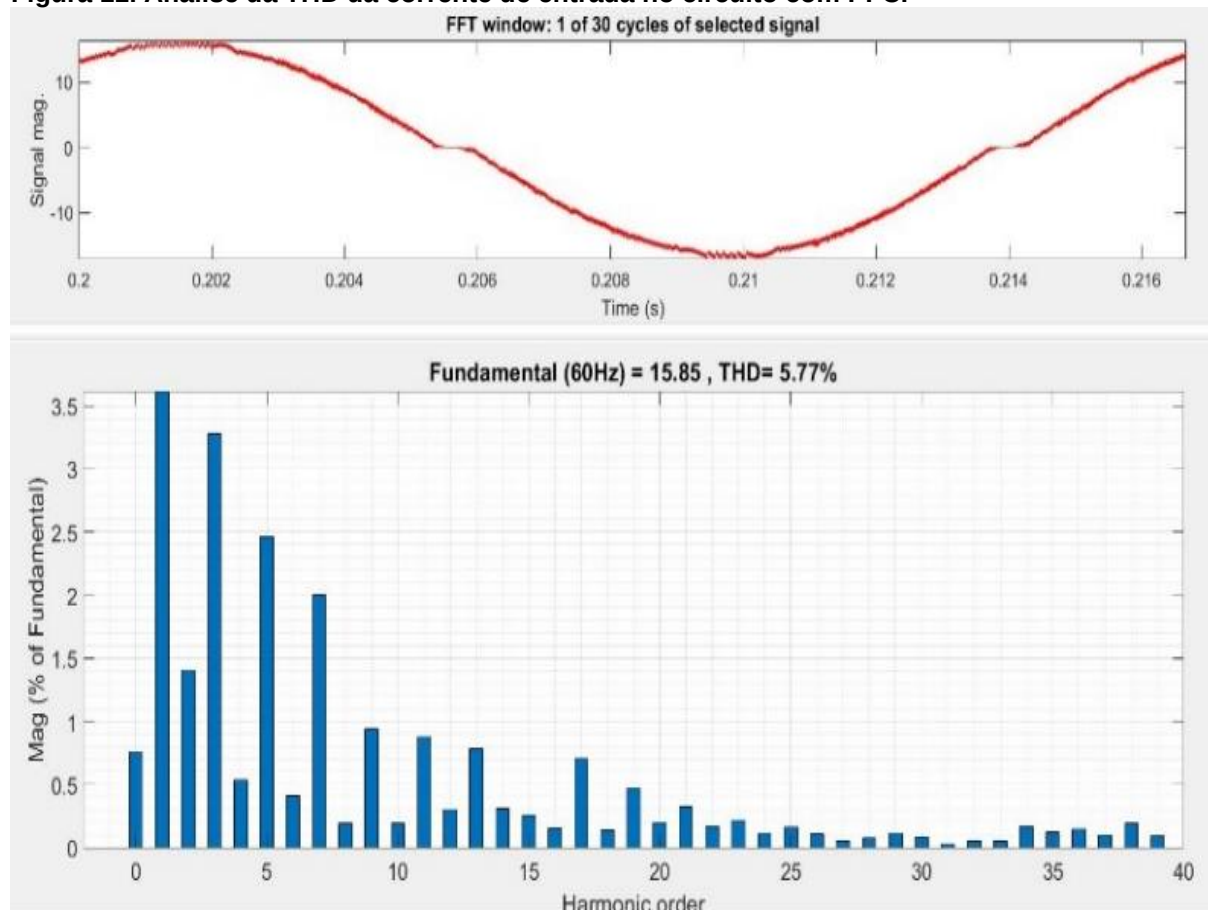
Os valores dos níveis de distorções harmônicas (THD) foram obtidas pela ferramenta *Fast Fourier Transform* (FFT)

do bloco *Powergui* do *simulink*, o qual trouxe resultados bem alarmantes. Foi medido valores de 5,77% de THD no

conversor com PFC na corrente de entrada versus 92,77% de THD na corrente de entrada no conversor com o PFC,

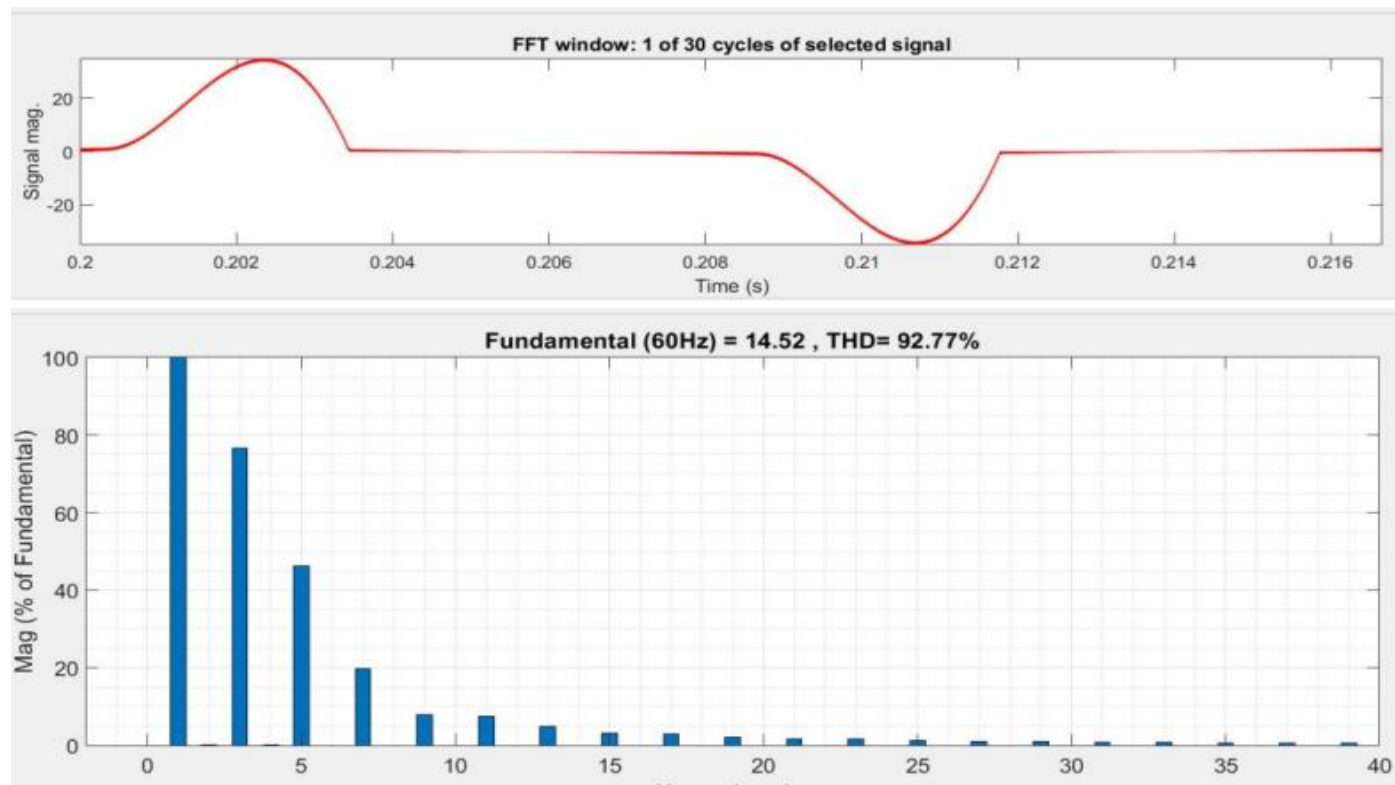
como demonstrados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11. Análise da THD da corrente de entrada no circuito com PFC.



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

Figura 12. Análise da THD da corrente de entrada no circuito sem PFC.



Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

A Tabela 2 traz em resumo todos os valores de THD obtidos na análise do

circuito com o PFC e sem o PFC.

Tabela 2. Resumo dos níveis de THD medidos.

Grandeza elétrica	THD%	
	Com PFC	Sem PFC
Corrente elétrica	5,77	92,77
Tensão de entrada	2,72	5,03
Correntes nas fases	1,33	20,78
Corrente no neutro	0,06	0,44
Tensão na saída do transformador	2,16	4,02

Fonte: Extraído de Caetano, 2021.

Com os valores obtidos da tabela 2, através de análises, é notório o fato de que o PFC tem grande influência na redução de distorções harmônicas o qual a não aplicação do controlador de fator de potência obtém-se valores muito maiores que os permitidos pelo PRODIST 8.

4.2 Resultado da análise do carregamento real, conforme Pinto, 2014

A análise realizada no posto de carregamento com o VE *Renault Zoe* obteve-se valores de tensão, corrente, defasagem de tensão, corrente, potência ativa e reativa, e harmônicas. No geral, todos os ensaios dos níveis de carga de baterias propostos, foi observado a presença de distorções harmônicas ímpares de até a 9ª ordem tendo como valores mais altos nas TDH de 5ª e 7ª ordens.

Segundo a norma portuguesa NP EN 50160, o valor máximo permitido de TDH é de 8%, e os valores de limites individuais para 3ª ordem é de 5%, para de 5ª ordem é de 6%, para de 7ª ordem é de 5% e para a de 9ª ordem é de 1,5%, porém em todos os ensaios foi registrado níveis DTH abaixo de 3% e para as distorções harmônicas individuais, os valores encontrados foram menores que os estabelecidos por norma.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas literaturas estudadas pode-se obter um olhar crítico e

analítico a respeito do carregamento de VE, tendo em vista que dependendo do tipo de veículo e do tipo de posto de carregamento os valores de tensão e outras métricas relacionadas a qualidade de energia elétricas podem sofrer alterações.

Na modelagem, com intuito de simular o carregamento de um VE com características do VE *Nissan Leaf* utilizando uma estação de carga de 2,4 Kw em um tipo de carregamento doméstico, obteve-se resultados que demonstram o quanto importante é ter um conversor com controlador de fator de potência o qual irá gerar uma ótima correção de fator de potência, e reduzir os níveis de distorções harmônicas totais. Por outro lado, a análise dos ensaios realizados no posto de carregamento desenvolvido pela UBI e ENFORCE utilizado para carregamento real do VE *Renault Zoe* obteve valores de TDH abaixo dos limites aceitáveis, obtendo ótimo resultado, porém não se pode deixar de levar em consideração o fato de que a análise foi realizado para carregamento de apenas um VE, onde o posto de abastecimento tem capacidade de carregamento para até três VE simultâneos, podendo ter os valores dos resultados obtidos alterados caso seja realizada análise com capacidade máxima de abastecimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO

VEÍCULO ELÉTRICO - ABVE. Market share de veículos elétricos segue em alta. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/market-share-de-eletrificados-segue-em-alta/>>. Acesso em 27 out. 2021.

CAETANO, J. V. A. Carregadores de veículos elétricos e seu impacto na qualidade da energia elétrica. 2021. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CARDOSO, K. et al. Novas tendências de mobilidade elétrica e impactos na qualidade de energia. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, São Caetano do Sul, v.13, set 2019.

CÉLULA ENERGIA – CE. Qualidade de Energia: As distorções harmônicas nas instalações com inversores fotovoltaicos. Disponível em: <<https://celulaenergia.com/qualidade-de-energia-as-distorcoes-harmonicas-nas-instalacoes-com-inversores-fotovoltaicos/>>. Acesso em 29 out. 2021.

INTERNATIONAL ELECTRIC AGENCY-IEA. CHARTS-DATA & ESTATISTICS.

Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-vehicle-stock-by-transport-mode-2010-2020>>. Acesso em 27 out. 2021.

NEOCHARGE. Conheça os Tipos de Carros Elétricos. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos#eletrico_a_hidrogenio>. Acesso em 28 out., 2021.

PINTO, R. Análise dos perfis de carregamento de veículos elétricos numa estação de carregamento. 2014. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de computadores: Ramo dos sistemas biônicos) – Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal.

SAE International J1772. *Surface Vehicle Recommended Practice* [S.l.:s.n], 2021.

UM SÓ PLANETA. Grandes números de ascensão de carro elétricos no mundo. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2021/05/25/os-grandes-numeros-da-ascensao-dos-carros-eletricos-no-mundo.ghtml>>. Acesso em 27 out. 2021.