

# MODELAGEM DO PROCESSO DE RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA POSTERIOR ANÁLISE DOS IMPACTOS DA CONEXÃO DESTES À REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Felipe S. Arruda, Fabrício M. Silva, Ivan N. Santos  
Núcleo de Redes Elétricas Inteligentes e Qualidade de Energia  
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG  
arruda.felipesouza@gmail.com; fabriciomontes.silva@gmail.com; ivan@ufu.br

**Resumo** – Tendo em vista a inevitável inserção, em médio prazo, dos veículos à tração elétrica no Brasil, o presente trabalho apresenta de forma detalhada a principal estratégia comercial para carregamento de baterias de veículos elétricos, com suas respectivas taxas de distorções harmônicas de corrente e tensão. Tal evidência visa uma posterior análise do possível impacto causado pela conexão desses veículos à rede elétrica de distribuição de energia, segundo a ótica da qualidade de energia elétrica.

**Palavras-Chave** – bateria, controle de carregamento de baterias, qualidade de energia, veículos elétricos.

## MODELING OF ELECTRIC VEHICLE RECHARGING PROCESS TO FUTURE ANALYSIS OF CONNECTION IMPACT

**Abstract** - Given the inevitable insertion in the medium term of electric vehicles in Brazil, this paper presents the most viable strategy for charging electric vehicle batteries, with its respective rates of harmonic distortion of current and voltage. Such evidence is aimed at further analysis of the possible impact of these vehicles connection to the mains power distribution, from the viewpoint of energy quality.

**Keywords** – battery, battery charge control, electric vehicle, power quality.

### I. INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais causados pela busca do petróleo, as questões políticas e sociais envolvendo esse recurso amplamente utilizado vêm sendo objeto de estudos de vários pesquisadores. Nesse sentido, empresas futuristas como a Tesla Motors aplicam investimentos e esforços para a inserção dos veículos elétricos no lugar dos veículos à combustão interna.

O uso de VEs nos grandes centros urbanos poderá trazer grandes avanços do ponto de vista ambiental, uma vez que os mesmos não realizam qualquer emissão de gases poluentes derivados de petróleo ou outros, são muito silenciosos,

necessitam de temperaturas relativamente baixas de funcionamento quando comparados com os veículos de motor à explosão, o nível de eficiência energética é muito superior aos convencionais, entre outros [1].

Além destes pontos apresentados, verifica-se que um dos principais desafios que o setor de transportes tem enfrentado na atualidade, em termos mundiais, está associado à sua grande dependência com combustíveis fósseis, ou seja, aqueles derivados de petróleo [2], os quais não são considerados fontes energéticas renováveis. Neste ínterim, sabe-se que, mundialmente, o dispêndio energético do setor de transportes com esta forma de energia não renovável e altamente poluidora é da ordem de 95% [3]. Em termos nacionais, esta dependência é um pouco menor, em torno de 82% [4], devido principalmente aos programas de incentivo ao uso de etanol e biodiesel.

O presente trabalho visa, então, contribuir com o avanço dos estudos científicos ligados aos eventuais problemas e desafios da inserção dos VEs à rede elétrica de distribuição, mais especificamente no tocante à qualidade da energia elétrica, uma vez que estes, via de regra, irão conectar ao sistema de energia interligado via conversores de energia, os quais, por sua vez, se apresentam como potenciais fontes poluidoras/depredadoras da qualidade do suprimento elétrico. Portanto, sob o ponto de vista da qualidade da energia elétrica no que tange a harmônicos, a conexão do VE na rede de distribuição, para o seu processo de recarga, pode elevar os níveis das amplamente difundidas distorções harmônicas da forma de onda de tensão e corrente, podendo levar estas a valores inadequados.

Assim, pretende-se, aqui, realizar um estudo voltado ao funcionamento das baterias do tipo ion-lítio, modelagem do sistema de carregamento do VE e avaliação dos harmônicos característicos gerados, ao longo do processo de recarga, no ponto de conexão deste numa típica rede elétrica de distribuição.

### II. ESTADO DA ARTE DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Atualmente, grandes montadoras buscam desenvolver e aprimorar os veículos elétricos, sendo que a bateria continua a ser o maior fator limitador. Questões como o tempo de recarga e a distância útil percorrida em relação à carga são os maiores desafios encontrados para os fabricantes conquistarem os consumidores. Neste tocante, o próximo tópico abordará de forma mais detalhada a tecnologia das baterias e os procedimentos de recarga da mesma.

Já em relação aos VEs, podemos classificá-los em três principais categorias: VE Híbrido, VE Híbrido Plug-In e VE puramente à bateria.



O VE híbrido, conforme sugerido pelo nome, engloba os veículos que possuem a combinação do motor à combustão interna e o motor elétrico, o que garante uma maior autonomia ao VE. Esses veículos ainda podem ser divididos em híbrido série, híbrido paralelo e híbrido misto. Os veículos híbridos série são aqueles que o motor à combustão age como um gerador de energia elétrica acionando o motor elétrico que é conectado ao eixo do veículo. Os VEs híbridos paralelo são aqueles que o motor elétrico atua como um auxílio ao motor à combustão no momento em que é necessária uma maior transferência de potência. Já os VEs híbridos misto são os que possuem dois motores elétricos, um atuando em série com o motor à combustão e o outro em paralelo.

O VE híbrido plug-in se difere do primeiro grupo de híbridos pelo fato de poder ser conectado à rede elétrica para o processo de recarga da bateria. Dessa forma ele ainda possui as vantagens dos motores elétricos e à combustão, associado à vantagem da utilização de uma energia mais limpa que é a energia fornecida pela rede elétrica [6].

Já os VEs puramente a bateria, mais comumente chamados somente de VEs possuem toda a energia fornecida pela bateria. Assim, não há a possibilidade de variação de forma de energia utilizada como nos veículos híbridos, logo, a energia e, portanto, a autonomia do veículo é constantemente depreciada. Esse tipo de veículo será o objeto de estudo desse documento, pois trata-se do tipo de abordagem que tem ganhado maior destaque no cenário atual, uma vez que não possui motor à explosão.

### III. BATERIAS ÍON-LÍTIO E PROCEDIMENTO DE RECARGA

O lítio é o mais leve dos metais, possui altíssimo potencial eletroquímico e tem uma alta relação de energia em termos de peso. Diante dessas características surgiram pesquisas em desenvolvimentos de acumuladores baseados na iteração com esse metal. A instabilidade inerente do presente metal, principalmente durante os processos de recarga, levou os pesquisadores à criação das baterias do tipo íon-lítio [7].

Similarmente às baterias de níquel, as baterias de íon-lítio usam um catodo, um anodo, e um condutor eletrolítico. Durante a descarga os íons fluem do anodo para o catodo através do meio eletrolítico e durante a carga os íons fluem em sentido contrário [7].

As vantagens da utilização da tecnologia íon-lítio são: alta densidade de energia, processos mais rápidos de recarga, opções de formato de células de boa flexibilidade, vida útil longa, boa eficiência energética, baixo índice de descarga. Por outro lado, as desvantagens encontradas são: necessidade de um circuito de proteção para limite de tensão e corrente, sensibilidade à temperaturas elevadas e custo mais elevado em relação às outras baterias.

O processo de recarga dessas baterias ocorre em fases distintas. No primeiro momento o controle deve ser aplicado de forma a fornecer uma corrente constante para a bateria. Durante essa etapa existe um aumento na tensão até que atinja o valor nominal de tensão. A segunda etapa consiste em manter esse nível de tensão constante e é observada uma queda no valor da corrente. A recarga é dita completa quando a corrente atinge a marca de 3% do valor nominal.

No tocante ao processo de recarga ilustrado na Figura 2, uma das estratégias comumente adotada é o uso de um conversor buck para o controle dos níveis de tensão e corrente impostas às células da bateria. O conversor buck é um conversor DC-DC abaixador de tensão. Os níveis de tensão e corrente da saída deste conversor são obtidos através do controle do chaveamento de chaves estáticas, tal como IGBT, por meio do uso de PWM.

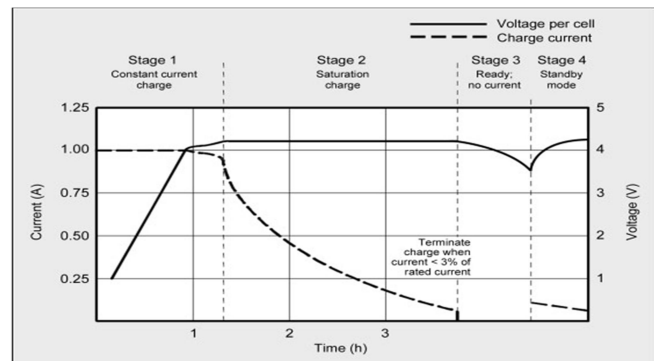


Fig. 2. Ilustração do processo de carga de uma célula íon-lítio de tensão nominal 4.2 V e corrente nominal 1A.

Em seções subsequentes deste artigo, tem-se um melhor detalhamento deste processo por meio do desenvolvimento de um estudo de caso.

### IV. RELAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA COM O PROCESSO DE RECARGA DO VE

Para efetuar o controle da tensão e corrente fornecidos à bateria será utilizado no estudo de caso apresentado em V, um conversor DC-DC do tipo buck. Sabe-se que para controlar os níveis de tensão e corrente que chega a bateria é preciso controlar a razão cíclica que é a relação entre o período de condução da chave e o período de condução total.

A presença desses sinais, em diferentes frequências, causa então distúrbios à energia elétrica afetando a qualidade da mesma. Em relação aos carros elétricos, a inserção de um único VE na rede elétrica causaria pequenas perturbações à rede de distribuição de energia, no entanto, existe a expectativa de uma grande frota de veículos elétricos a partir do ano de 2020 [8].

Este estudo apresenta as taxas harmônicas presentes em diferentes estágios da carga da bateria, baseado no nível de carga da mesma.

### V. IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DE RECARGA DA BATERIA ÍON-LÍTIO – ESTUDOS DE CASO

Na sequência tem-se então o sistema de simulação proposto para análise do processo de recarga de uma bateria do tipo íon-lítio.

O estudo de caso proposto consiste de uma bateria íon-lítio com tensão nominal de 144V e corrente nominal de 100Ah. Para atingir esses níveis é então necessário, a utilização de 10 baterias em série com tensão de 12V e corrente de 100Ah. Como desejamos implementar um modelo de recarga de um veículo elétrico para que

posteriormente podemos fazer a análise da inserção desses à rede elétrica, o sistema aqui apresentado simula uma bateria capaz de fornecer uma autonomia de cerca de 180 km ao usuário [5].

O método de cálculo da bateria deve levar em consideração, dentre outras informações, o peso do veículo e a velocidade média de trafego.

O sistema apresentado na Figura 3 ilustra o esquema proposto para o carregamento da bateria utilizando o Matlab/Simulink. Observamos então uma fonte trifásica representando uma unidade de carregamento de um veículo elétrico, uma ponte retificadora e um conversor buck para controle dos níveis de tensão e corrente de recarga da bateria.

O sistema de controle é utilizado para o chaveamento do IGBT presente no conversor buck. Para realizar tal controle monitoramos os valores de tensão e corrente e comparamos com valores de referência. A fim de cumprir com o procedimento de recarga ilustrado na Figura 2, o controle é baseado em manter o nível de corrente constante, controlando através de um controlador PI o *duty cycle* do PWM que opera o chaveamento do IGBT, até que a tensão da bateria atinja os valores nominais. Nesse momento, ocorre então a troca de etapas e inicia-se a etapa 2 do carregamento em que o controlador PI atua no PWM com o intuito de manter os níveis de tensão constante. Nesse momento é observada a queda dos valores de corrente na bateria.

No presente trabalho serão realizados dois estudos de caso com carregamentos feitos com tensão de referência em 155V e correntes com valores de referência distintos, a saber:

- Caso 1: valor limite de corrente de 30A, o que representa um processo de recarga com duração de 3 a 4 horas (de 10% a 90% da carga total do sistema de baterias) – recarga rápida;
- Caso 2: valor limite de corrente de 15A, representando um tempo de recarga de 7 a 8 horas (de 10% a 90% da carga total do sistema de baterias) – recarga típica [9].

### A. Modelo de bateria ion-lítio utilizada

Para o presente estudo de caso foi utilizado um modelo de bateria íon-lítio existente no Matlab/Simulink. Tal modelagem é melhor esclarecida na Figura 4.

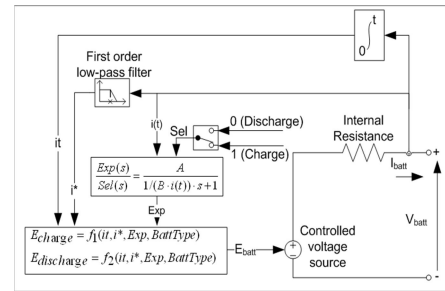


Fig. 4. Modelo de bateria do Simulink presente na biblioteca SimPowerSystems.

Pelo fato deste modelo ser validado e amplamente utilizado, o mesmo não será objeto de avaliação de desempenho neste artigo. Não haverá, também, qualquer adaptação nele.

### B. Descrição geral do arranjo de recarga implementado e da seleção de dados a serem coletados

O sistema proposto encontra-se ilustrado na Figura 4. Este possui, entre outros, medidores de tensão e correntes médias e harmônicas, assim como nível de carregamento da bateria.

O nível de curto-circuito local, no ponto de recarga, é de aproximadamente 250kVA, sendo a tensão nominal de 220V. Vale ressaltar que recarga, conforme arranjo na Figura 4, ocorre por meio de conexão fase-fase no sistema de distribuição.

Um primeiro estágio do processo de recarga trata-se de um conversor (AC/DC) não controlado, seguido de um segundo conversor (DC/DC) em consonância com o que fora apresentado em seções anteriores.

Nesse estudo de caso, analisar-se-á as taxas harmônicas e os níveis de tensão e corrente em diferentes fases do processo de recarga, a saber, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da carga total da bateria, parâmetro conhecido como *state-of-charge*.

No que se refere às distorções harmônicas, serão analisadas apenas as principais ordens características [10] do processo de recarga, a saber: 3h, 5h, 7h, 9h, 11h e 13h, e também as distorções harmônicas totais. Vale, ainda, ressaltar que no modelo implementado não se verifica quaisquer dispositivos de filtragem harmônica.

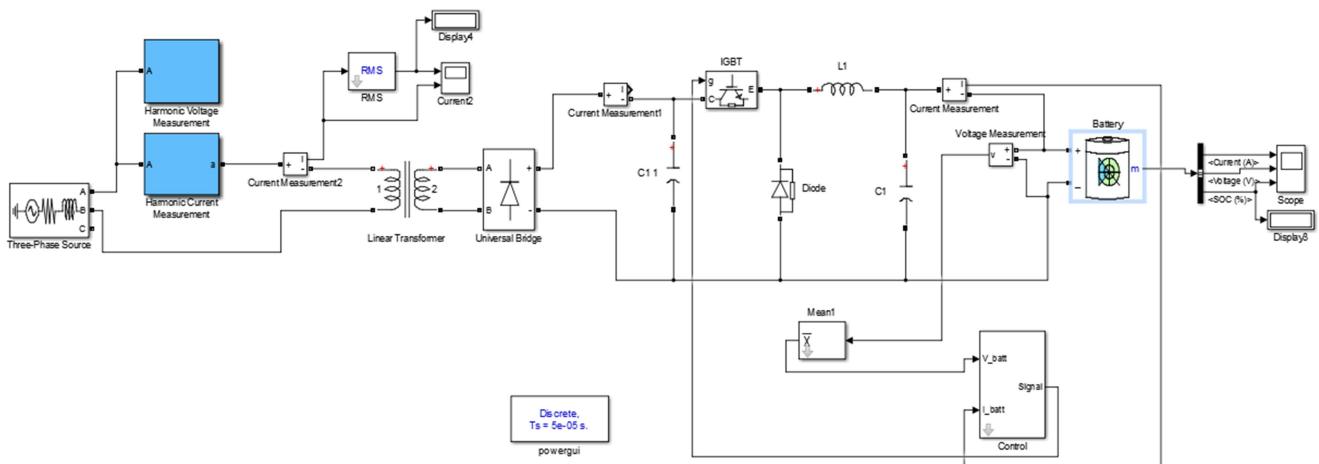


Fig. 3. Ilustração do modelo utilizado de carregamento da bateria de íon-lítio.

### C. Resultados da simulação - Estudo de Caso 1

Uma vez realizadas as simulações, a Tabela I e a Figura 5 apresentam os valores obtidos, dos níveis de tensão e corrente médias, verificadas na bateria, em função do estado da carga da mesma. Complementarmente, encontra-se destacado ainda nesta Tabela I a corrente fundamental verificada na entrada do retificador neste estudo de caso 1.

Tabela I – Tensões e correntes médias na bateria e correntes de ordem fundamental na entrada do retificadas em função do nível de carregamento – Caso 1.

Carga	$V_{\text{médio}}$ [V]	$I_{\text{médio}}$ [A]	$I_{\text{fundamental}}$ [A]
5%	141,0	31,0	28,4
10%	149,3	30,9	28,9
20%	153,5	30,9	29,7
30%	154,7	30,2	28,5
40%	155,4	29,5	28
50%	155,7	28	26,4
60%	156	19	16,8
70%	156	12	10,3
80%	156	7	5,2
90%	156	2	1,1
100%	168	0	0

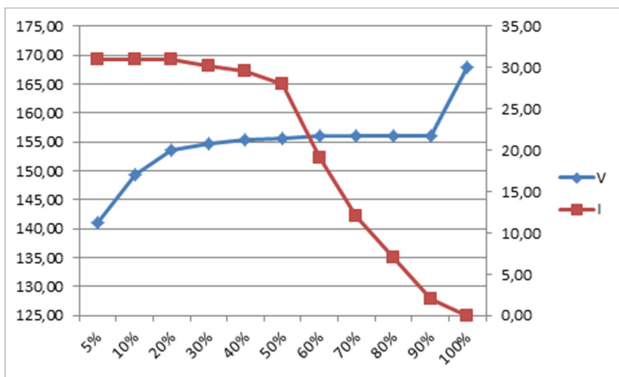


Fig. 5. Tensões [V] e correntes [A] médias verificadas na bateria em relação aos níveis de carregamento – Caso 1.

Por meio deste gráfico torna-se possível traçar o gráfico de potência de carregamento do sistema de recarga em função de cada nível da carga, conforme Figura 6.

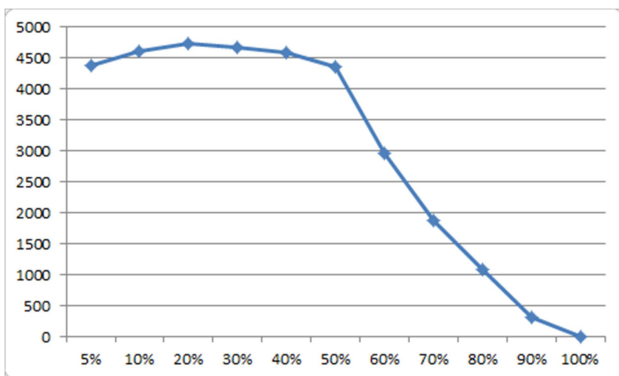


Fig. 6. Potência transferida à bateria [W] em função do nível de carregamento [%] da mesma – Caso 1.

A Figura 7 ilustra um gráfico que detalha o processo de recarga em função do tempo, sendo o mesmo apresentado para uma recarga de bateria de 10% a 90% de nível de carga.

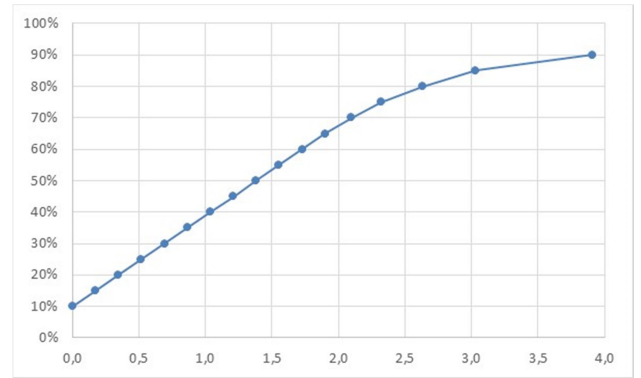


Fig. 7. Processo de recarregar da bateria de íon-lítio [%] em função do tempo [h] – Caso 1.

Destas simulações, para os diferentes estados de carga da bateria, obteve-se os distintos espectros harmônicos, os quais estão apresentados na Tabela II. Nesta tabela verifica-se as principais ordens harmônicas, conforme já afirmado, presentes na corrente durante o processo de recarga e também a distorção harmônica total de corrente.

Tabela II – Taxas de distorção harmônica presentes na corrente do sistema em função taxa de carga – Caso 1.

Carga	$I_{3h\%}$	$I_{5h\%}$	$I_{7h\%}$	$I_{9h\%}$	$I_{11h\%}$	$I_{13h\%}$	DTI%
5%	34,30	7,18	4,95	3,33	2,30	0,85	37,23
10%	35,10	8,78	3,64	2,86	1,73	1,12	37,00
20%	32,15	9,29	3,33	2,65	1,86	1,13	33,85
30%	31,71	8,65	3,60	2,28	1,71	1,22	33,24
40%	32,22	8,67	3,60	2,35	1,75	1,22	33,73
50%	37,52	8,06	3,90	2,50	1,85	1,22	38,78
60%	45,97	9,05	6,67	2,87	1,37	1,57	48,75
70%	56,51	1,13	8,95	4,37	3,05	1,90	60,92
80%	68,69	3,35	9,82	8,11	4,02	3,38	76,90
90%	79,88	55,54	30,50	13,09	8,27	7,27	103,76
100%	4,14	4,06	3,95	3,81	3,64	3,45	13,52

Onde, DTI% é a distorção total de corrente verificada neste sistema de recarga.

Nesse estudo de caso, também foram analisadas as taxas harmônicas dos níveis de tensão do sistema nas mesmas condições das apresentadas anteriormente para a análise da corrente. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela III.

Tabela III – Taxas de distorção harmônica presentes na tensão no ponto de conexão do sistema em função taxa de carga – Caso 1.

Carga	$V_{3h\%}$	$V_{5h\%}$	$V_{7h\%}$	$V_{9h\%}$	$V_{11h\%}$	$V_{13h\%}$	DTT%
5%	4,90	1,52	1,24	1,03	1,05	0,78	5,62
10%	4,68	1,96	1,14	1,15	0,85	0,65	5,62
20%	4,44	2,14	1,08	1,10	0,94	0,70	5,45
30%	4,19	1,91	1,11	0,91	0,83	0,70	5,08
40%	4,16	1,87	1,09	0,91	0,82	0,68	5,03
50%	4,54	1,66	1,09	0,94	0,81	0,66	5,29
60%	3,35	1,07	1,17	0,58	0,40	0,49	4,03
70%	2,62	1,11	0,99	0,63	0,54	0,39	3,30
80%	1,39	1,02	0,46	0,49	0,30	0,30	1,98
90%	0,41	0,47	0,36	0,20	0,16	0,16	0,83
100%	0	0	0	0	0	0	0,02

Em que DTT% é a distorção harmônica total verificada no ponto de conexão deste sistema de recarga.

#### D. Resultados da simulação - Estudo de Caso 2

A Tabela IV e a Figura 8 mostram os valores obtidos, dos níveis de tensão e corrente médias, no estudo de caso 2.

Tabela IV – Tensões e correntes médias na bateria e correntes de ordem fundamental na entrada dos retificadores em função do nível de carregamento – Caso 2.

Carga	V <sub>médio</sub> [V]	I <sub>médio</sub> [A]	I <sub>fundamental</sub> [A]
5%	141,3	13,71	12,75
10%	149,1	12,94	12,2
20%	153,2	14,06	12,48
30%	154,5	15,37	14,21
40%	155,2	15,20	14,10
50%	155,6	15,00	12,81
60%	155,90	14,32	12,61
70%	156,10	10,80	9,27
80%	156,00	6,20	4,85
90%	156,00	1,60	1,15
100%	168,00	0,00	0,00

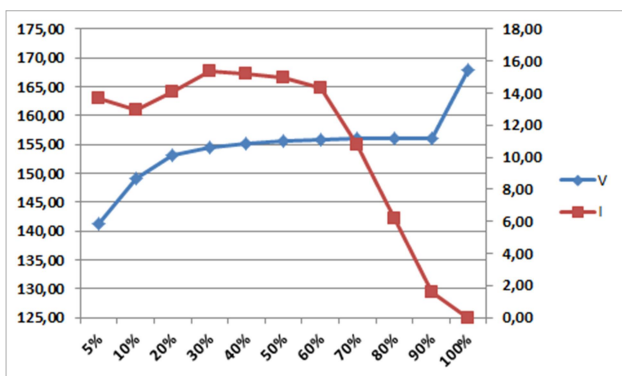


Fig. 8. Tensões [V] e correntes [A] médias verificadas na bateria em relação aos níveis de carregamento – Caso 2.

O gráfico da Figura 9 ilustra a potência de carregamento do sistema de recarga em função de cada nível da carga neste segundo estudo de caso.

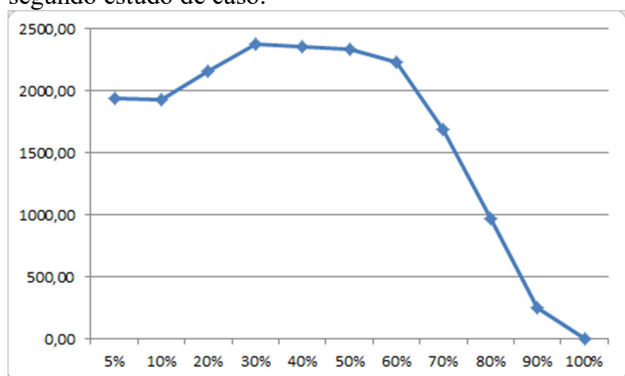


Fig. 9. Potência transferida à bateria [W] em função do nível de carregamento [%] da mesma – Caso 2.

A Figura 10 mostra o processo de recarga em função do tempo para uma recarga típica de 10% a 90% de nível de carregamento.

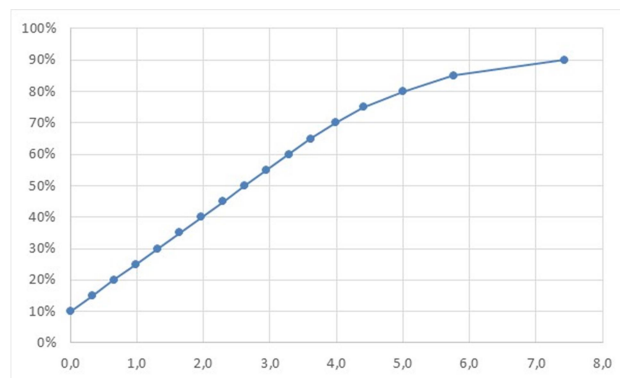


Fig. 10. Processo de recarregar da bateria de íon-lítio [%] em função do tempo [h] – Caso 2.

Advindo destas simulações, para os diferentes estados de carga da bateria, obteve-se os distintos espectros harmônicos, os quais estão apresentados na Tabela V.

Tabela V – Taxas de distorção harmônica presentes na corrente do sistema em função taxa de carga – Caso 2.

Carga	I <sub>3h</sub> %	I <sub>5h</sub> %	I <sub>7h</sub> %	I <sub>9h</sub> %	I <sub>11h</sub> %	I <sub>13h</sub> %	DTI%
5%	51,67	11,23	8,30	3,27	2,56	2,01	54,41
10%	54,35	12,01	7,89	3,23	2,96	1,56	56,95
20%	49,80	8,18	5,15	2,0	1,53	1,53	53,39
30%	49,14	8,61	8,64	4,55	3,42	1,55	52,36
40%	51,19	10,85	7,94	2,93	2,84	1,86	53,97
50%	51,56	11,02	6,67	3,74	2,84	1,99	54,0
60%	52,95	13,29	7,60	2,23	2,40	2,22	56,42
70%	56,59	14,79	8,94	4,24	2,94	1,66	60,20
80%	68,3	29,34	9,34	7,34	3,87	3,52	76,06
90%	79,95	55,41	29,97	12,11	7,78	7,25	103,85
100%	4,13	4,06	3,95	3,81	3,64	3,45	13,43

Mais uma vez, realizou-se a verificação das distorções harmônicas de tensão no ponto de conexão do sistema de recarga. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela VI.

Tabela VI – Taxas de distorção harmônica presentes na tensão no ponto de conexão do sistema em função taxa de carga – Caso 2.

Carga	V <sub>3h</sub> %	V <sub>5h</sub> %	V <sub>7h</sub> %	V <sub>9h</sub> %	V <sub>11h</sub> %	V <sub>13h</sub> %	DTT%
5%	3,01	1,07	1,13	0,60	0,55	0,49	3,66
10%	3,04	1,13	1,04	0,55	0,61	0,38	3,65
20%	3,13	1,0	0,98	0,62	0,57	0,52	3,75
30%	3,36	1,0	1,13	0,67	0,68	0,56	3,98
40%	3,31	1,17	1,20	0,57	0,67	0,62	4,0
50%	3,03	1,08	0,91	0,66	0,62	0,51	3,64
60%	3,05	1,19	0,93	0,49	0,60	0,47	3,67
70%	2,41	1,05	0,88	0,54	0,46	0,31	3,04
80%	1,51	1,08	0,48	0,49	0,32	0,34	2,11
90%	0,42	0,49	0,37	0,19	0,15	0,17	0,84
100%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Uma vez obtido os resultados, advindo dos dois estudos de casos implementados, passa-se para a análise crítica de desempenho do processo de recarga das baterias de íon-lítio. Tal avaliação, será feita na secção subsequente.

## VI. AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS NOS ESTUDOS DE CASOS EM TERMOS DOS INDICADORES DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Uma vez realizados os estudos de casos e colhidas as informações dos indicadores de distorções harmônicas de tensão e corrente durante o processo de recarga avaliado, torna-se possível a análise de desempenho do mesmo em termos deste indicador de qualidade da energia elétrica.

Assim sendo, as seguintes afirmativas podem ser feitas:

- Da observação dos gráficos contidos nas Figura 5 e 8, pode-se verificar uma boa correlação do controle ora implementado, uma vez que a corrente se mantém constante durante a primeira etapa do processo de recarga, enquanto, num segundo momento, quando a tensão atinge seu valor nominal de recarga, esta é mantida num patamar fixo de controle. A inversão de controle ocorre, em ambos casos estudado, num percentual de recarga em torno de 60%, o que configura aproximadamente 45% do tempo de recarga (Figura 7 e 10).
- No que se refere à potência de recarga (Figuras 6 e 9), verifica-se que a mesma se conserva em um patamar elevado, em ambos casos estudados, até praticamente o instante de inversão do controle, isto é, entre 50% e 60% do carregamento total da bateria. Sendo que no primeiro caso este patamar é mantido em cerca de 4,5kVA e no segundo caso há variações em torno de 2,2kVA.
- Nos dois casos estudados percebe-se a existência de distorções harmônicas de corrente e, conseqüentemente, de tensão no ponto de conexão do VE. Vale destacar que no Caso 1 (recarga rápida) houve uma menor distorção total de corrente, quando comparada com o Caso 2 (recarga típica).
- Não obstante a afirmação anterior, as distorções de tensão tiveram maiores magnitudes no primeiro caso estudado comparado ao segundo, uma vez que as correntes harmônicas apresentaram, em termos absolutos, valores mais elevados.
- É muito importante observar que os percentuais de distorção harmônicas de tensão e corrente, tanto individuais quanto totais, são mantidos, em ambos os casos estudados, estáveis até que o processo de recarga atinge cerca de 60% da carga total da bateria, o que ocorre, tanto no Caso 1 quanto no 2, em aproximadamente 45% do tempo total de carregamento.
- Por fim, percebe-se, de uma forma geral, em termos de distorção harmônicas, que as mesmas são estáveis enquanto a potência de recarga é constante, o que em geral ocorre até que o controle altere de corrente constante para tensão constante, ou seja, até que se atinja a tensão nominal de recarga.

## VII. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou, em um primeiro momento, uma introdução à problemática da inserção do veículo elétrico no sistema de distribuição de energia, perfazendo um estado da arte acerca do mesmo e também detalhando seu processo de recarga. Neste ínterim, foi ainda apresentado e discutido problemas relacionados à deterioração da qualidade da energia no ponto de conexão dos VEs, os quais são provocados, principalmente, devido à não linearidade deste procedimento de recarga, gerando harmônicos de corrente e tensão no ponto de conexão do VE.

Posteriormente, foram realizados dois estudos de caso por meio da implementação do processo de recarga da bateria íon-lítio – principal tipo de acumulador usado em VE – em um software no domínio do tempo. Os resultados alcançados se mostraram adequados e coerentes com os modelos teóricos elencados, o que possibilitou uma embasada análise de desempenho. Sendo que a principal conclusão, advinda deste estudo, é que os níveis de distorções harmônicas se apresentam estáveis até que o carregamento atinja 60% do seu valor total, o que leva cerca de 45% do tempo de carregamento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao CNPQ (Proc. 460208/2014-4), à FAPEMIG (Proc. TEC-APQ-02447-15) e à CAPES pelo suporte financeiro concedido através das bolsas de estudos e Projetos de Pesquisa, e à Universidade Federal de Uberlândia, que disponibilizou sua estrutura para a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Who Killed the Electric Car? Direção: Chris Paine. [S.L.]: SONY PICTURES.2006.
- [2] Borba, B. S. M. C., 2012, Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro. Tese de D.Sc, PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [3] IEA, 2011 a. International Energy Agency, Key World Energy Statistics. France.
- [4] MME, 2011. Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional. Brasil.
- [5] CANTARINO, M, Modelo simplificado para cálculo de autonomia de veículo elétrico com motor de relutância variável
- [6] Sovacool, B. K., Hirsh, R. F., 2009. Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. Energy Policy 37: 1095-1103.
- [7] Batteryuniversity.com/learn/
- [8] [http://www.arandanet.com.br/midiaonline/eletricidade\\_moderna/2015/junho/index.php](http://www.arandanet.com.br/midiaonline/eletricidade_moderna/2015/junho/index.php)
- [9] <https://owners.nissanusa.com/content/techpub/ManualsAndGuides/LEAF/2014/2014-LEAF-owner-manual.pdf>
- [10] DUGAN, R. C. et al. Electrical power systems quality. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.