

Aplicação do Retificador *True Unity Power Factor* em Estações de Carregamento Ultrarrápidas

Dener A. de L. Brandão* Thiago M. Parreiras*
Igor A. Pires** Braz de J. Cardoso Filho***

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil
(e-mails: dalbrandao@ufmg.br; thiago.m.parreiras@ieee.org)

** Departamento de Engenharia Eletrônica da Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais (e-mail: iap@ufmg.br)

*** Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais (e-mail: cardosob@ufmg.br)

Abstract: With the increasing demand for electric vehicles worldwide, the need for technically robust chargers capable of providing fast recharges has become essential. The Regular Ultra Fast Charging (R-UFC) can meet the demands of vehicles in public transport, such as electric buses, worldwide. This work aims to demonstrate the use of a True Unity Power Factor rectifier for R-UFC stations with loads composed of supercapacitors. The simulation results in Simulink® showed that the total demand distortion (TDD) was 0.9%, meeting the recommendations of international organizations in relation to the injection of harmonics in the Electrical System, such as IEEE 519 2014, which recommends a maximum of 5%, as well as fulfilling its role of ultra-fast charger.

Resumo: Com o aumento da demanda por veículos elétricos em todo o mundo, a necessidade de carregadores robustos tecnicamente e capazes de fornecer recargas rápidas se tornou essencial. As estações de carregamento ultrarrápido por oportunidade (R-UFC) podem atender às demandas dos veículos no transporte público, como ônibus elétricos, em todo o mundo. Esse trabalho tem por objetivo demonstrar a utilização de um retificador *True Unity Power Factor* para estações R-UFC com cargas compostas por supercapacitores. Os resultados de simulação no Simulink® mostraram que a distorção harmônica em porcentagem com a corrente de demanda (TDD) foi de 0,9%, atendendo a recomendações de organizações internacionais em relação à injeção de harmônicos no Sistema Elétrico, como a IEEE 519 2014, que recomenda um máximo de 5%, bem como cumprindo seu papel de carregador ultrarrápido.

Keywords: rectifier, charger, unity power factor; ultra-fast charging; e-bus; ultracapacitor

Palavras-chaves: retificador; carregador; fator de potência unitário; carregamento ultrarrápido; e-bus; ultracapacitor

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, muitos países ao redor do mundo têm adotado medidas e vêm realizando mudanças em suas legislações para, por exemplo, reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera. Uma das formas de redução de gases poluentes é através da mudança gradual da frota veicular à combustão em *plug-in electric vehicles* (PEVs) e *plug-in hybrid electric vehicles* (PHEVs). Tal movimento é forte principalmente na União Europeia, na qual muitos países têm propostas de proibir carros à combustão até 2040 e outros, mais ambiciosos neste projeto, até 2030 (G1 (2018)). No Brasil, o programa Rota 2030 tem, dentre suas propostas, o incentivo ao investimento em programas de P&D por parte das empresas automotivas no país, principalmente com uma perspectiva de desenvolvimento sustentável, o que engloba o desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos (MDIC - Brasil (2018)).

Com tais projetos em andamento, há a necessidade de se ampliar e melhorar a infraestrutura para comportar o crescente ramo de locomoção que deve ser adotado em todo o mundo. Uma grande preocupação dos consumidores está relacionada com a velocidade de carregamento dos PEVs e PHEVs que, ao contrário dos veículos a combustão, tem tempos muito mais elevados para chegarem à plena autonomia. Portanto, o desenvolvimento de estações de carregamento ultrarrápido (R-UFC) são fundamentais para atingir esse objetivo.

Dentre os empreendimentos de R-UFC, pode-se citar o estudo realizado por Lemon et al. (1999), no qual realizaram o R-UFC em ônibus com carregadores de 300 kW e baterias de Ni-Cd e, posteriormente, baterias de chumbo-ácido seladas. No estudo de Steiner et al. (2007), foi utilizado um banco de ultracapacitores em um LRV (sigla em inglês para veículo ferroviário leve) na cidade

alemã de Manheem. Obteve-se uma economia de energia de 30% e a possibilidade de operar o LRV livre da catenária por algumas centenas de metros, especialmente no centro da cidade. Na China, há empreendimentos de ônibus com supercapacitores para recargas ultrarrápidas (MIT Technology Review (2009)). Os ônibus alcançam de 5 a 8 km a cada recarga, que é realizada em poucos minutos. Empreendimentos atuais tem sido realizados por diversas empresas, como os ônibus TOSA na Suíça (ABB (2018)). Com 10 ônibus em operação desde 2018 na cidade de Geneva que conseguem transportar 133 passageiros cada, as recargas ultrarrápidas são realizadas em 13 pontos de 600 kW em 20 segundos.

As estações de carregamento ultrarrápido precisam atender a requisitos de injeção de harmônicos na rede. Normas internacionais, como a IEC 61000-3-2 (IEC (2002)) e recomendações como a IEEE 519-2014 (IEEE (2014)) para limites de harmônicos de tensão e, para os harmônicos na corrente, a norma IEC 61000-3-12 (IEC (2011)) e a NEMA PE-5-1997 (NEMA (2003)), que segue a recomendação da IEEE 519-2014, são utilizadas em diversos países, muitas vezes replicadas em legislações locais, como é o caso do Brasil através do Módulo 8 do PRODIST (ANEEL (2018)), baseado em normas da IEC. Portanto, além dos desafios inerentes ao carregamento de alta potência, tem-se ainda a questão regulatória a ser atendida.

Outro problema para as estações de carregamento ultrarrápido está relacionado à potência máxima de carregamento das cargas. Extremamente difundidas em PEVs e PHEVs, as baterias de íon-lítio não possuem uma densidade de potência elevada para carregamentos muito rápidos e, conseqüentemente, com alta potência, sendo prejudiciais à sua vida útil e até mesmo podendo danificá-las, como mostrado em Sertkaya et al. (2015). Sendo assim, alternativas como o uso de supercapacitores para lidar com a injeção de alta potência no carregamento é promissora.

Além disso, a inserção massiva de sistemas de carga rápida pode alterar as características de ressonância da rede elétrica. Segundo o trabalho de Sun et al. (2018), a elevada injeção de harmônicos na rede causada pelos sistemas de carregamento ultrarrápido seria capaz de alterar o ponto de ressonância da rede original de 1600 Hz para 1250 Hz numa rede de transmissão holandesa em Bronsbergen. Esse novo ponto de ressonância pode ser atingido pelos harmônicos característicos de inversores de 12 pulsos. As ressonâncias podem gerar sobretensões e sobrecorrentes nos sistemas, sendo, portanto, prejudiciais.

Esse artigo tem por objetivo validar uma solução para os três problemas com a utilização de um retificador *True Unity Power Factor* (TUPF) para carregamento de banco de supercapacitores de ônibus elétricos através de recargas ultrarrápidas, uma contribuição ao trabalho de Justino et al. (2016), no qual é realizado a utilização do TUPF numa carga resistiva.

Além de atender às normas citadas, o TUPF reduz a probabilidade de ressonâncias devido a ausência de elementos capacitivos de filtro, como mostrado no trabalho de Almeida and Cardoso Filho (2018), no qual são analisados os fatores de amplificação de ressonância por parques de turbinas eólicas e conversores tradicionais. A utilização do TUPF traz como benefício a eliminação dos harmônicos

até a 50ª ordem, além de modificar, no caso do trabalho de Almeida and Cardoso Filho (2018), as características de ressonância paralela do parque eólico, deslocando as frequências de suas ocorrências para valores mais altos, diminuindo a probabilidade de serem excitados.

Na seção 2 serão descritos alguns sistemas de carregadores ultrarrápidos, com topologias tradicionais e uma abordagem do retificador TUPF e seu funcionamento. Na seção 3, serão abordadas questões relacionadas ao armazenamento de energia. A seção 4 mostra os esquemas de controle do TUPF como retificador e do conversor c.c. ligado à carga, além dos parâmetros utilizados em simulação. Por fim, a seção 5 mostra os resultados obtidos, bem como sua análise, seguida da seção 6 que conclui o trabalho.

2. CARREGADORES ULTRARRÁPIDOS

2.1 Topologias Tradicionais

A tradicional ponte de diodos trifásica, vista na figura 1, também chamada de retificador a 6 pulsos, possui baixa qualidade de energia, baixo *range* de potência e necessita de um filtro c.c. volumoso, como citado em Justino et al. (2016). Outra solução é o retificador a 12 pulsos, visto na figura 2 que, apesar de ser recomendado para aplicações para potências superiores a 300 kW e possuir baixo custo, não atende às normas de harmônicos especificadas em normas provenientes da IEC sem a utilização de um filtro c.a. e, bem como a solução de 6 pulsos, possui um filtro c.c. volumoso.

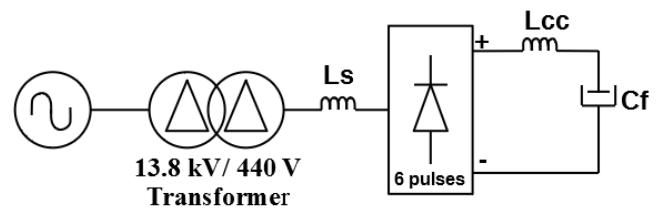


Figura 1. Retificador trifásico de 6 pulsos.

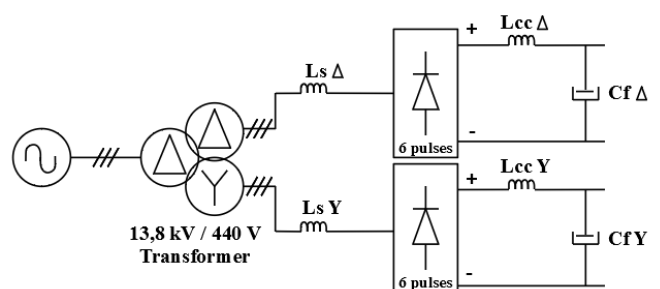


Figura 2. Retificador trifásico de 12 pulsos.

Os retificadores ativos, como o mostrado na figura 3, possuem a vantagem da implementação do controle da tensão do barramento c.c. e outras vantagens em relação à geração de harmônicos na rede elétrica. Entretanto, há diversas limitações para aplicações em alta potência, como suas altas perdas de comutação, filtros c.a. volumosos e problemas de interferência eletromagnética (EMI), todos

relacionados à alta frequência de chaveamento do conversor. Os filtros senoidais para conexão à rede, como os filtros LCL, são propensos à ressonâncias e, portanto, tornam-se um problema nessas aplicações, principalmente em altas potências. A redução da frequência de chaveamento causaria um aumento no custo e no volume dos filtros c.a., não sendo uma opção viável técnica e economicamente. Uma outra solução para os filtros seria a utilização de filtros senoidais ativos, mas, além de elevar ainda mais os custos da aplicação, traria complexos problemas de controle (Justino et al. (2016)).

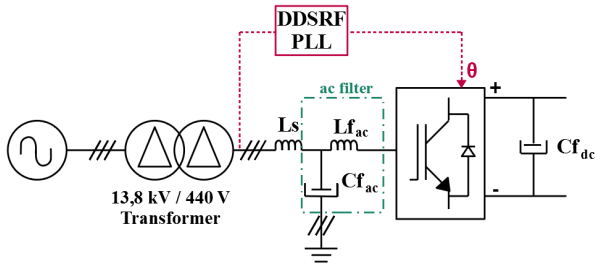


Figura 3. Retificador ativo para aplicações de carregadores.

2.2 Multilevel Modular Cascade Converter (MMCC)

Uma topologia que vem sendo muito discutida atualmente para diversas aplicações como, por exemplo, geração de energia distribuída, é a topologia *Multilevel Modular Cascade Converter* (MMCC). Como se trata de uma topologia que pode trabalhar em altas potências, a utilização do MMCC para estações de carregamento ultrarrápido deve ser considerada, como mostra o estudo de Tsirinomeny and Rufer (2015).

Os conversores MMCC abrem a possibilidade da conexão *transformerless*, reduzindo os custos com a aquisição e instalação de transformadores de média tensão entre o conversor e a rede elétrica, conforme as topologias mostradas no trabalho de Akagi (2011). Com o uso de um número substancial de células, vários níveis podem ser obtidos na tensão do lado da rede podendo eliminar a necessidade de um filtro de segunda ordem. Contudo, o uso de grande quantidade de componentes traz desafios adicionais de controle e confiabilidade.

Entretanto, o TUPF traz como vantagens a utilização de transformadores e topologias de conversores simples e convencionais já consolidados na indústria, o que reduz o custo e a aumenta a confiabilidade da solução. O uso de transformadores garante também o isolamento galvânico entre a entrada e a saída do conversor. Além disso, com um controle e modulações adequados, pode-se obter com o TUPF uma forma de onda praticamente senoidal na rede elétrica sem uso de filtros com elementos capacitivos e com baixas frequências de chaveamento, reduzindo as perdas.

2.3 Retificador TUPF

O retificador TUPF, apresentado em Parreiras (2015) e mostrado na figura 4, tem por objetivo eliminar todos os harmônicos até a 50ª ordem, a fim de atender às diversas normas e recomendações internacionais, citadas na seção 1.

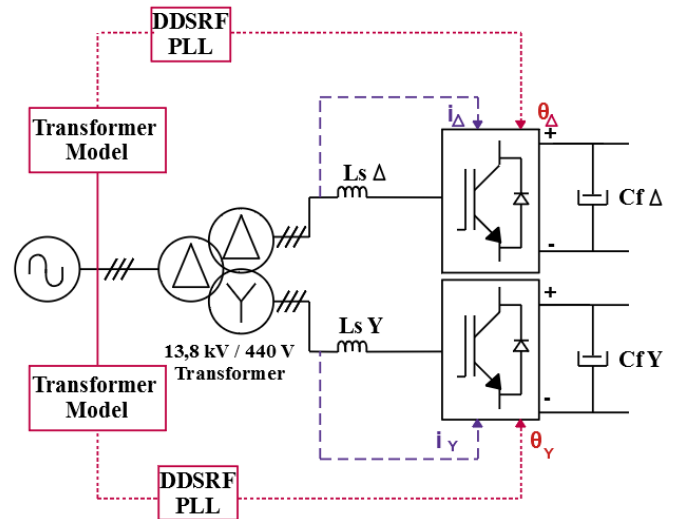


Figura 4. Retificador *True Unity Power Factor* (TUPF).

Para tal, o TUPF é composto por um transformador de três enrolamentos nos quais exista uma defasagem angular de 30° entre um dos secundários e o primário; reatores de entrada para os conversores, de forma a reduzir a amplitude dos harmônicos da corrente de entrada; e conversores de dois ou três níveis que utilizam a modulação SHE-PWM de 9 pulsos num ambiente de controle dinâmico de corrente (Parreiras (2015)). Essa solução permite eliminar o uso de filtros capacitivos na entrada, bem como a redução da frequência de chaveamento. A tabela 1 exemplifica os harmônicos que são eliminados por cada componente do TUPF.

Tabela 1. Harmônicos eliminados por cada componente do TUPF.

Componente do TUPF	Harmônicos Eliminados
Transformador de três enrolamentos	5, 7, 17, 19, 29, 31, 41, 43
Conversores com SHE-PWM	11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49

Fonte: Parreiras (2015)

2.4 Modulação por Eliminação Seletiva de Harmônicos (SHE-PWM)

A modulação SHE-PWM, proposta inicialmente em Patel and Hoft (1973), consiste em manipular o ângulo de disparo das chaves ao longo do ciclo de operação, de forma que se consiga eliminar o número de harmônicos igual a $M-1$, sendo M o número de disparos realizados por semiciclo da fundamental. Para calcular os ângulos de disparo, é necessário conhecer os harmônicos a serem eliminados, o número de níveis do conversor e o índice de modulação da onda. É possível ver na figura 5 uma forma de onda genérica, esboçando o funcionamento do SHE-PWM para conversores de 2 níveis.

Dessa forma, deve-se encontrar o valor dos ângulos de transição de estado a partir do conjunto de equações, mostrado em (2).

$$f^0 + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^0 \cdot d\alpha = 0 \quad (1)$$

$$\alpha^1 = \alpha^0 + d\alpha$$

$$\begin{bmatrix} 1 - 2\cos(\alpha_1) + \dots + 2(-1)^M \cos(\alpha_M) \\ 1 - 2\cos(n_1 \cdot \alpha_1) + \dots + 2(-1)^M \cos(n_1 \cdot \alpha_M) \\ \vdots \\ 1 - 2\cos(n_i \cdot \alpha_1) + \dots + 2(-1)^M \cos(n_i \cdot \alpha_M) \end{bmatrix} = K \quad (2)$$

Sendo $K = [M_i \ 0 \ \dots \ 0]^T$ e M_i o índice de modulação.

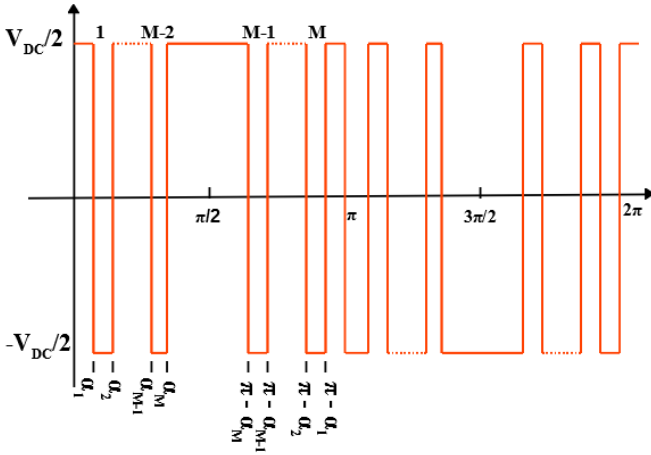


Figura 5. Onda genérica da modulação SHE-PWM para conversor a 2 níveis.

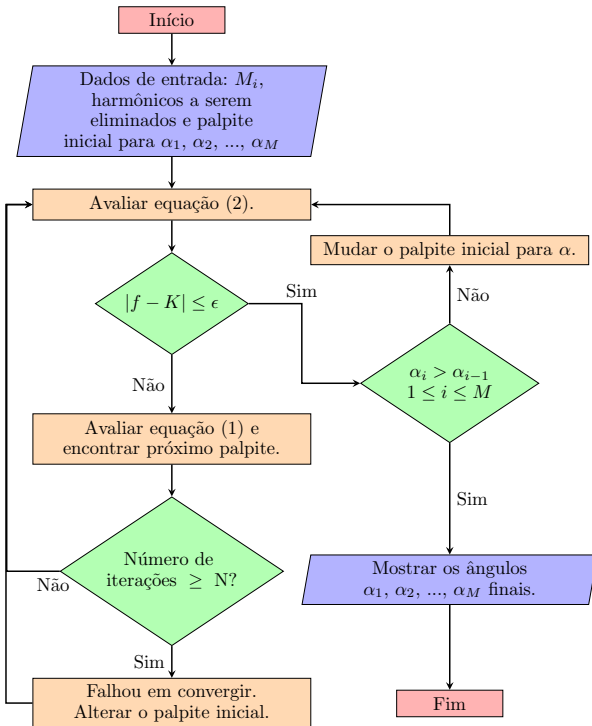


Figura 6. Fluxograma do método de iterações lineares de Newton para obtenção dos ângulos de transição de estado.

A solução para (2) não é trivial, pois as equações são não-lineares e transcendentais. Dessa forma, para resolvê-las é necessário um método numérico para encontrar uma solução. O método utilizado em Parreiras (2015) baseado em Patel and Hoft (1973) é o método de iterações lineares de Newton, conforme mostra o esquema da figura 6, utilizando as derivadas parciais de (2) em (1) para encontrar a solução.

3. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

3.1 Demanda de Energia e Potência de E-Buses

Abordando o conceito de *Regular Ultra-Fast Charging - R-UFC*, o trabalho de Justino et al. (2014) tem como análise a aplicação de e-bus na cidade de Belo Horizonte, no Brasil, com veículos *Bus Rapid Transit (BRT)* do MOVE, sistema de transporte público da cidade.



Figura 7. Corredor do MOVE Antônio Carlos em Belo Horizonte.

Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte

O perfil de elevação da cidade implica em desafios adicionais na utilização de e-bus e R-UFC. A rota estudada liga a Estação de Ônibus na região da Pampulha ao centro da cidade, totalizando cerca de 9 km com paradas de 10 a 30 segundos nas estações intermediárias com média de 500 m entre cada estação. Os ônibus, por sua vez, possuem 12 a 21 m (quando articulado) pesando cerca de 18 toneladas.

Após análise do perfil de energia encontrado, estimou-se um banco de baterias de íons de lítio tradicional de 8,45 toneladas, tornando-o inviável para a operação diária do e-bus. Uma redução da quantidade de baterias acarretaria em mais recargas durante o dia. Quando utilizado o conceito de R-UFC e o armazenamento de energia modificado para supercapacitores, poderia-se obter um banco de armazenadores de aproximadamente 1 tonelada e 2,7 kWh de capacidade de energia, além de realizar recargas ultrarrápidas ao longo do percurso, tendo como maior tempo de recarga cerca de 30 segundos.

3.2 Supercapacitores

Os supercapacitores, diferente dos capacitores eletrolíticos e de alguns eletrolíticos, possuem baixas tensões de operação e sua densidade de energia é de cerca de 1 a 30 Wh/kg, cerca de 10 a 50 vezes menor que as baterias de íon-lítio. Outra desvantagem está relacionada a sua curva de descarga que, diferente da curva de descarga da bateria na qual a tensão permanece praticamente constante durante 90% da sua descarga, a curva de tensão do capacitor

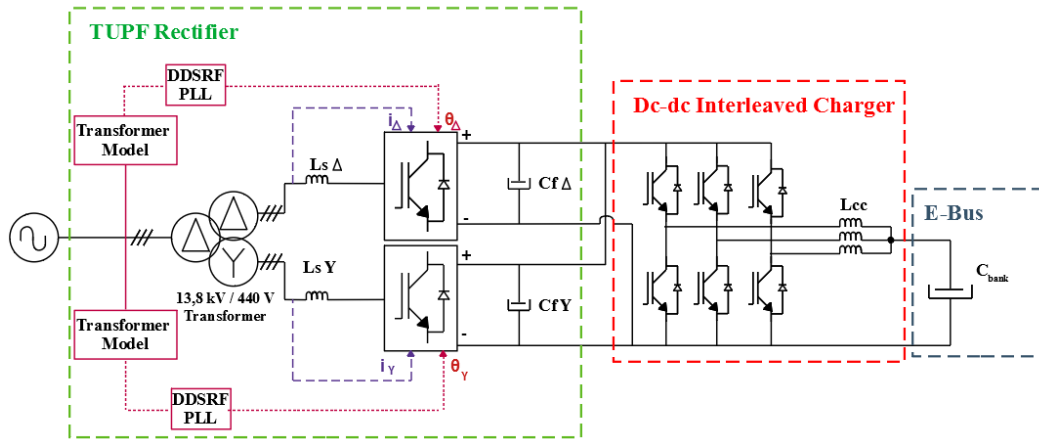


Figura 8. Configuração do carregador ultrarrápido utilizando o retificador TUPF.

cai linearmente com a carga, dificultando o aproveitamento da energia, como mostrado em Dias-González et al. (2016).

As grandes vantagens dos supercapacitores estão no seu tempo de carga, na altíssima ciclagem e na sua elevada densidade de potência. Juntamente com uma solução de 2,5 MW composta por volantes de inércia, uma solução de 2 MW foi instalada na Long Island Rail Road (LIRR) nos EUA para suprir a demanda de partida dos trens e, além disso, armazenar a energia gerada pelas frenagens regenerativas (Green Car Congress (2014)).

O modelo comumente adotado para os supercapacitores é composto pela resistência série (esr), representada na figura 9 pelo resistor R_s , por um resistor modelando a auto-descarga do capacitor (R_1) e um capacitor ideal.

O algoritmo típico para carregamento de supercapacitores é o mesmo para baterias de íons de lítio, no qual é aplicada uma corrente constante até a carga atingir sua tensão nominal. Porém, a corrente pode ser cessada nos supercapacitores, enquanto as baterias permanecem sendo carregadas no modo de potência constante.

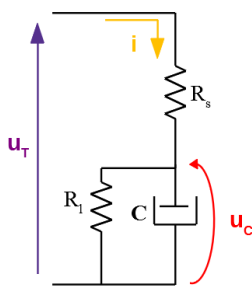


Figura 9. Modelagem do supercapacitor.

Para avaliar a utilização do Retificador TUPF como carregador para estações de carregamento ultrarrápido, teve-se como base as definições de energia encontradas para o corredor do MOVE Antônio Carlos calculadas no trabalho de Justino et al. (2014). Nesse trabalho, é realizado o cálculo da energia necessária para cada parada do *e-bus*, de acordo com as atuais paradas dos ônibus no corredor. O cálculo foi realizado analisando o trajeto de ida e de volta do ônibus entre a Estação Pampulha e o centro da cidade.

Analisando a energia necessária entre cada parada, encontrou o valor máximo de 2,66 kWh entre duas paradas consecutivas. Dessa forma, o banco de capacitores deve ser capaz de armazenar tal energia em uma recarga única. Além disso, foi proposta uma taxa de recarga de 77,78 Wh/s, ou seja, estações de recarga de 280 kW, totalizando um carregamento em 34,7 s para a parada de maior recarga. No trabalho de Justino et al. (2016), é realizada apenas o teste para uma carga resistiva de 350 kW utilizando o TUPF como conversor, mas não há o carregamento do supercapacitor, bem como sua modelagem.

Neste trabalho, foi conectado em paralelo com o barramento c.c. de 700 V do TUPF um conversor c.c./c.c. *interleaved* de três braços conectado à carga de supercapacitores com indutâncias de 600 μ H e frequência de chaveamento de 5 kHz. Tal topologia reduz o *ripple* da corrente de saída em três vezes frente a conversores *buck* bidirecionais tradicionais. A figura 8 mostra um esquema da simulação realizada utilizando o TUPF e o conversor c.c./c.c. *interleaved*.

4. CONTROLE DO CARREGADOR TUPF

No controle do TUPF, a referência de potência ativa é gerada pelo controlador de tensão, como pode ser observado na figura 10.

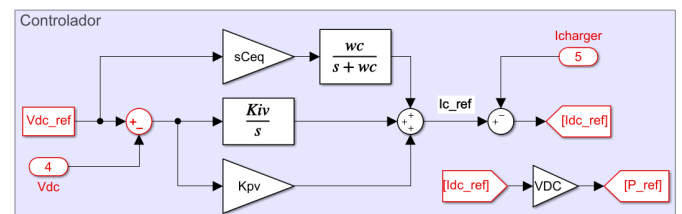


Figura 10. Controle de tensão do barramento c.c. do TUPF.

Utilizou-se a abordagem do controle de corrente a partir do eixo dq alinhado com o fasor de tensão da rede (Park (1929)), conforme figura 11. Realizando $Q^{ref} = 0$, tem-se fator de deslocamento unitário. Foram adotadas estratégias de controle realimentado, comando de *feed-forward*, desacoplamento de eixos e a combinação do sis-

tema em malha aberta com estimativa dos parâmetros da planta. O controle em malha fechada foi implementado numa frequência de amostragem de 5,76 kHz para implementação posterior em um microcontrolador da Texas Instruments® e o SHE-PWM implementado em FPGA com frequência de amostragem de 250 kHz.

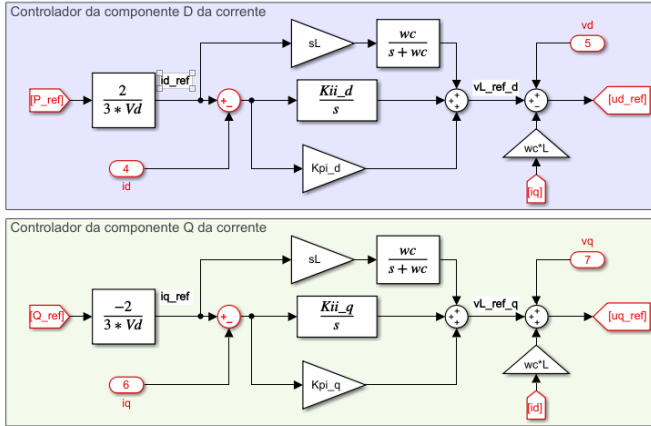


Figura 11. Controle de corrente do TUPF.

$$\frac{V^{dq}(s)}{I^{dq}(s)} = sL + k_p^{dq} + \frac{k_i^{dq}}{s} \quad (3)$$

$$\frac{I^{Charger}(s)}{V_{DC}(s)} = sC_{eq} + k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \quad (4)$$

Os ganhos foram calculados para que os polos do sistema, cujas expressões para rigidez dinâmica são (3) e (4), estejam em frequências mais elevadas, espaçados de forma adequada para evitar interferência entre os mesmos e manter a técnica SHE-PWM funcionando de maneira coerente.

Para obtenção dos parâmetros do banco de capacitores, foi considerado o ultracapacitor SSC LE Series da AVX (2020) como célula. A tabela 2 mostra as características do banco. Vale ressaltar que, segundo os dados do fabricante, a excursão máxima da tensão no capacitor é de 50% e, portanto, deve ser projetado considerando esse fator limitante.

Tabela 2. Características da célula capacitiva e do banco de capacitores.

Tensão da Célula	2,7 V
Capacitância da Célula	500 F
Resistência série da célula	1,6 mΩ
Nº de supercapacitores em série (uma string)	186
Nº de strings em paralelo	36
Total de Células	6696
Tensão do banco	500 V
Capacitância do banco	97 F
Resistência série do banco	8,3 mΩ

Para o conversor c.c., a mesma abordagem baseando-se na curva de rigidez dinâmica do sistema foi utilizada, cujas equações são (5) e (6) para tensão (figura 12) e corrente (figura 13) no supercapacitor, respectivamente. A tabela 3 mostra o valor dos parâmetros para os controladores.

$$\frac{I_{SuperCap}(s)}{V_{DC}(s)} = sC_{Bank} + k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \quad (5)$$

$$\frac{V_{DC}SuperCap(s)}{I_L(s)} = sL_{cc} + k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \quad (6)$$

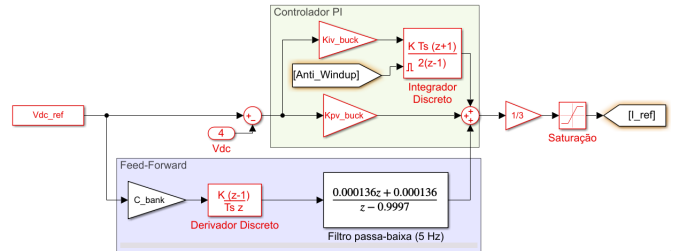


Figura 12. Controle da tensão do supercapacitor.

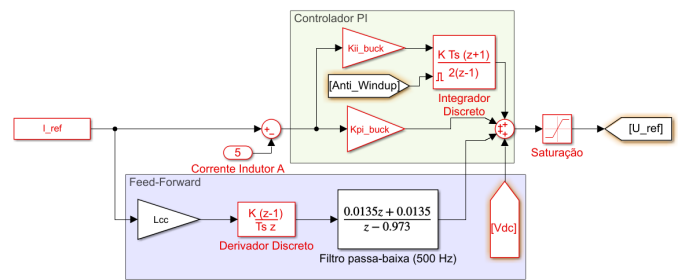


Figura 13. Controle da corrente no braço A do conversor c.c.

Tabela 3. Ganhos dos controladores de corrente e tensão do TUPF Charger.

Parâmetro	Malha de Tensão		Malha de Corrente	
	TUPF	c.c./c.c.	TUPF	c.c./c.c.
Ganho proporcional	1	3040	0,3	1.9
Ganho integral	4,4	19100	13	592

5. RESULTADOS

Na figura 14 pode-se observar a tensão de saída do retificador TUPF em regime permanente.

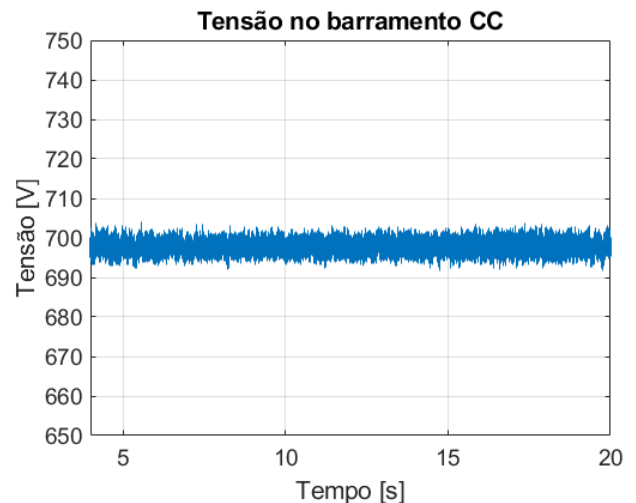


Figura 14. Tensão no barramento c.c. do retificador TUPF.

Observa-se um *ripple* calculado em torno de 1,5% (entre 695 e 705 V) da tensão prevista para o barramento c.c. da saída do retificador TUPF, que é de 700 V. Na figura 15, observa-se o *ripple* na corrente de carregamento do supercapacitor em torno de 11% (corrente entre 520 e 600 A) e a carga linear de tensão no supercapacitor entre 1 e 42 segundos, totalizando 41 segundos de carga.

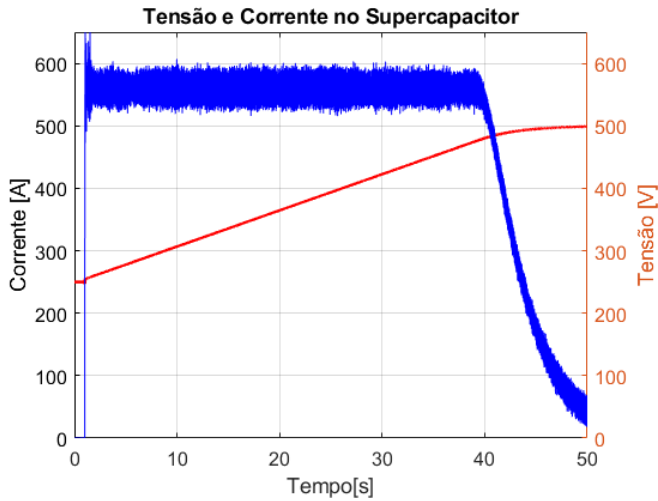


Figura 15. Tensão e corrente no supercapacitor durante o carregamento.

Pode-se observar a corrente nas indutâncias do conversor c.c. na figura 16. O valor médio da corrente em cada um dos braços de 187 A. O *ripple* encontrado para cada corrente foi de 33% (entre 220 A e 160 A), três vezes maior que o *ripple* da corrente de saída para o supercapacitor, que foi de 11%.

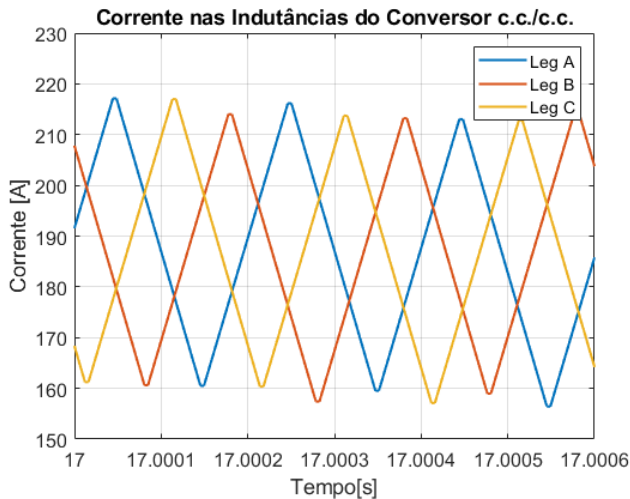


Figura 16. Correntes nos indutores do conversor c.c. acoplado ao supercapacitor

Em seguida, é possível ver as correntes no primário do transformador conectado à rede na figura 17 e as tensões da rede. A baixa distorção harmônica visual pode ser confirmada pelas análises do espectro de frequência das correntes do primário em comparação com os limites harmônicos estabelecidos pela IEEE 519 2014 e com a sua TDD,

referente a corrente demandada pela rede, vista na figura 18 que esboça o pior caso para os espectros harmônicos. Observa-se um TDD máximo entre as corrente de 0,9%, abaixo do limite da recomendação da IEEE 519 2014, que é de 5%, bem como níveis individuais dos harmônicos de corrente abaixo dos limites recomendados até o 50º harmônico. A tabela 4 mostra o valor da TDD para as correntes de cada fase da rede elétrica.

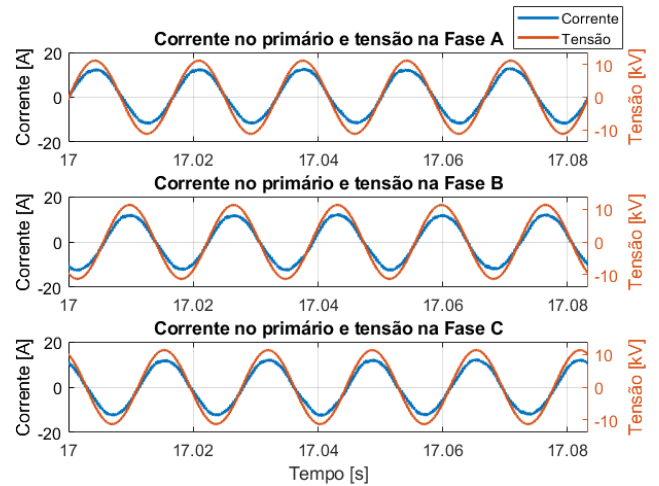


Figura 17. Correntes e tensões no primário do transformador de três enrolamentos conectado à rede.

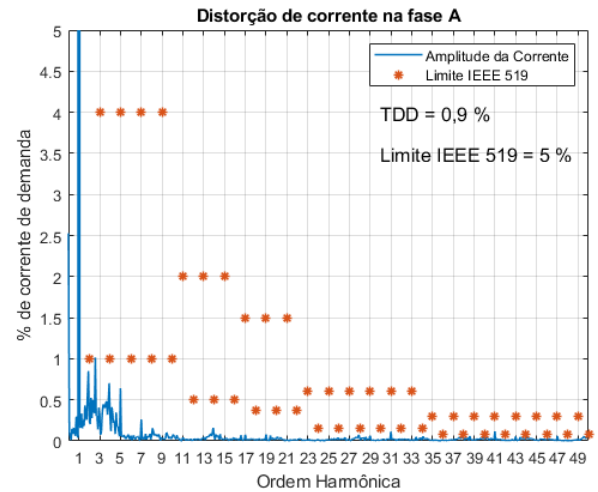


Figura 18. Análise do espectro de frequências da corrente na fase A do primário comparada com os níveis de IEEE 519 2014.

Tabela 4. TDDs para as correntes das três fases da rede elétrica.

Fase	TDD (%)
A	0,90
B	0,65
C	0,89

6. CONCLUSÃO

Este artigo validou uma arquitetura promissora para as estações de carregamento ultrarrápido com o retificador

TUPF. Foi verificado um baixo nível de TDD, com máximo de 0,9% entre as correntes, atendendo às normas e recomendações internacionais, como IEEE 519 2014 que recomenda um nível de TDD máximo de 5%. Por seguir a recomendação da IEEE 519-2014, a NEMA-PE-5 (1997) que define o padrão dos produtos elétricos produzidos por seus associados, também é atendida com essa abordagem de carregamento ultrarrápido, tornando a solução atrativa nos EUA e para fabricantes em todo o mundo que seguem os padrões NEMA. Em países da União Europeia, que utilizam as normas da IEC em suas legislações, a solução apresentada neste trabalho pode ser utilizada em vários empreendimentos, já que também atende às regras definidas. O carregamento do supercapacitor foi realizado com controle de corrente constante de 560 A até a sua tensão nominal de 500 V, sem sobretensão ao final do carregamento, o que garante uma manutenção da vida útil do banco de supercapacitores.

Portanto, a solução com banco de supercapacitores para recargas ultrarrápidas combinado ao retificador TUPF se mostrou viável permitindo um avanço no conceito de recargas ultrarrápidas com baixíssima distorção harmônica nas correntes da rede elétrica, o que torna a solução mais atrativa para ser aplicada em larga escala.

A próxima etapa para esse trabalho é verificar a possibilidade de carregamento retirando o conversor c.c., apenas com o retificador TUPF, reduzindo a quantidade de componentes e, logicamente, o custo da solução, além de validar experimentalmente tanto a nova perspectiva como a apresentada neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo grupo Neoenergia através do programa de P&D ANEEL "Chamada ANEEL: 021/2016" no projeto de pesquisa PD-00043-0516/2016.

REFERÊNCIAS

ABB (2018). TOSA flash-charging e-bus, geneva, switzerland: Enabling emission-free public transport in Geneva. <https://tinyurl.com/RUFC01>. Nov 19 2019.

Akagi, H. (2011). Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (mmcc). *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(11), 3119–3130.

Almeida, C. and Cardoso Filho, B. (2018). Shifting resonances in wind farms to higher frequencies due to tupf converters. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29, 805–815.

ANEEL (2018). Prodist - Módulo 8 - Qualidade da energia.

AVX (2020). SCC LE Series. <https://tinyurl.com/RUFC02>. Nov 19 2019.

Dias-González, F., Sumper, A., and Gomis-Bellmunt, O. (2016). *Energy Storage in Power Systems*. Wiley.

G1 (2018). Uniao Europeia quer acabar com venda de carros até 2030 para alcançar meta do Acordo de Paris. <https://tinyurl.com/V2G03>. Dec 03 2019.

Green Car Congress (2014). Ioxus to provide ultracapacitors for long island railroad wayside energy storage system. <https://tinyurl.com/RUFC03>. Nov 21 2019.

IEC (2002). Norma IEC 61000-2-2.

IEC (2011). Norma IEC 61000-3-12.

IEEE (2014). Recomendação IEEE 519-2014.

Justino, J.C.G., da Silva, L.A.R., Rocha, A., and d. J. Cardoso Filho, B. (2014). Aspects of the operation of regular ultra fast charging e-bus in high grade brt routes. In *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.

Justino, J., Parreiras, T., and Cardoso Filho, B. (2016). Hundreds kw charging stations for e-buses operating under regular ultra-fast charging. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52, 1766–1774.

Lemon, D., Griffith, P., Coffman, Z., and Gleason, G. (1999). Electric-bus fast charging at the santa barbara mtd. In *Fourteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Conference*.

MDIC - Brasil (2018). Rota 2030 - Mobilidade e Logística.

MIT Technology Review (2009). Next stop: Ultracapacitor buses. <https://tinyurl.com/RUFC04>. Nov 25 2019.

NEMA (2003). NEMA PE-5-1997 (r2003).

Park, R.H. (1929). Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the AIEE*.

Parreiras, T.M. (2015). Retificador Trifásico de Fator de Potência Verdadeiramente Unitário sem a Utilização de Filtros Senoidais. *Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais*.

Patel, H.S. and Hoft, R.G. (1973). Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part i—harmonic elimination. *IEEE Transactions on Industry Applications*.

Sertkaya, M.G., Yilmaz, E., Sanli, A.E., and Gunli, G. (2015). Comparison of power and energy density after full shunting-balancing in serial connected lithium-ion batteries and serial-connected supercapacitors. In *3rd IRSEC*.

Steiner, M., Klohr, M., and Pagiela, S. (2007). Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles. In *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*.

Sun, Y., de Jong, E.C.W., Cuk, V., and Cobben, J.F.G. (2018). Harmonic resonance risk of massive ultra fast charging station grid integration. In *18th ICHQP*, 1–6.

Tsirinomeny, M. and Rufer, A. (2015). Configurable modular multilevel converter (cmmc) for flexible ev. In *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 1–10.