

RETIFICADOR ENTRELACADO COM ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA PARA OPERAÇÃO DE UM VEÍCULO TRÓLEBUS ALIMENTADO POR REDES EM CA OU CC

C. A. Canesin¹, G. A. Melo¹, F. A. S. Gonçalves¹, R. A. N. de Oliveira¹,
J. M. Munro², M. dos Santos²

1. Laboratório de Eletrônica de Potência – LEP, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

2. AES EletroPaulo, São Paulo, SP, Brasil.

e.mail: canesin@dee.feis.unesp.br, melo@dee.feis.unesp.br, flavioasgoncalves@gmail.com,
merlin1943@yahoo.com.br, Marcelo.santos2@aes.com, Jerry.munro@aes.com

Resumo - Este artigo apresenta o desenvolvimento e os principais resultados para um retificador boost entrelaçado operando como um estágio especial de potência de entrada para um veículo tipo trólebus, permitindo sua alimentação por sistemas de distribuição em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). Quando alimentado em corrente alternada a dois fios (sistema monofásico), o conversor chaveado de entrada proposto promove a correção ativa do fator de potência, drenando corrente praticamente senoidal (reduzidas distorções harmônicas DHTI) da rede CA e atendendo plenamente às restrições impostas pela norma IEC 61000-3-4. Adicionalmente, um sistema de gerenciamento e controle da operação promove a comutação automática e eletrônica para o retificador proposto quando das transições entre as linhas de distribuição em CC ou CA, ou seja, quando da passagem da rede de CC para CA e vice-versa, preservando as características elétricas do barramento de CC para o sistema de acionamento do trólebus. Apresenta-se os principais resultados experimentais para o conversor em escala nominal de potência (150kW) instalado em um carro trólebus com sistema de acionamento em CC, demonstrando-se os benefícios do conversor proposto e da possibilidade de alimentação em CA para o sistema de transporte tipo trólebus.

Palavras-Chave – Correção do Fator de Potência, Distribuição de Energia Elétrica, Qualidade da Energia Elétrica, Retificador Boost Entrelaçado, Transporte Coletivo tipo Trólebus.

INTERLEAVED HIGH POWER FACTOR CORRECTION RECTIFIER APPLIED FOR AC OR DC SUPPLIED TROLLEYBUS VEHICLE

Artigo submetido em 15/03/2010. Aceito para publicação em 14/07/2010 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

Abstract – This paper presents the development and the main results for an interleaved boost rectifier operating as a special input power stage for a trolleybus type vehicle, allowing its feeding by alternate current (AC) or direct current (DC) distribution power systems. When feeding with two wires (single phase) alternate current distribution system, the converter accomplish active power factor correction, providing a relatively sinusoidal current with low total harmonic distortion (THD) and fully complying with IEC 61000-3-4 standards. In addition, a management control system promotes the required automatic operation changes for the proposed rectifier when the vehicle is changing from the DC distribution power system to the AC distribution power system and vice-versa, keeping its original electrical DC system characteristics for the adjustable speed driver sub-system. The main experimental results for a prototype rated at 150kW are presented, considering its application for a trolleybus with DC adjustable speed driver, demonstrating the proposed converter benefits and the possibility of AC feeding system for trolleybus type vehicle.

Keywords - Electric power distribution, Interleaving boost rectifier, Power factor correction, Trolleybus, Power quality.

I. INTRODUÇÃO

Um importante marco com relação à preocupação mundial pelos recursos energéticos estratégicos se relaciona com as denominadas “crises do petróleo” em 1973 e 1979, consideradas por muitos como o primeiro alerta de impacto com relação aos recursos finitos das fontes de energia convencionais, principalmente as de origens fósseis.

Com relação ao consumo de combustíveis fósseis no país, especialmente por veículos automotores, torna-se urgente o incremento da exploração do potencial de biomassa, assim como os investimentos na substituição dos veículos movidos a combustíveis fósseis ou hidrocarbonetos, principalmente para sistemas de transporte humano de massa em regiões metropolitanas.

Para atender tais requisitos, os sistemas trólebus (movidos apenas por energia elétrica) têm se demonstrado potencialmente viáveis para a dramática redução de gases como o dióxido de carbono, o nitrogênio e o óxido nítrico,

possibilitando ainda a eliminação da emissão de monóxido de carbono.

Considerando o impacto ambiental, os sistemas trólebus apresentam maiores benefícios que os híbridos, uma vez que os níveis de poluição podem ser reduzidos em 90%. Além disso, apresentam operação silenciosa, vida útil aproximadamente 4 vezes maior e custo de manutenção 35% menor que o similar diesel, conforme [1].

O sistema de transporte tipo trólebus foi implantado na Europa em 1911. Desde então, uma de suas mais importantes evoluções encontra-se no tipo de motor utilizado. Pela grande facilidade de controle de velocidade, os motores de corrente contínua (CC) imperaram durante o princípio destes sistemas, entretanto, considerando-se as características de custo elevado, problemas com comutadores e manutenções, os mesmos têm sido substituídos por máquinas de corrente alternada (CA) de menor peso, volume e custo, em função da evolução da eletrônica de potência e das modernas técnicas de acionamentos de máquinas CA. Desta forma, os sistemas CC-CC (chopper) estão sendo substituídos por sistemas de conversão CC-CA (inverter) para operação e controle de máquinas CA.

O sistema de transporte tipo trólebus está se desenvolvendo atualmente como um sofisticado, não poluente, silencioso, rápido e popular meio de transporte urbano de acordo com [2].

Os sistemas convencionais trólebus ainda são alimentados por linhas CC provenientes de uma subestação retificadora centralizada que nem sempre atende às normas com relação a fator de potência (FP) e distorções harmônicas de correntes [3] e [4].

Neste contexto, um dos aspectos importantes no desenvolvimento da tecnologia do sistema trólebus que ainda não foi superado está a dificuldade de expansão da rede de distribuição em CC em função de seu alto custo e pela necessidade de áreas urbanas relativamente grandes requeridas pelas subestações retificadoras.

Paradoxalmente, considerando-se a possibilidade de uma nova plataforma de redes de distribuição em CA, e em função das dificuldades operacionais para coletores de corrente em configuração trifásica de corrente alternada para sistema trólebus, uma concepção interessante seria a possibilidade de alimentação através de rede monofásica em CA, preservando-se os atuais sistemas coletores do sistema CC. Para operação em CA, o sistema trólebus necessitaria de um conversor pré-regulador retificador capaz de realizar o diagnóstico do tipo de rede (CA ou CC) e operar com elevada densidade de potência (reduzido peso e volume) sem comprometer a eficiência e confiabilidade do sistema. Todavia, quando alimentado pela rede CA, o conversor pré-regulador retificador representa uma carga monofásica não linear de médio a grande porte que, se concentrada em apenas uma ou em duas fases do sistema trifásico de distribuição, causaria desbalanceamentos e distorções na tensão da rede de distribuição CA de acordo com [4] e [5]. Com a utilização de um transformador Scott (transformação trifásica-bifásica), torna-se possível a distribuição da carga entre as fases do primário do transformador, reduzindo-se os

problemas de desbalanceamento e de distorções na tensão como em [3].

Este artigo apresenta os principais resultados para um estágio de potência de entrada aplicado a um sistema trólebus, operando como um conversor pré-regulador retificador com potência nominal de 150kW, sendo capaz de prover a correção ativa do fator de potência quando alimentado por redes de CA, em adequação à norma IEC 61000-3-4 [6], fornecendo assim um barramento CC intermediário ao sistema de controle ajustável de velocidade e mantendo seu desempenho quando alimentado por redes CC convencionais.

II. O NOVO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM CA

A rota experimental desenvolvida para o trólebus, possui dois tipos de subestações alimentadoras, como apresentado na Figura 1. A subestação CA fornece uma única fase senoidal com tensão eficaz de valor nominal igual a 380V, a partir de uma rede de distribuição trifásica, com a utilização apenas de um transformador e disjuntor de proteção. As subestações convencionais em CC fornecem uma tensão média de valor nominal igual a 600V. Além disso, os dois tipos de subestações podem apresentar $\pm 10\%$ de regulação com relação ao valor nominal da tensão do sistema de alimentação a dois fios.

Logo, o estágio de entrada proposto deve ser flexível em relação à característica da tensão de alimentação, CA ou CC, fornecendo um nível de tensão regulada ao barramento CC intermediário (400V a 720V) requerido pelo sistema de acionamento com velocidade ajustável.

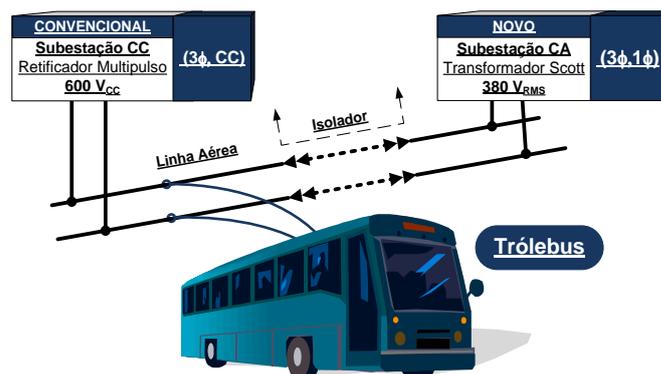


Fig. 1. Sistema de distribuição proposto para trólebus (CC ou CA).

Quando a tensão de alimentação do sistema é CA, o retificador com correção do fator de potência (RCFP) deve operar fornecendo a tensão CC requerida pelo sistema de acionamento e drenando corrente com formato senoidal na entrada. Adicionalmente, quando a tensão de alimentação é CC, o RCFP pode operar como conversor CC-CC, fornecendo um nível regulado de tensão e podendo compensar quedas de tensão presentes nas linhas aéreas de alimentação. Pode também simplesmente ser desativado quando a tensão de entrada se encontra em um patamar seguro de operação.

III. O RETIFICADOR BOOST ENTRELAÇADO EM MCD

A estrutura proposta é composta por um retificador monofásico convencional, não controlado e de onda completa, associado a 5 células de conversores chaveados Boost em configuração entrelaçada (interleaving), compondo a estrutura para o retificador Boost com CFP (RCFP). Destaca-se que o conversor proposto é capaz de compor a corrente de entrada de tal forma a garantir elevado FP e reduzida distorção harmônica total de corrente (DHTI). Considerando-se as dinâmicas necessárias para o fluxo de potência do sistema trólebus, os conversores entrelaçados foram projetados para operar no MCD (Modo de Condução Descontínua), garantindo simplicidade para a ação de controle, robustez e confiabilidade para a estrutura. Embora operando no MCD, a corrente de entrada do RCFP apresenta baixo nível de ondulação da corrente de entrada devido ao entrelaçamento das células, além de reduzidos níveis de distorções harmônicas de corrente.

O controlador digital contempla uma técnica especial de correção da corrente de entrada e considerações para os requisitos dinâmicos da carga. Para a sua implantação, foi utilizado um dispositivo FPGA programado através de linguagem de descrição de hardware. Esta correção da corrente de entrada é necessária em função dos baixos ganhos estáticos para os quais deverão operar as estruturas chaveadas Boost.

A Figura 2 mostra alguns detalhes do protótipo implementado para o retificador boost de 150kW com cinco células entrelaçadas.

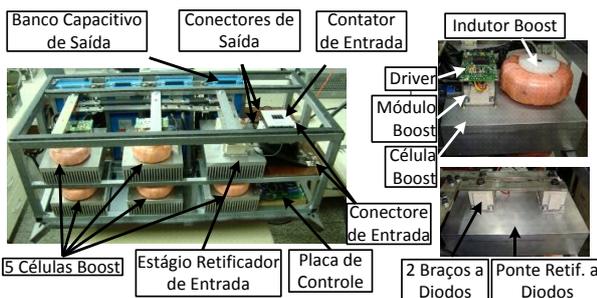


Fig. 2. Protótipo do retificador boost em MCD de 150kW com cinco células entrelaçadas.

A Figura 3 apresenta o conversor instalado no compartimento lateral do trólebus, considerando-se as adequações mecânicas necessárias ao espaço destinado para a fixação do mesmo (elementos de fixação e refrigeração).



Fig. 3. Retificador boost MCD entrelaçado de 150kW instalado no trólebus adaptado ao projeto.

Os dados de entrada e saída, incluindo-se os parâmetros projetados e componentes especificados para o protótipo em escala nominal de potência são sumarizados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

TABELA I
Dados para o projeto do retificador boost MCD entrelaçado.

Dados de Entrada e Saída do Projeto	
Parâmetros	Magnitude
$V_{in [rms] \text{ or } V_{in[CC]}}$	380 V_{RMS} OU 600 V_{CC}
V_{CCbus}	680 V
P_0	150 kW
f_s	20 kHz
Número de Células(i)	5
Defasagem Angular [rad]	$\pi/5$

Sendo:

- V_{in} - Tensão de Alimentação;
- V_{CCbus} - Tensão do barramento CC de saída do conversor;
- P_0 - Potência nominal do conversor;
- f_s - Frequência de chaveamento;

TABELA II
Especificação dos Componentes para projeto do retificador boost MCD entrelaçado.

Parâmetros do Circuito	
Parâmetros	Magnitude
$S_{P-i} \text{ e } D_i$	Modulo SKM400GAL128-D
Ponte Retificadora de Entrada	Modulo SKKD380
L_{in-i} (núcleo toroidal de "iron powder")	11,8 μH
C_0 (Capacitor de Filme) PCC-LP/800V	24//600 μF (14,40mF)

Sendo: [i] o número da célula do conversor boost MCD

IV. METODOLOGIA DE CONTROLE

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos simplificado do algoritmo de controle desenvolvido, onde os algoritmos de proteções (sobre-temperatura, sobre-tensão e sobre-correntes), partida suave e monitoramento remoto não estão contemplados. Pode-se observar que o controle principal é formado por três estágios que funcionam simultaneamente, denominados regulação da tensão de saída, correção da corrente de entrada e detecção do modo de operação.

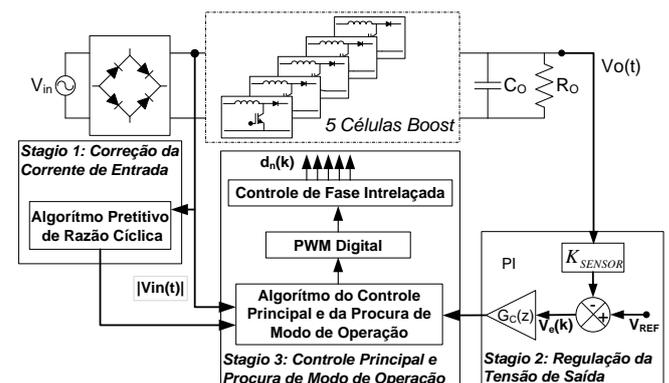


Fig. 4. Diagrama de blocos do controle proposto.

O controle digital foi implantado com a utilização de um dispositivo FPGA XC3S200 (XILINX) de baixo custo. Nos sensoriamentos de tensão, utilizaram-se dois sensores hall (LEM LV25-P) com estágios de filtragem analógica “anti-aliasing”, através de filtros “Butherworth” de segunda ordem e dois conversores tipo analógico-digital (AD7810). O algoritmo de controle foi todo desenvolvido em linguagem de descrição de hardware VHDL utilizando aritmética de ponto fixo. A utilização do FPGA atingiu cerca de 72% de seu recurso total.

A. Regulação da Tensão de Saída

A regulação da tensão de saída foi baseada em um controle de tensão em baixa frequência através de um compensador PI, cuja função de transferência de pequenos sinais do conversor boost MCD entrelaçado depende da corrente na carga. Considerando-se cinco células e carga nominal, pode-se determinar a expressão (1).

$$G_{VC-Nominal Load}(s) = \frac{362.74}{s + 45.05} \quad (1)$$

Assim, o zero do controlador PI foi posicionado duas oitavas acima da frequência do pólo da carga, para considerações de pior caso (carga mínima). O ganho proporcional foi determinado em função do ganho de laço para corrente nominal e adicionou-se um pólo na origem. Um controlador PI simples é apresentado na expressão (2) considerando taxa de amostragem de 20kHz e os parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 2.

$$G_{C-PI}(z) = K_p \frac{s + \omega_z}{s} \Big|_{s = \frac{z-1}{T_s z+1}} = \frac{3.7128 - 3.7115 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (2)$$

A sobretensão transitória da tensão de saída (“overshoot”) apresenta uma restrição crítica devido às características de operação do conversor em função da baixa velocidade de resposta do controle de tensão própria do MCD para estruturas RCFP. Além disso, para minimizar o nível de harmônicas de baixa ordem, a tensão de saída foi posicionada muito próxima da máxima tensão permitida (720V). Por esse motivo, o compensador proporcional-integral (PI) projetado não seria capaz de atender a compensação da sobretensão necessária em retiradas severas de carga. Assim, a estratégia de controle foi alterada e durante transitórios em que a tensão instantânea de saída $V_0(t)$ atinge uma faixa considerada crítica (acima de 710V), o controle PI atua eleva o ganho de malha $T_V(s)$ modificado pela função de transferência $G_{NL}(s)$, aumentando o erro e a frequência de corte. Quando o transiente é completado, ou seja, a tensão de saída retorna à faixa normal de operação, o ganho de malha retorna ao seu valor padrão.

A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos do ganho de malha $T_V(s)$ do controle, onde o termo $G_{NL}(s)$ insere uma não linearidade no ganho de malha relativo ao valor instantâneo da tensão de saída. Os ganhos proporcionais K_{VO} e K_{ADC} são respectivamente os do sensor da tensão de saída e do conversor A/D. A estratégia para o ajuste do termo $G_{NL}(s)$ no ganho de malha é mostrada na Figura 6, sendo os parâmetros Δ_1 e Δ_2 configurados como 15V e 5V.

As Figuras 7 e 8 mostram os resultados transitórios para degrau de carga nominal para carga nula, onde é possível observar que a estratégia do controle da tensão de saída com o compensador PI convencional permite elevações de tensão a níveis bem superiores aos valores máximos estipulados para o barramento CC (720V).

Por outro lado, com a utilização do compensador não linear proposto para a mesma situação de degrau de carga, a tensão de saída foi mantida abaixo do limite máximo estabelecido durante o transiente.

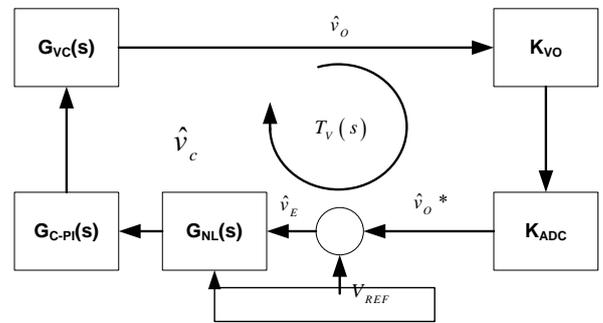


Fig. 5. Diagrama de blocos do ganho de malha $T_V(s)$ para o controle.

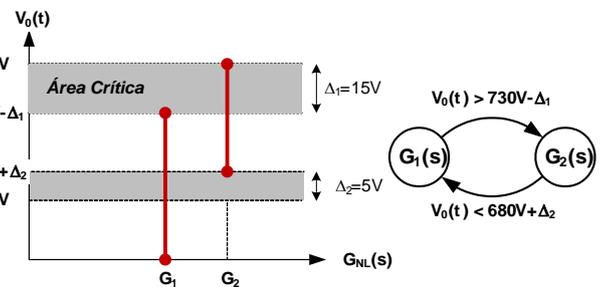


Fig. 6. Estratégia para ajuste do termo $G_{NL}(s)$ no ganho de malha.

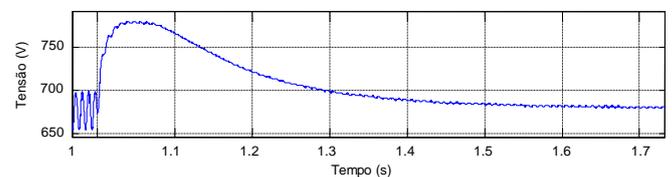


Fig. 7. Forma de onda da tensão de saída durante um transiente de carga nominal para carga nula, considerando o compensador convencional.

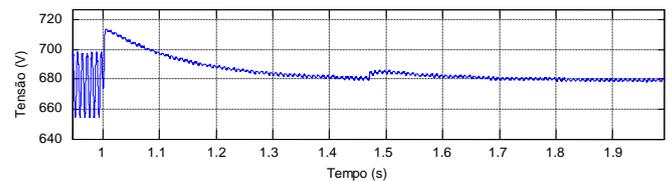


Fig. 8. Forma de onda da tensão de saída durante um transiente de carga nominal para carga nula, considerando o compensador não linear proposto.

B. Correção da Corrente de Entrada

A lei de controle da corrente de entrada deriva-se do comportamento da corrente ao longo de um ciclo de rede, analisada pela corrente denominada média instantânea, resultante da corrente média para um período de chaveamento $\langle i_{in} \rangle$, como apresentado na expressão (3).

$$\langle i_{in} \rangle = \frac{d^2 \cdot T_s}{2 \cdot L} \cdot \frac{v_o}{v_o - v_{in}} \cdot v_{in} \quad (3)$$

Sendo: v_o a tensão de saída, v_{in} a tensão de entrada, L a indutância boost, d a razão cíclica e T_s o período de chaveamento.

A expressão (3) com a correção de corrente descreve basicamente uma forma senoidal ao longo de um período de linha CA quando o conversor está operando como RCFP, compensando as diferenças de amplitude na tensão de entrada.

Desta forma, considerando a IEC 61000-3-4, a maior desvantagem relativa à não aderência das componentes harmônicas de corrente que se apresenta quando o conversor boost opera como RCFP em MCD e com um ganho estático de tensão próximo da unidade, pode ser eliminada.

C. Determinação do modo de operação (CA ou CC)

Durante a operação normal do trólebus poderão ocorrer trocas de tipo de estação alimentadora que supre as linhas aéreas, modificando conseqüentemente a forma de onda da tensão de alimentação do trólebus (CA ou CC). Quando as hastes do trólebus passam por um seccionamento de linha, existe um intervalo de tempo em que a alimentação do veículo é desconectada, refletindo em amplitude nula para tensão de entrada do RCFP.

Embora as tensões nominais de cada modo de operação (CA ou CC) sejam bem distintas, 380V para CA e 600V para CC, o algoritmo não pode utilizar apenas a tensão retificada média ou os cruzamentos por zero, que teoricamente não ocorreriam em CC, para realizar tal determinação, pois as oscilações de tensão podem atingir $\pm 20\%$ e afundamentos severos de tensão (“sags”), devido à desconexão entre o coletor e a linha aérea, poderiam levar à determinação do modo de operação incorreto.

Desta forma, a metodologia utilizada para a determinação do modo de operação se baseia na utilização no valor médio da tensão de entrada (V_{in-avg}) e na média da diferença entre a tensão média e a instantânea de entrada $V_{in}(t)$, determinando $V_x(t) = V_{in-avg}(t) - V_{in}(t)$, como mostra a simulação digital apresentada na Figura 9.

Considerando os custos relacionados à utilização de células lógicas com controle digital implantado por dispositivo FPGA, uma estrutura reduzida foi adotada para a implementação do valor médio, particularmente um filtro passa-baixas digital IIR-Butterworth de primeira ordem com frequência de corte na faixa de 60Hz e taxa de aquisição de 20kHz, como é apresentado na expressão (4).

$$G_{Track Modes}(z) = \frac{5.7318 - 5.7304 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4)$$

A Figura 9 ilustra um caso simulado da modificação de modo de operação (CA para CC para CA), considerando a tensão de entrada com um nível moderado de interferências imposto em simulação. As formas de onda mostram que aparecem bordas de descida e bordas de subida nas formas de onda das médias quando há uma transição de modo de operação. Além disso, quando a tensão é CA, a forma de onda V_x apresenta característica pulsante, o que aparece em baixa amplitude no modo CC.

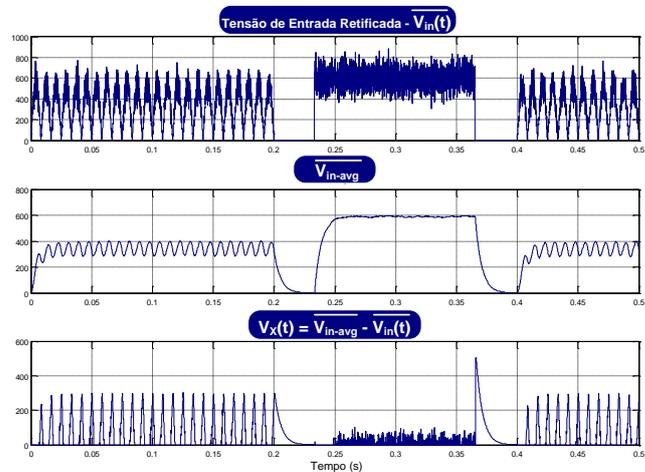


Fig. 9. Formas de onda referentes à procura de modo de operação considerando um exemplo de transições CA para CC para CA.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o protótipo em escala nominal, os ensaios foram feitos inicialmente com alimentação em CC, nas dependências da garagem da Himalaia Transportes S.A., parceira nesta pesquisa, até a conclusão de todos os ajustes da montagem e validação da programação do sistema de gerenciamento via FPGA.

Os ensaios na rede experimental em CA foram realizados na cidade de São Paulo(SP), partindo da garagem da Himalaia, localizada na rua Nestor de Barros nº 289, conforme percurso descrito na Figura 10, até chegar ao local da linha CA experimental.



Fig. 10. Trajeto percorrido nos testes de campo em CC, e, na linha experimental em CA.

A Figura 11 mostra o sistema de aquisição de dados instalado no trólebus, contendo um “WaveBook” iOtek, onde foram adquiridos dois sinais de tensões e dois de

correntes (entrada da rede de alimentação e saída do retificador boost). Na mesma figura é apresentado um Notebook onde foram utilizados os programas “ChipScope” e “Project Navigator”. O Notebook foi integrado ao FPGA da Xilinx (Spartan XC3S200), possibilitando a aquisição de seus dados internos e a programação do dispositivo a bordo do trólebus, de modo a facilitar a observação da performance do controle e fácil ajuste a bordo.



Fig. 11: Sistemas de aquisição instalados no trólebus.

A Figura 12 mostra uma visão geral englobando a partida na rede experimental em CA e algumas variações de carga devido às acelerações do trólebus. A Figura 13 apresenta os detalhes destacados, mostrando que a corrente tende a um aspecto senoidal durante todo instante, ratificando a técnica de controle utilizada para a imposição da forma de onda da corrente de entrada (senoidal e com reduzidas distorções harmônicas).

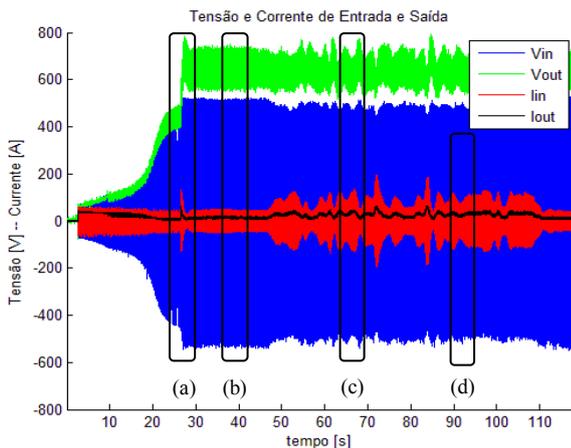


Fig. 12: Visão geral das formas de onda na partida do trólebus.

Variações bruscas de carga foram testadas, tanto no aumento (degrau positivo) quanto na diminuição (degrau negativo) de carga. Os resultados são apresentados com um aspecto mais geral na Figura 14 e os detalhes apresentados separadamente, sendo o degrau positivo na Figura 15 e o degrau negativo na Figura 16. Observa-se nestes resultados que a tensão do barramento CC se mantém dentro da faixa limite, demonstrando a atuação ajustada dos compensadores projetados.

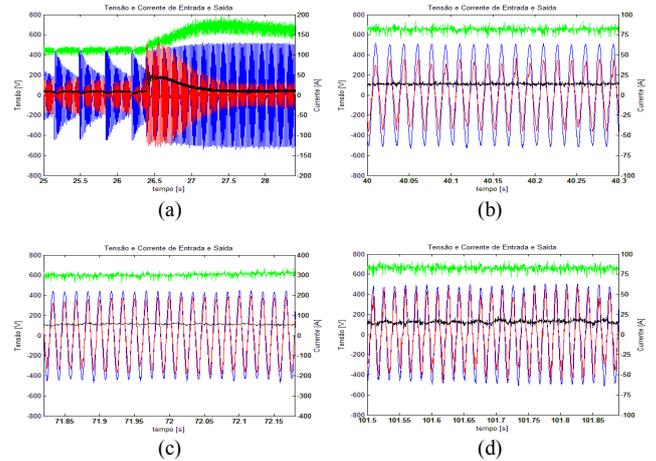


Fig. 13: Detalhes das formas de onda da figura 14.

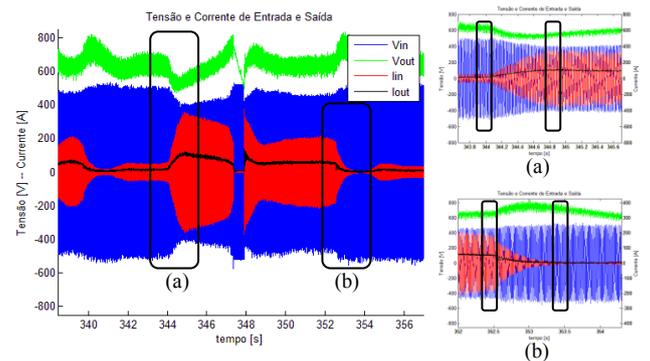


Fig. 14: Momentos com variações bruscas de carga.

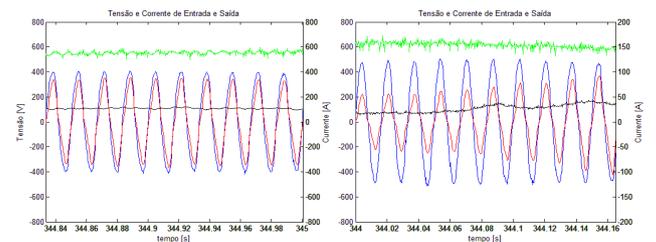


Fig. 15: Detalhe da variação de carga positiva.

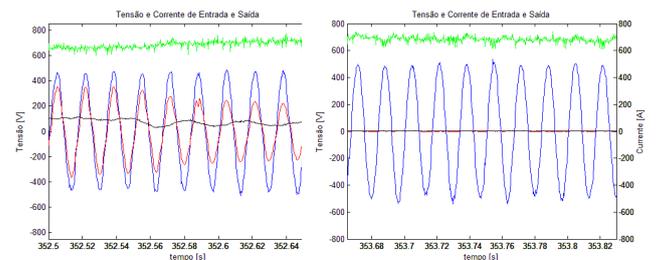


Fig. 16: Detalhe da variação de carga negativa.

A Figura 17 apresenta um aspecto geral das tensões e correntes de entrada e de saída do conversor obtido na região da linha CA experimental, com o trólebus trafegando normalmente em função do trânsito.

Os eventos evidenciados na Figura 17 são apresentados com mais detalhes na Figura 18.

Na Figura 18(a), evento (a) da Figura 17, observa-se um pico de carga devido a uma variação normal de aceleração do veículo, mantendo-se forma de onda para a corrente de entrada praticamente senoidal.

A Figura 18(b), referente ao evento (b) da Figura 17 e, em maior detalhe a Figura 18(b1), apresentam um evento de transitório rápido de aceleração e desaceleração que ocorrem com frequência em veículos trólebus, considerando-se condições de trânsito e condições físicas da pista de rolamento, como depressões, por exemplo.

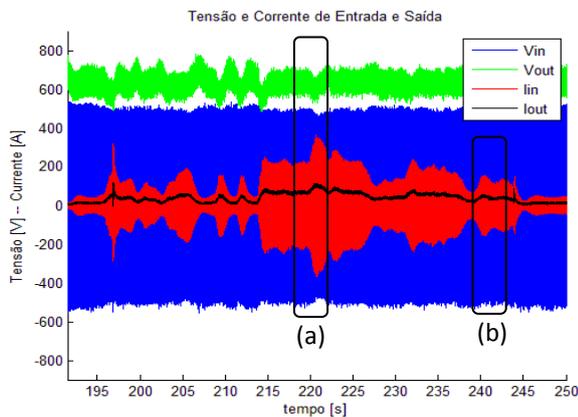


Fig. 17. Aspecto geral das formas de onda com o trólebus trafegando na linha experimental CA.

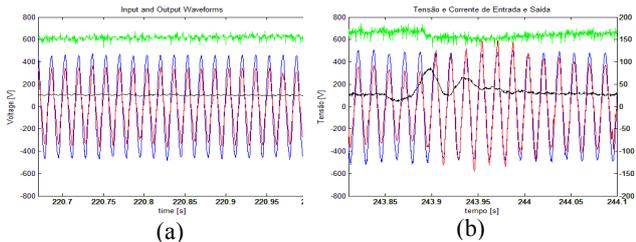


Fig. 18. Detalhes das formas de onda da figura 17.

Os resultados apresentados na Figura 19 referem-se às modificações no tipo de alimentação da linha. Lamentavelmente os testes de transição de CC para CA não foram realizados em função da existência de um trecho de linha danificado na área de comutação esperada da linha CC para CA.

A Figura 19 mostra uma transição de alimentação de linha CA para a linha CC, onde o trólebus deve estar em baixa velocidade e drenando a menor potência possível (apenas para manter o funcionamento do sistema). Desta forma, o trólebus passa pelo isolador, onde a tensão de entrada torna-se nula e a tensão de saída permanece praticamente constante até que o sistema se conecte ao barramento CC, demonstrando o pleno funcionamento do sistema de gerenciamento.

Para uma avaliação da qualidade de energia quando da alimentação em CA, são mostrados detalhes das formas de onda de tensão e corrente, com carga relativamente elevada (84kVA), sendo que todas as correntes harmônicas do espectro aderem completamente à norma IEC 61000-3-4, com um FP de aproximadamente 0,98, DHTI de 13,2%, e rendimento experimental de 95,4%, como mostra a Figura 20, validando-se plenamente as análises do projeto e o desenvolvimento realizado.

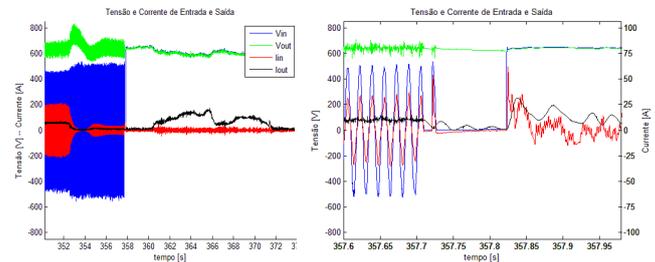


Fig. 19. Transição no tipo de alimentação (CA para CC).

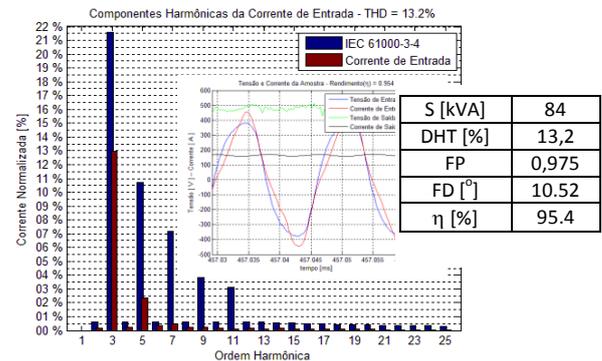


Fig. 20. Espectro harmônico da corrente de entrada para um processamento de 84kW de carga.

VI. PRINCIPAIS BENEFÍCIOS DO SISTEMA

Apresenta-se a seguir um resumo dos principais benefícios para a proposta apresentada:

- Melhor relação custo/benefício para o sistema trólebus: Redução dos custos da implantação de novas linhas (redes de contato) em CA (eliminação de novas subestações CC), onde apenas unidades de transformação e proteções em CA serão necessárias; alimentação das novas redes de CA em baixa tensão (BT), permitindo a medição direta de energia consumida “on-board” e, sendo a medição em BT, não há a necessidade de tarifa especial para tração, atendendo-se as solicitações das gestoras dos sistemas trólebus; menor custo de instalação, operação e manutenção do sistema;
- Tecnologia inovadora desenvolvida permitindo a operação tanto em CC quanto em CA do sistema trólebus, utilizando-se rede de contato a dois fios com elevado fator de potência e reduzidas distorções harmônicas para operação em CA, permitindo a redução de perdas e a expansão do sistema a baixo custo;
- Aumento da disponibilidade dos ativos operacionais para as concessionárias de energia elétrica, com a redução

dos custos das manutenções preventivas e corretivas do sistema;

- Possibilidade da expansão de um modal de transporte coletivo de reduzido impacto ambiental, considerando-se os reduzidos custos das novas redes de contato em CA, com forte contribuição para a redução dos índices de poluição da Grande São Paulo;

- Melhoria dos índices de qualidade de energia da concessionária considerando-se a redução nos defeitos dos sistemas de alimentação e de seus indicadores de qualidade, uma vez que as novas linhas em CA seriam operadas com reduzidas distorções harmônicas de corrente e elevado fator de potência;

- Desenvolvimento de técnica inédita de alimentação de sistemas trólebus, aplicável para quaisquer sistemas de acionamento trólebus tanto para drivers em CC quanto para CA.

VII. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta a síntese de um trabalho de P&D&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação), para uma nova estrutura de retificador chaveado monofásico com elevado fator de potência (FP) e reduzida distorção harmônica total de corrente (DHTI), para aplicações em sistemas de transporte coletivo não poluentes através da tração elétrica tipo Trólebus, permitindo a operação do sistema em CC (Corrente Contínua) ou CA (Corrente Alternada). A estrutura para o conversor proposto pré-regulador retificador chaveado permite, além da flexibilidade de alimentação (em corrente alternada ou contínua), a possibilidade de expansão a baixo custo deste modal de transporte público, em função da significativa redução de custos para a expansão das redes de alimentação, uma vez que seriam eliminados os elevados custos associados às estações retificadoras convencionais e os necessários espaços urbanos para suas instalações. A estrutura proposta é composta por um retificador monofásico não controlado de onda completa, associado a conversores chaveados boost em configuração entrelaçada (interleaving). Destaca-se que o conversor proposto é capaz de compor a corrente de entrada de forma a garantir elevado FP e reduzida DHT, com completo atendimento à norma internacional IEC 61000-3-4.

Esta pesquisa, desenvolvida com caráter inédito, técnico e científico, apresentou o desenvolvimento de uma estrutura retificadora chaveada com potência nominal de 150kW, com a capacidade de manter as mesmas condições operacionais no barramento de corrente contínua de alimentação do driver de acionamento do sistema trólebus para aplicações com máquinas de CC (chopper CC-CC) ou máquinas de CA (inversor CC-CA).

Os resultados apresentados comprovam a possibilidade da expansão para o sistema de transporte coletivo tipo trólebus com um menor custo de implantação e operação, permitindo ainda a medição direta do consumo de energia “on-board” e flexibilidade para o tipo de alimentação, operando em CA com elevado fator de potência ou em CC, sustentando o enorme benefício deste modal com relação ao seu reduzido

impacto ambiental, contribuindo fortemente para a redução dos índices de poluição dos grandes centros urbanos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à AES Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A. pelo financiamento deste projeto de pesquisa, junto ao seu programa de P&D-Aneel e à Himalaia Transportes S.A. pela cooperação e cessão de um carro trólebus e de suas instalações para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] L. J. Brunton, “Why not the trolleybus?”, in *Proc. of the IEE Seminar Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, pp. 5/1-5/7, 2000.
- [2] V. I. Sopov, V. V. Biryukov, G. N. Vorfolomeyev, “Increase of Efficiency of the Power Supply System of a Trolleybus”; In *Proc. of the IEEE IFOST*, pp.336-337, October 2006.
- [3] H. E. Mazin, X. Wilsun, “An investigation on the effectiveness of Scott transformer on harmonic reduction”, In *Proc. of the IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy*, pp. 1-4, 2008.
- [4] J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka, “Control of traction single-phase current-source active rectifier under distorted power supply voltage”, In *Proc. of the IEEE Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 550- 555, 2008.
- [5] A. Fratta, P. Guglielmi, F. Villata, A. Vagati, “Efficiency and cost-effectiveness of AC drives for electric vehicles improved by a novel boost DC-DC conversion structure”, in *Proc. of Power Electronics in Transportation*, pp. 11-19, 1998.
- [6] IEC 61000-3-4.: Part 3-4: Limits for harmonic current emissions (equipment input current greater than 16A per phase), International Electrotechnical Commission, first edition, 1998-10.

DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FEIS, Ilha Solteira (SP)), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Eletrônica de Potência (UFSC INEP, Florianópolis (SC)). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FEIS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), é editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics e ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006). Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, retificadores e inversores,

fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção do fator de potência.

Guilherme de Azevedo e Melo, nascido em Presidente Prudente (SP), em 1976, é engenheiro eletricitista (2001), mestre (2006) e doutor (2010) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Atualmente é professor colaborador do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP e está associado ao Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP). Suas principais áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, energias renováveis, conversores CC-CC e CA-CC e sistemas de controle digital.

Flávio Alessandro Serrão Gonçalves, nascido em Porto Velho (RO) em 1975, é engenheiro eletricitista (1998), mestre (2001) e doutor (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente é professor da UNESP-FEIS, e trabalha como pesquisador associado ao Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP). Suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, técnicas de associação para conversores, técnicas de comutação não dissipativa, conversores CC-CC e CA-CC, inversores, sistemas de controle digital (FPGA, DSP, Microcontroladores, J2ME), síntese de sistemas eletrônicos empregando linguagem de descrição de hardware (VHDL/Verilog), e plataformas distribuídas para

E-Learning em eletrônica de potência. Dr. Gonçalves é membro da SOBRAEP desde 1999.

Rodrigo Nunes de Oliveira, nascido a 11/05/1978 em Araraquara-SP, é engenheiro eletricitista (2007) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Atualmente está vinculado ao programa de doutorado junto ao Laboratório de Qualidade de Energia. Suas principais áreas de interesse são eletrônica de potência, controle digital e qualidade de energia.

Jerry Marco Munro, nascido em 19/04/1953 em São Paulo é engenheiro de operações – eletrotécnica (1976) pela Universidade Mackenzie. Atualmente é engenheiro sênior da AES Eletropaulo. Sua área de interesse é transporte de massa por meio de tração elétrica.

Marcelo dos Santos, nascido em 26/07/1972 em São Paulo é tecnólogo em eletricidade (1998), pós graduado em administração da produção (2004) pela UniFEI. Atualmente atua na AES Eletropaulo com analista de sistemas pleno. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, sistemas de controle eletrônicos e acionamento de máquinas elétricas. Em paralelo com a atividade industrial o Sr. Marcelo é professor indeterminado no Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza atuando como professor do curso técnico em eletrônica e informática.