



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

FULVIO CORRALES DE ANDRADE	ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A	fulvio.andrade@elektro.com.br
Valmir Ziolkowski	ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A	Valmir.Ziolkowski@elektro.com.br
Rodrigo Bonato Manfredini	ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A	rodrigo.manfredini@elektro.com.br
José Francisco Resende	ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A	Jose.Resende@elektro.com.br
José Carlos Argolo	SYGMA TECNOLOGIA INDUSTRIA E COMERCIO LTDA	argolo@sygma.com.br
Antônio Vicente Albuquerque de Souza e Silva	MANVEL MANUTENCAO E SERVICOS LTDA	vicentedss@gmail.com
Sidney Yamamoto	SYGMA TECNOLOGIA INDUSTRIA E COMERCIO LTDA	sidney@sygma.com.br
Fabrcício Dias Paes	SYGMA TECNOLOGIA INDUSTRIA E COMERCIO LTDA	fabrcicio.paes@sygma.com.br

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICO COM ULTRACAPACITORES PARA O TRANSPORTE PÚBLICO

Palavras-chave

Eficiência Energética
Recarga Rápida
Smartgrid
Sustentabilidade
Ultracapacitores
Ônibus Elétrico

Resumo

O projeto consiste no desenvolvimento de um protótipo de ônibus com sistema de propulsão totalmente elétrico e de uma estação de recarga de energia elétrica, ambos utilizando a tecnologia de ultracapacitores, que dispensam a necessidade de uma rede de energia elétrica dedicada a exemplo do sistema Trólebus existente na região metropolitana da cidade de São Paulo.

Denominado de Elektro Bus, o protótipo do veículo funcionará com um sistema de tração elétrico utilizando um banco de ultracapacitores capaz de armazenar a carga necessária para o seu deslocamento entre estações de embarque/desembarque. Em cada estação o veículo será recarregado em média em 20s com energia elétrica suficiente para proporcionar uma autonomia para deslocar por até dois quilômetros, distância que

permite alcançar a próxima estação de embarque para uma nova recarga.

Este desenvolvimento tecnológico almeja servir de “semente” para estimular a adoção deste sistema inovador no serviço de transporte público, o que por sua vez proporcionará à sociedade grandes benefícios ambientais e melhora da qualidade de vida, provenientes da redução na emissão dos gases de efeito estufa, estimados na ordem de 108 toneladas de CO₂ por veículo por ano, e servirá de base para o desenvolvimento de uma tecnologia predominantemente nacional.

1. Introdução

O ano de 2008 assinalou a transição para um mundo majoritariamente urbano, com mais de 50% da sua população morando em cidades, acompanhado por todas as vantagens e oportunidades – bem como os problemas e desafios – que a vida urbana e comunitária traz. Embora as atuais taxas de crescimento urbano tenham diminuído em relação às décadas de 70 e 80, muitas cidades ainda não conseguem organizar e atualizar suas redes de serviços públicos essenciais, entre eles o transporte público. A maioria das cidades no Brasil tem crescido de forma desordenada e explosiva, e o resultado, no que se refere ao transporte público, tem sido a formação de um emaranhado de linhas de ônibus operando com grande desperdício de tempo e de custos.

Não obstante, o modelo de transporte público brasileiro adotou largamente a solução do ônibus a diesel, transformando os corredores de ônibus e os pontos de embarque/desembarque em grandes “câmaras de gases” em decorrência da alta concentração de poluentes e de pessoas em um mesmo local. A emissão de poluentes é uma das questões que mais afetam a saúde pública e a qualidade de vida das grandes cidades, enquanto que a elevação da temperatura ambiente em decorrência do uso intensivo de energia é nítida nas regiões metropolitanas. Tais fatores devem ser considerados na análise econômica de alternativas viáveis para o transporte de massa que proporcionem um menor impacto sobre a qualidade do ar e a melhor eficiência energética possível, pois as perdas em vidas, produtividade e utilização dos sistemas de saúde (públicos ou privados) são igualmente pagas pela sociedade. Para a migração do transporte individual para o coletivo, o uso de alternativas tecnológicas avançadas para a redução das emissões deve ser sempre cuidadosamente estudado e adaptado a cada situação.

Neste contexto, torna-se essencial aumentar a oferta de transporte coletivo de boa qualidade para refrear o premente crescimento do uso de automóveis e motocicletas. Visivelmente há que se intervir no modelo do transporte público, introduzindo modernizações tecnológicas nos veículos para o controle de emissões, pois a mera projeção do passado não será sustentável. Para as diferentes tecnologias adotadas nos ônibus para transporte de passageiros é mostrada na figura 1.1 um comparativo da eficiência energética de cada um.

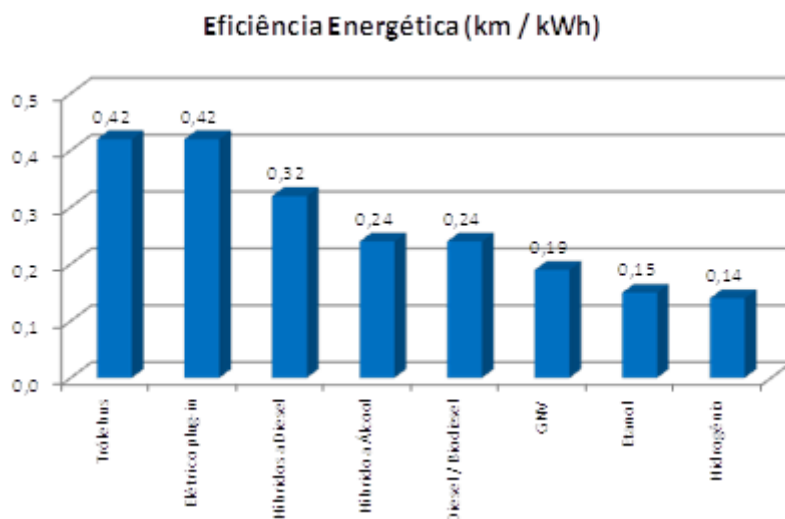


Figura 1.1. – Eficiência Energética das tecnologias dos ônibus urbano, em km/kWh

Embora os ônibus elétricos atuais e a hidrogênio não emitam gases poluentes, há alguns pontos a serem observados. Os ônibus puramente elétricos à bateria necessitam de substituição das mesmas a cada dois ou três anos. Além disso, o tempo de recarga é muito alto, entre seis a oito horas e a relação autonomia do veículo versus a quantidade de baterias não viabiliza este sistema comercialmente. Normalmente sua aplicação é mais viável em soluções híbridas.

O ônibus a hidrogênio lança apenas vapor de água na atmosfera. Entretanto, há um grande problema que é a produção do hidrogênio. A eletrólise da água é um processo intensivo em energia, tornando o combustível caro e deixa negativo o balanço geral de consumo de energia dessa alternativa de combustível. A relação energética é de 1,3 TWh de energia elétrica para cada 1 TWh de hidrogênio gerado. Além disso, a maioria do hidrogênio produzido industrialmente hoje no mundo é fabricada a partir do gás natural, um combustível fóssil como o petróleo.

No caso dos Trólebus, mesmo considerando a parcela de 10% de geração de energia elétrica provindo de combustível fóssil na matriz energética nacional, as emissões de gases poluentes em sua cadeia são muito inferiores em relação às demais tecnologias, além de ocorrerem em regiões descentralizadas e distantes dos centros urbanos, consistindo sob o aspecto ambiental, de eficiência energética, estratégicos e de custo operacional energético, a melhor opção tecnológica atual.

Entretanto, o sistema de trólebus, atualmente em uso, exige o fornecimento de energia através de uma rede aérea dedicada, operando em corrente contínua, de alto custo de implantação, da ordem de um milhão de reais por quilômetro (R\$ 1,6 MM / km) incluindo as estações retificadoras. A manutenção é, também, onerosa e difícil de executar, pois ocorre nas ruas, perturbando o fluxo normal dos demais veículos. A condição operacional desses veículos é bastante limitada nos pontos de curva e de mudança de trajetória pelo fato de a alavanca de alimentação do sistema limitar o movimento. Além disso, se houver desconexão da alavanca o veículo para e requer a ação externa do motorista para recolocação da mesma na rede.

Com a expectativa de receber 2,98 milhões de visitantes no maior país da América do Sul durante a Copa do Mundo de 2014, os responsáveis pelo planejamento urbano vêem no evento uma grande oportunidade para investir em sistemas de transporte sustentável nas 12 cidades-sede. E no país dos ônibus, isso significa atenção especial ao melhor de todos: o sistema BRT (*Bus Rapid Transit*), que fornece um serviço mais rápido e eficiente do que as linhas de ônibus comuns. Os governos federal, estaduais e locais do Brasil já se comprometeram em investir cerca de \$6,5 bilhões em transporte urbano para o evento, um número que deve crescer com os investimentos privados. A Copa do Mundo é uma grande oportunidade para aprimorar o

sistema de transporte público brasileiro, e para mudar de linhas de ônibus simples e privadas para BRTs, no qual o Brasil foi pioneiro. O sistema BRT permite um serviço aprimorado, com ônibus articulados ou bi-articulados capazes de suportar 15.000 passageiros por hora, por faixa, por direção. O BRT é uma das prioridades para a Copa do Mundo. No entanto, existe grande preocupação quanto à emissão de gases poluentes neste modelo de transporte, pois os ônibus convencionais movidos a diesel podem gerar alta concentração nas regiões próximas aos corredores.

Em 2005, o BNDES aprovou a criação de novos instrumentos para financiar a compra de ônibus urbanos no Brasil e a produção de veículos leves de passageiros para exportação. As novas condições de apoio financeiro para aquisição no Brasil de ônibus urbanos, pela Finame, incentivam a racionalização do transporte de passageiros em âmbito municipal e metropolitano. A remuneração do BNDES para aquisição de ônibus para transporte público de passageiros de âmbito municipal e metropolitano passa a ser de 1% a.a. para qualquer modelo de ônibus elétricos e bi-articulados de qualquer energético e, 2,5% a.a. para ônibus híbridos (diesel ou a gás) e 3,5% a.a. para os demais casos.

Feitas estas considerações preliminares, o projeto que está sendo desenvolvido pela Elektro visa criar as bases para o surgimento de um novo modelo para o sistema público de transporte ao dar autonomia aos ônibus elétricos, através de recargas rápidas e seguras destes veículos quando dotados de ultracapacitores, eliminando a totalidade da rede aérea de modo que o ônibus seja abastecido ponto a ponto nas estações de embarque / desembarque de passageiros.

A estação de recarga rápida compreende um sistema de alta concentração de carga e de uma capacidade de transferi-la em um tempo médio de 20 s (tempo máximo 30 s). Utilizando técnicas de modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) e o emprego de IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) são realizadas as estratégias de carga, descarga e dos transientes dos ultracapacitores que são empregados na estação e no veículo a ser recarregado. A aplicação desta nova tecnologia permitirá a estes veículos elétricos a flexibilidade de operação similar a dos veículos de propulsão a combustíveis líquidos. Além desses pontos, espera-se uma grande economia na implantação do sistema; na manutenção da tração puramente elétrica resultando em um sistema de transporte com poluição zero e; na eliminação total dos custos de manutenção da rede aérea existentes nos sistemas trólebus atuais.

A evolução desta proposta de modelo para o setor de transportes e de energia tem o potencial de contribuir com o aumento do rendimento global, desde a geração da energia elétrica até a sua aplicação no veículo; reduzindo ou eliminando os custos operacionais oriundos da manutenção da rede aérea dedicada; eliminando a indisponibilidade do veículo por desconexão e; permitindo a flexibilidade nos casos de obstrução do trajeto em função da autonomia e capacidade de recargas rápidas proporcionadas pelos ultracapacitores.

Do ponto de vista de retorno econômico para a empresa de energia elétrica, um dos principais fatores é a possibilidade de criação de um grande mercado potencial que será advindo da substituição de um percentual de ônibus movido a diesel por veículos equivalentes com melhor rendimento movidos a energia elétrica. Considerando que cada veículo percorre em média 300 km por dia, e que o consumo médio da frota é de 0,39 Litros de diesel por km, o consumo diário de diesel é da ordem de 117 litros. O consumo energético de um ônibus elétrico é de 2,3 kWh por km rodado. Conseqüentemente o mercado potencial aberto pelo uso de energia elétrica no transporte urbano de massa seria de 690 kWh por veículo por dia. Os ganhos ambientais são significativos considerando que a emissão por km de um ônibus é da ordem de 1.197 g de CO₂, 0,14 g de SO_x e 10,28 g de NO_x, a substituição do ônibus diesel pela alternativa do veículo elétrico gera uma redução diária da ordem de 359,1 kg de CO₂, 0,042 kg de SO_x e 3,084 Kg de NO_x por ônibus. Outro ponto a ser levado em consideração é no aumento da eficiência energética despendida em transporte. Os melhores motores a diesel têm eficiência de aproximadamente 35%; já um motor de tração elétrica apresenta eficiência da ordem de 95%, o que representa um considerável resultado.

Para as distribuidoras de energia elétrica, além de ser um mecanismo de fomento do mercado de energia

elétrica ao criar uma alternativa para a substituição do diesel no transporte público pela eletricidade, o projeto ainda proporcionará conhecimento sobre uma nova tecnologia e seus efeitos sobre a operação do serviço de distribuição, possibilitando simular o impacto da adoção desta tecnologia no mercado.

2. Desenvolvimento

O sistema proposto foi dividido em duas partes complementares, ambas tratadas dentro do programa de P&D ANEEL para o desenvolvimento de um protótipo de Ônibus Elétrico dotado de um sistema de propulsão totalmente elétrico com ultracapacitores, denominado de Elektro Bus, e de uma Estação de Recarga Rápida para transferência da alta concentração de energia elétrica aos ultracapacitores do veículo. A figura 2.1. mostra a concepção de operação de recarga rápida desenvolvida para o projeto.

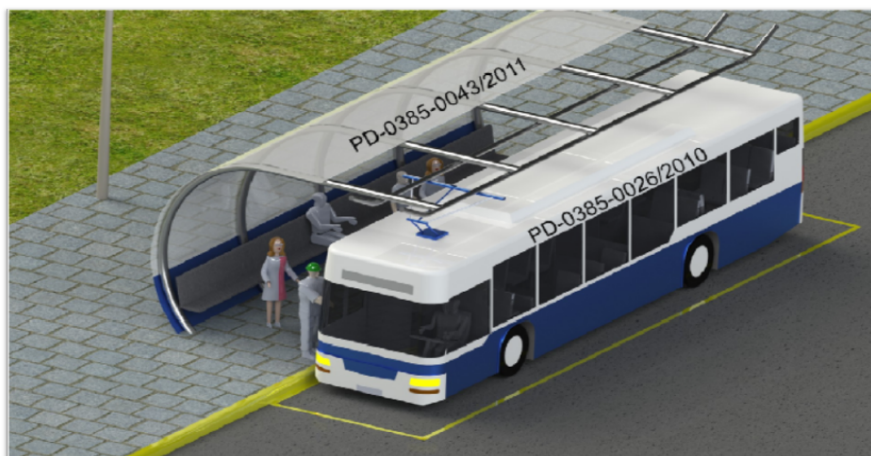


Figura 2.1. Desenho 3D em perspectiva da concepção do Elektro Bus e da Estação de Recarga Rápida

O veículo será controlado por um sistema de gerenciamento interligado em todos os equipamentos de controle e potência, atuando sobre o fluxo de energia e proteção do veículo e dos passageiros. A energia recebida da estação de recarga rápida é coletada por um pantógrafo automático que conduz a corrente contínua, ao banco de ultracapacitores, controlados através de modulação PWM, proporcionados pelo conjunto de IGBT's. A energia armazenada no banco de ultracapacitores usada no acionamento do motor de tração é controlada também, através de modulação PWM, possibilitando ainda, o re-armazenando da energia gerada durante as frenagens, aumentando a autonomia do veículo. A figura 2.2. mostra o fluxo de energia do Elektro Bus.

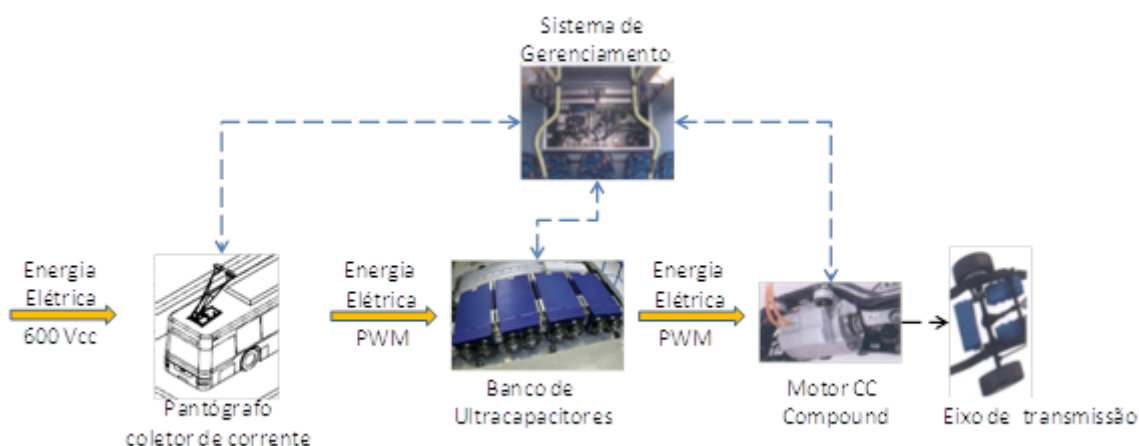


Figura 2.2. – Visão geral do fluxo de energia no Elektro Bus

Foram executados estudos junto aos fabricantes de equipamentos que compõem o sistema para o desenvolvimento do protótipo que atende aos requisitos e legislação quanto à norma técnica NBR 15570:2009 e órgãos públicos reguladores. A seguir são apresentadas as características técnicas básicas do protótipo:

- Comprimento: 12 m;
- Largura: 2,50 m;
- Peso sem passageiros: 12,50 tons;
- Peso com passageiros: 19 tons;

Sistema de Tração

- Tecnologia do sistema de tração: chopper a IGBT;
- Tipo de motor de tração: corrente contínua.
- Velocidade máxima: 60 km/h;
- Aceleração máxima com carga: 1,10 m/s²;

Sistema Autônomo

Características gerais

- Distância entre pontos de recarga: 1000 m;
- Distância máxima para carga total: 2000 m;
- Tempo de recarga: em torno de 20s;
- Tensão nominal do sistema de alimentação (saída da estação retificadora): 600 Vcc;
- Variação de tensão de alimentação admissível: $\pm 20\%$;
- Sistema de controle: Controle de tensão e corrente de carga, descarga e regeneração;

Sistema Autônomo – ultracapacitores (UC)

- Capacidade energética total: 2,3 kWh;
- Sistema de refrigeração: ar forçado;
- Sistema de proteção: sobretemperatura e desbalanceamento de tensão;

A partir das informações coletadas do veículo, dos equipamentos e dispositivos, definiu-se a concepção geral do veículo.

Os estudos iniciais foram voltados para determinar qual ultracapacitor atenderia as especificidades da aplicação. A maioria dos ultracapacitores disponíveis no mercado é do tipo dupla camada, que pode ser visto como um conjunto de dois eletrodos de carbono poroso não-reativo no coletor de corrente, imerso em uma solução eletrolítica com um potencial aplicado nos coletores. Em uma célula de dupla camada, a tensão aplicada no eletrodo positivo atrai os íons negativos no eletrólito, enquanto o mesmo potencial no eletrodo negativo atrai os íons positivos. O separador dielétrico impede que os dois eletrodos entrem em curto-circuito. A quantidade de energia armazenada é muito grande quando comparado com um capacitor tradicional devido à enorme superfície disponível graças aos eletrodos de carbono poroso. Em função desses aspectos, foram identificadas as empresas Maxwell e Nesscap, que demonstraram capacidade produtiva e de fornecimento que atenderam as necessidades do projeto apresentando equipamentos com características adequadas no que diz respeito à capacidade de armazenamento e transferência de energia gerenciada pelo sistema de controle. Todo o processo de lógica e malhas dos sistemas de controle e de potência é feito eletronicamente, para que ocorra de forma automática e segura. Na figura 2.3 é mostrado o diagrama de

blocos do circuito geral de potência elaborado.

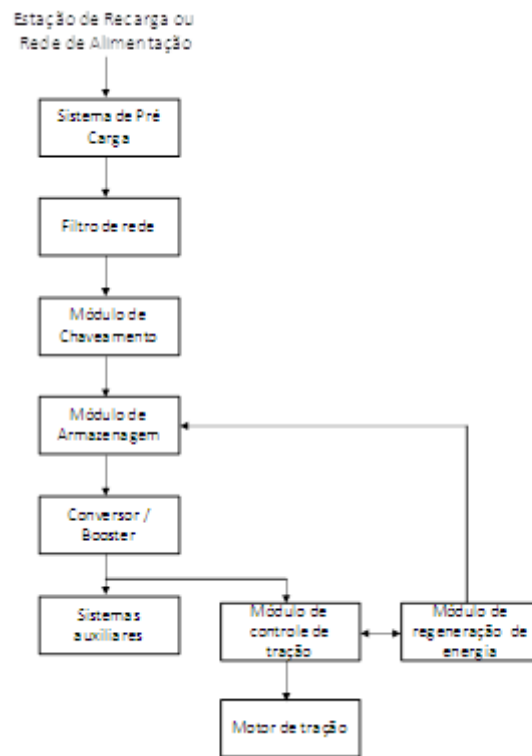


Figura 2.3. – Diagrama de blocos do circuito geral de potência do Elektro Bus

O circuito de potência para recarga dos ultracapacitores é alimentado em 600 V, corrente contínua, controlada através da modulação por largura de pulso (PWM) pelo sistema de gerenciamento do fluxo de energia instalado na estação de recarga rápida e no Elektro Bus. No veículo existe um filtro de rede que elimina os ruídos de linha e suaviza possíveis ondulações. O processo inicia através do Chopper, também chamado de regulador chaveado, composto por IGBT's que utiliza modulação por largura de pulso chaveando ON-OFF a corrente contínua de entrada e controlando a corrente contínua de saída e, regulando a tensão de saída no valor nominal para modular e controlar a corrente de carga do banco de ultracapacitores. Posteriormente a energia armazenada é destinada a um Booster que é composto por um Inversor DC-AC trifásico com modulação PWM que acoplado no primário de um transformador elevador tem seu secundário conectado ao módulo retificador para alimentar o motor de tração, composto por filtro e módulos de chaveamento por IGBT's para controlar a tensão e corrente do motor de tração e aproveitar a energia gerada durante as frenagens. O sistema é composto também por um módulo de regeneração de energia localizado dentro do módulo de controle de tração que recupera de 30 a 40% da energia gerada pelo motor durante as frenagens e é dotado por filtros e um módulo de chaveamento para controlar a tensão e corrente da energia em regeneração.

Para que houvesse a recarga do veículo no menor tempo possível, foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo coletor de corrente denominado pantógrafo que será instalado no teto do ônibus para se conectar a estação de recarga. Dentro das condições de contorno e especificidades deste projeto foi possível elaborar um equipamento mais moderno e melhor adaptado às particularidades do Elektro Bus, adotando um conceito diferente do convencional, projetando um dispositivo de acionamento pneumático leve e isolado. Desta forma, o resultado final foi um coletor que, do ponto de vista elétrico, manteve os quesitos de velocidade e segurança no processo de recarga, além de contemplar as características básicas de ser estruturalmente mais leve, operacionalmente mais simples, mais ágil e versátil nas conexões para recarga rápida dos ultracapacitores conforme mostrado na figura 2.4.

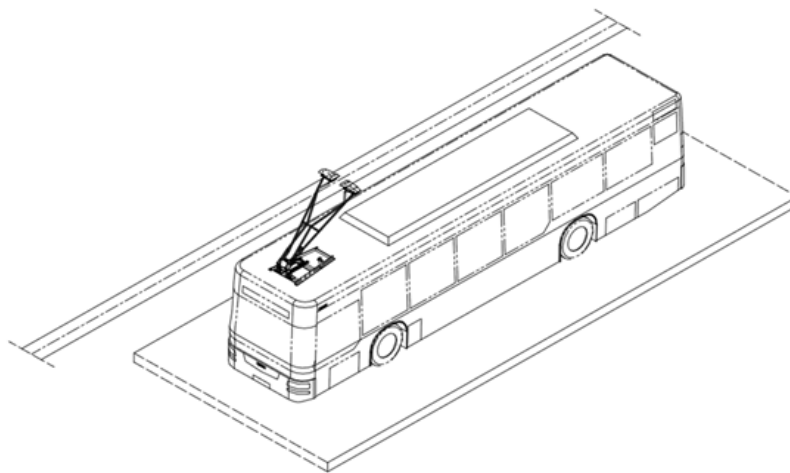


Figura 2.4. – Pantógrafo de recarga de energia no Elektro Bus

Para construir o protótipo do veículo foram adquiridos em leilão 2 ônibus híbridos usados, sendo que um está sendo adaptado com a tecnologia dos ultracapacitores e o outro, em decorrência da idade destes veículos híbridos, serve como fonte de peças essenciais em caso de necessidade de manutenção. Como o veículo adquirido já possuía um gerador de energia elétrica, isso permitiu que o protótipo final fosse dotado de um sistema de tração reserva para operação em situações de falta de energia nas estações de recarga. Portanto, o protótipo poderá ainda funcionar em 3 modalidades: elétrico com alimentação pela estação de recarga com ultracapacitores; elétrico alimentado pela rede aérea atual do Trólebus; e elétrico alimentado pelo gerador nas situações de falta de energia elétrica na rede.

3. ESTAÇÃO DE RECARGA RÁPIDA

O sistema de propulsão totalmente elétrico operando de maneira autônoma tem melhor desempenho se aplicado em corredores exclusivos, sendo construídas estações de embarque / desembarque de passageiros em distâncias convencionais entre si de 600 a 1000 metros. Junto de cada estação existe um carregador alimentado por corrente alternada convencional capaz de transformar a corrente em corrente contínua e carregar o banco de ultracapacitores instalado na estação e que por sua vez irão alimentar o banco de ultracapacitores de cada veículo, enquanto os passageiros embarcam / desembarcam. Cada banco de ultracapacitores, instalado em cada veículo acumula energia suficiente para mantê-lo em operação autônoma, durante seu percurso entre duas estações subsequentes. Dessa forma, cada veículo é capaz de se deslocar de estação em estação, sendo recarregados em cada parada. A figura 3.1 ilustra o fluxo de energia da estação de recarga.

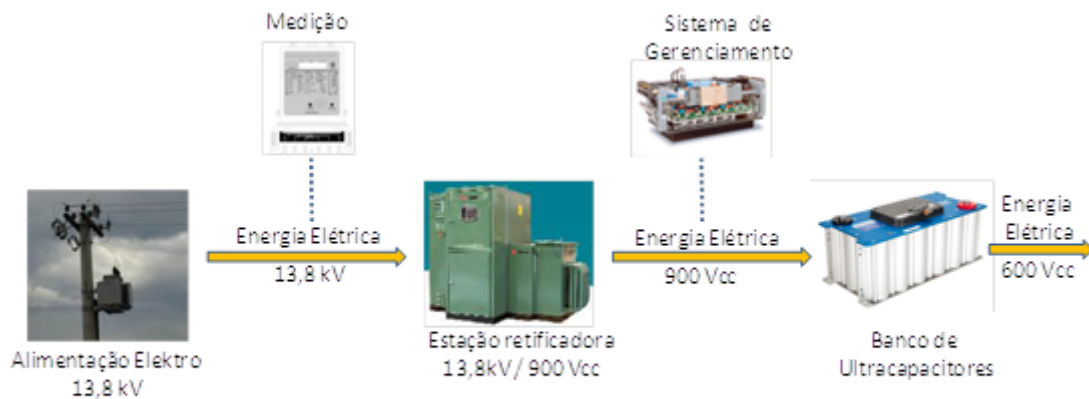


Figura 3.1. – Visão geral do fluxo de energia para a estação de recarga

A subestação retificadora pode ser do tipo blindada ou abrigada, de acordo com a disponibilidade local para acondicionar um transformador seco para rebaixamento do 13,8 kV juntamente dos seus sistemas de proteção através de seccionadora tripolar com elo fusível e monitoramento de energia por conjunto compacto de medidor eletrônico multifunção com transformadores de medição encapsulados (TCs e TPs) para coleta de dados da alta tensão e registro de energia ativa, reativa e demanda seguindo os preceitos estabelecidos nas normas de redes aéreas de engenharia e distribuição de energia elétrica da Elektro, visando diminuir e controlar os possíveis impactos que possam ser causados a rede de distribuição garantindo eficiência no desempenho de suas funções e máxima continuidade de fornecimento.

Se o ônibus fosse conectado diretamente a uma subestação retificadora convencional poderia causar transitórios no momento da conexão do coletor de corrente, que afetariam os demais consumidores da rede de distribuição e impactaria negativamente nos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica da Distribuidora (DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC). Para mitigar este impacto, o projeto da Estação de Recarga Rápida, possui um banco de UC's com um sistema de controle do fluxo de energia que irá reduzir a potência solicitada e, assim, eliminará o impacto de transitórios desta nova carga à rede de distribuição de energia elétrica. Além da função de armazenagem de energia, os UC's atuarão como potentes filtros de transitórios deste sistema.

O sistema de carga/descarga do banco de ultracapacitores da estação é baseado nos mesmos princípios adotados para o veículo utilizando a técnica de modulação por largura de pulso com o emprego de IGBT no sistema de potência. A figura 3.2 apresenta o diagrama esquemático da Estação de Recarga.

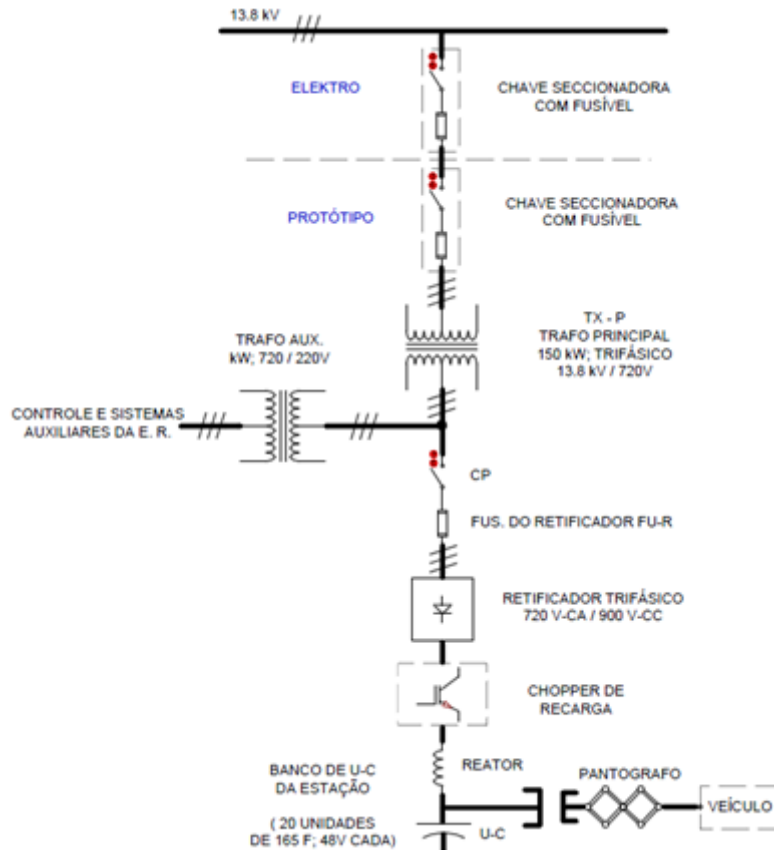


Figura 3.2. Diagrama esquemático da Estação de Recarga

A energia entregue pela estação retificadora é conduzida para o banco de ultracapacitores, cuja corrente é controlada pelo sistema de gerenciamento durante cada carga dos elementos. Após a descarga do banco de ultracapacitores, é re-iniciada a recarga dos mesmos, mantendo o ciclo carga-descarga. A conexão com o pantógrafo do veículo para entrega de energia é feita pela rede aérea rígida instalada na Estação de Recarga sendo dimensionada conforme a necessidade do corredor em relação à quantidade de veículos sendo recarregados no mesmo instante. A ausência da rede aérea gera economia na implantação do sistema proposto neste artigo e elimina a necessidade de manutenção que é de difícil execução e de alto custo demandada pela rede aérea do sistema trólebus. Também contribui no aspecto visual e ornamental do ambiente urbano.

Concomitantemente às atividades, estão sendo realizados estudos sobre como a adoção desta nova tecnologia poderia impactar na projeção de consumo da Elektro. Conforme citado anteriormente, o consumo energético de um ônibus elétrico é de 2,3 kWh por km rodado. O consumo de energia destes veículos pode sofrer variação em função do tipo de relevo do percurso, uso ou não de ar condicionado, uso racional da frenagem elétrica antecedendo a pneumática, dentre outros fatores de origem operacional. Para o projeto Elektro Bus, foi considerado este mesmo valor que é o valor médio aferido na cidade de São Paulo, adotando assim uma condição de contorno mais conservadora para garantir a funcionalidade operacional do protótipo.

Baseado nas informações verbais obtidas na reunião com a EMTU, no dia 21/09/2011, e com a Himalaia Transportes (responsável pelo corredor de trólebus Paes de Barros), no dia 22/11/2011, a distância média entre os pontos embarque dos corredores de trólebus é de 600 metros e o tempo médio de chegada entre os ônibus nos pontos é de 1 minuto. Desta forma, adotou-se 60 segundos como o tempo médio entre recargas do Elektro Bus, ou seja, depois da saída de um veículo recarregado na estação, somente após este tempo será conectado outro ônibus na mesma estação. Este período refere-se ao tempo que o veículo levaria para percorrer de 600 ~ 1000 metros e chegar até a próxima estação. Assim, os ultracapacitores da Estação de Recarga Rápida, terão 60 segundos para serem recarregados.

Tais informações serão discutidas detalhadamente junto à EMTU e SPTrans quando da execução dos testes em campo o que permitirá uma re-análise e revisão dos cálculos, se for necessário.

Assim, preliminarmente, considerando a recarga dos UC's da Estação:

$$\text{Energia} = \text{Potência} \times \text{tempo} = 2,3 \text{ kWh} \quad \text{e} \quad \text{tempo de recarga} = 60\text{s}$$

A potência solicitada durante a recarga dos UC's da Estação será:

$$\text{Potência} = \frac{\text{Energia(kWh)}}{\text{tempo(h)}} = \frac{2,3}{0,016} = 143,8 \text{ kW}$$

|

Considerando o tempo médio de operação por estação em 15 horas diárias, o consumo de energia elétrica estimado seria de:

$$\text{Consumo diário} = \text{Potência(kW)} \times \text{tempo(h)} = 143,8 \times 15 = 2.157 \text{ kWh}$$

Portanto, o consumo de energia elétrica mensal estimada seria de 65 MWh / estação. Entretanto, os trólebus ou ônibus híbridos à bateria são dotados de resistências de dissipação da energia excedente oriunda da frenagem regenerativa uma vez que os Trólebus não possuem equipamentos para armazenagem e os híbridos possuem banco de baterias que não são capazes de absorver correntes elevadas acima de sua condição nominal, podendo danificá-las irreversivelmente. Desconsiderando as perdas elétricas de transformação e considerando que os ultracapacitores têm capacidade de absorver e entregar potência energética 10 vezes maior que as baterias, haverá um maior aproveitamento da energia provida da frenagem regenerativa, em torno de 30 a 40% superior ao sistema com baterias. Desta forma, a energia consumida pelo Elektro Bus poderá ser menor, em torno de 35%, que a consumida pelos trólebus e ônibus híbridos atuais. Salientando que o consumo de energia tem interferência direta do tipo de relevo do percurso, uso ou não de ar condicionado, uso racional da frenagem elétrica antecedendo a pneumática, dentre outros fatores de origem operacional. Portanto, o consumo de energia elétrica mensal estimada seria de 45 MWh / estação. Estes dados serão medidos e analisados com maior precisão durante os testes previstos para início em março de 2012.

3. Conclusões

Pode-se concluir que com o desenvolvimento apresentado neste artigo mostra-se a viabilidade técnica e funcional da operação do sistema de transporte público tipo elétrico dotado de ultracapacitores, permitindo além da expansão da distribuição de energia elétrica por parte das empresas de distribuição também a

evolução deste modelo de transporte público por parte das empresas operadoras de transporte urbano de passageiros. Adicionalmente, contribuindo para a justificativa deste artigo, tem-se o interesse mundial para o desenvolvimento de tecnologias ecologicamente corretas, que neste caso se ajusta principalmente a países onde a base da geração de energia está calçada em hidroelétricas, além de contribuir na melhoria da qualidade de vida da população pertencente a grandes centros urbanos, onde em muitos exemplos a qualidade do ar é precária durante muitos meses do ano. Finalmente, o presente artigo ainda contribui para a temática atual da “Mobilidade Urbana Sustentável”, considerando-se o desenvolvimento e inovação aplicados ao modal de transporte coletivo eletrificado, com insignificante emissão de elementos poluentes, com níveis de ruídos reduzidos na operação, ou seja, silencioso, contribuindo fortemente para a sustentabilidade tudo isso devido à maior eficiência energética em relação aos veículos convencionais movidos à combustão interna.

4. Referências bibliográficas

Perspectivas de alteração da matriz energética do transporte urbano por ônibus - Questões Técnicas, Ambientais e Mercadológicas - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos – NTU, 2009;

Avaliação comparativa das modalidades do transporte público urbano - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos – NTU, 2009;

Anuário NTU 2009-2010;

Artigo “Vantagens da propulsão elétrica aplicada ao transporte rodoviário urbano em linhas expressas” – Instituto Nacional de Tecnologia – MCT, 2010;

Sistema de tração de um ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias, UFRJ, 2007;

LOCKWOOD S., Darlington Trolleybuses, Editora Middleton Press, ano 2004;

HARTLAND D., Collectors for train, trams and trolleys, Editora Middleton Press, ano 2004

Agência Nacional de Transportes Públicos, Sistema de Informações da Mobilidade Urbana – Relatório Geral 2007, São Paulo, 2008;

Artigo “Itaipu Binacional apresenta experiência com protótipo elétrico híbrido plug-in a etanol”, INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2011;

Manual de Manutenção - Trólebus híbrido SPTRANS;

Manual dos padrões técnicos de veículos da SPTrans - Trólebus, 2008;

Agencia Nacional de Transportes Públicos, Sistema de Informações da Mobilidade Urbana - Relatório Geral 2007, São Paulo, 2008;

Data Sheet - 48V Modules - Document number: 1009365.10 - Acesso em 22/06/2010 – Disponível em: <http://www.maxwell.com>;

Ultracapacitor Products 48 V Modules – Acessado em 22/06/2010 – Disponível em: <http://www.nesscap.com>.