

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Arquitetura
Curso de Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao
Ambiente Construído

Marco Túlio Nóbrega Cesarino Mattos Santos

MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: UMA ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE
CENTRAIS FOTOVOLTAICAS PARA ALIMENTAÇÃO DE ÔNIBUS ZERO EMISSÃO EM
UM SISTEMA BRT

Belo Horizonte

2017

Marco Túlio Nóbrega Cesarino Mattos Santos

**MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: UMA ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE CENTRAIS
FOTOVOLTAICAS PARA ALIMENTAÇÃO DE ÔNIBUS ZERO EMISSÃO EM UM
SISTEMA BRT**

Monografia apresentada à Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído da Universidade Federal de Minas Gerais - como requisito para conclusão do curso.

Linha de pesquisa: Planejamento Urbano Sustentável

Orientadora: Prof.^a Grace Cristina Roel Gutierrez

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

S237m	<p>Santos, Marco Túlio Nóbrega Cesarino Mattos.</p> <p>Mobilidade urbana sustentável [manuscrito] : uma análise da utilização de centrais fotovoltaicas para alimentação de ônibus zero emissão em um sistema BRT / Marco Túlio Nóbrega Cesarino Mattos Santos. - 2017.</p> <p>88 f. : il.</p> <p>Orientadora: Grace Cristina Roel Gutierrez.</p> <p>Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.</p> <p>1. Transporte urbano - Teses. 2. Energia solar - Teses. 3. Ônibus - Teses. 4. Veículos elétricos - Teses. 5. Desenvolvimento sustentável - Teses. 6. Planejamento urbano - Teses. I. Gutierrez, Grace Cristina Roel. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.</p>
	CDD 711.7

RESUMO

Problemas ligados à infraestrutura de transportes, como congestionamentos, poluição atmosférica resultante da emissão veicular e acidentes, são constantes em diversas cidades ao redor do globo, e Belo Horizonte não é exceção à regra. A capital mineira apresenta um dos piores índices de mobilidade urbana do mundo, resultado do aumento exponencial do número de veículos individuais nas vias urbanas e das péssimas condições dos meios de transporte coletivo locais. Frente esse cenário, Belo Horizonte passou a investir em ações sustentáveis no setor de mobilidade urbana, especialmente com a elaboração de seu Plano de Mobilidade Urbana em 2013, que contém, dentre outras propostas de intervenção, a promoção do uso de novas tecnologias mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente no transporte público. Buscando trazer os conceitos de transformação urbana sustentável observados em casos de sucesso em cidades similares, e adequando-os à realidade local, o presente estudo tem como objetivo desenvolver uma proposta de implantação de um sistema de geração fotovoltaica nas coberturas de estações do BRT em Belo Horizonte, para fins de alimentação de uma frota de ônibus elétricos, verificando ao fim as reduções dos impactos ambientais proporcionados por esta solução quando comparada com a tradicional frota de ônibus à diesel.

Palavras-chave: Mobilidade urbana sustentável; Energia solar fotovoltaica; Ônibus elétrico; Cidades sustentáveis; Planejamento urbano sustentável.

ABSTRACT

Issues regarding transport infrastructure, such as traffic jams, pollution generated by gas emission and accidents, are constant problems faced by several cities around the globe, and Belo Horizonte is no exception to that. The city presents one of the world's worst urban mobility rates, due to the increasing number of individual vehicles on the streets and the terrible conditions of local public transportation apparatus. Facing this scenario, Belo Horizonte started investing in sustainable actions inside urban mobility, notably with the development of its Urban Mobility Plan in 2013, which suggests, among others, promoting the development and use of new, more reliable and environmental friendly Technologies in public transportation. Trying to bring the concepts of sustainable urban transformation noticed in similar cities, and fitting them to a local reality, this study aims on developing a photovoltaic system on the roof of BRT stations along Belo Horizonte, which would be capable of charging a fleet of electric buses, checking, at the end, the reduction of environmental impacts provided by this alternative when compared to the traditional diesel-based bus fleet.

Keywords: Sustainable urban mobility; Photovoltaics; Electric bus; Sustainable cities; Sustainable urban planning.

LISTA DE ABREVIATURAS

AIST – *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si – Silício amorfo
BDMG – Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais
BRT – Transporte Rápido por Ônibus
CdTe – Telureto de cádmio
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CEO – Diretor executivo
CIGS – Disseleneto de cobre-índio-gálio
CIS – Disseleneto de cobre-índio
CNG - gás natural comprimido
CO₂ – Dióxido de carbono
CO₂-eq – Equivalência em dióxido de carbono
CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
DSSC – Células solares sensibilizadas por corante
E-bus – Ônibus elétrico
FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GEEs – Gases de efeito estufa
ITDP – Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
Li-ion - Lítio-íon
LiFePO₄ – Ferrofosfato de lítio
LNG - gás natural liquefeito
m-Si – Silício monocristalino
NCPV - *National Center for Photovoltaics*
NiCd - Níquel-cádmio
NO_x – Óxidos de nitrogênio
NREL – *National Renewable Energy Laboratory*
NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
OPV – Célula fotovoltaica orgânica
PBH – Prefeitura de Belo Horizonte
PlanMob-BH – Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte
PM10 – Particulados de diâmetro inferior a 10 micrômetros
p-n – Positivo-negativo

p-Si – Silício policristalino

PV - Painéis fotovoltaicos

R\$ - Reais

S-cap - Supercapacitor

SFCR - Sistema fotovoltaico conectado à rede

SFV - Sistema fotovoltaico

SOx – Óxidos de enxofre

STA – *Sustainable Transport Award*

TD - Taxa de desempenho

TERGIP – Terminal Rodoviário Governador Israel Pinheiro

TOSA – *Trolleybus Optimisation Système Alimentation*

TPO – Manta impermeabilizante termoplástica de poliolefina

U-cap - Ultracapacitor

UFV - Usina fotovoltaica

VLT - Veículo Leve sobre Trilhos

WWF – *World Wildlife Fund*

LISTA DE SIGLAS

A - Ampère

h - Hora

kg – quilograma

km – quilômetro

km/h– quilômetro por hora

kW – quilowatt

kWh – quilowatt-hora

kWp – quilowatt-pico

m - metro

mm - milímetro

MWh – megaWatt-hora

MWp – megaWatt-pico

ton – tonelada

V – volt

W – Watt

Wh – Watt-hora

Wp – Watt-pico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de hélice quádrupla da inovação baseado no conhecimento.....	15
Figura 2 - Resultados dos testes de recordes de eficiência energética	21
Figura 3 - Espaço necessário em uma mesma via para três modos de deslocamento	25
Figura 4 – Economia média de combustível por tecnologia de ônibus	28
Figura 5 – Evolução da frota de automóveis e motocicletas de BH – 2001 a 2010	34
Figura 6 – Matriz de transporte urbano de Belo Horizonte (exceto “a pé”)	35
Figura 7 – Principais equipamentos urbanos de Belo Horizonte	37
Figura 8 – Acesso da linha MOVE 9850 ao Corredor Cristiano Machado	38
Figura 9 – Emissão de gases poluentes veiculares por tecnologia (ton)	39
Figura 10 – Corredor MOVE Cristiano Machado e estações.....	41
Figura 11 – Acesso do MOVE e integração intermodal na Estação São Gabriel.....	43
Figura 12 – Acesso à Estação Vilarinho via Cristiano Machado.....	44
Figura 13 – Segmentos metroviários previstos para o horizonte 2020	47
Figura 14 - Corredores de BRT e Terminais de Ônibus Previstos para o Horizonte 2020	50
Figura 15 – Acesso previsto à Estação Vilarinho pela Av. Vilarinho.....	51
Figura 16 – Estação MOVE São Gabriel – vista superior.....	52
Figura 17 – Estação MOVE Vilarinho – vista superior.....	53
Figura 18 – Esquema de sistema de recarga rápida em ponto de ônibus.....	56
Figura 19 – Esquema de sistema de recarga rápida no solo por indução magnética	57
Figura 20 - Interface do programa PVsyst: tela de dimensionamento do SFCR.....	67
Figura 21 - Disposição do SFV: cenário "Área mínima"	76
Figura 22 - Disposição do SFV: cenário "Área total disponível"	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demanda de energia não-renovável, pegada de carbono e tempo de payback de uma célula fotovoltaica polimérica flexível comparada a outras tecnologias fotovoltaicas	20
Tabela 2 - Eficiência dos diferentes tipos de células fotovoltaicas	21
Tabela 3 – Indicadores de gases de efeito estufa em Belo Horizonte (2008 – 2013)	35
Tabela 4 - Distância entre estações no Corredor Cristiano Machado.....	42
Tabela 5 - Distância entre estações no Corredor Cristiano Machado.....	45
Tabela 6 - Dados técnicos do metrô de superfície de Belo Horizonte	46
Tabela 7 - Exemplos de cargas mecânicas impostas por três módulos FV distintos	58
Tabela 8 - Consumo específico de energia em ônibus elétricos Li-ion.....	61
Tabela 9 - Consumo específico e autonomia dos modelos BYD K9 e Sinautec U-cap.....	62
Tabela 10 - Consumo energético por recargas de cada capabus	63
Tabela 11 - Demanda diária do sistema de ônibus proposto.....	65
Tabela 12 - Comparação técnica entre os módulos analisados	68
Tabela 13 - Dimensionamento do SFV para ônibus S-cap.....	69
Tabela 14 - Dimensionamento do SFV para ônibus Li-ion	70
Tabela 15 - Capacidade máxima de geração fotovoltaica no sistema proposto	71
Tabela 16 - Rendimento quilométrico e emissões por modalidade	72
Tabela 17 - Análise da redução de emissão de GEE – Cenário “Área mínima”	73
Tabela 18 - Análise de GEE dos ônibus Diesel substituídos pelo sistema FV de área total .	74
Tabela 19 - Análise da redução de emissão de GEE's – Cenário “Área total disponível”	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. CIDADES E A TRANSFORMAÇÃO URBANA SUSTENTÁVEL.....	13
3.1. Inovação e competitividade	14
3.2. Transporte e acessibilidade	15
3.3. Edificações	16
4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
4.1. Células fotovoltaicas: tecnologias existentes	18
4.2. Geração distribuída: sistemas fotovoltaicos conectados à rede	22
4.2.1. Micro e mini geração fotovoltaica	22
4.2.2. Usinas fotovoltaicas	23
5. MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL.....	24
5.1. Transporte coletivo de massa	25
5.1.1. BRT	26
5.1.2. Ônibus elétricos	27
5.1.2.1. <i>Ônibus elétrico-solar</i>	29
5.1.2.2. <i>Capabus</i>	30
5.1.3. Trólebus moderno	31
5.1.3.1. <i>Dual-bus: trólebus híbridos com autonomia da rede</i>	32
5.1.4. VLT	33
5.2. Mobilidade urbana em Belo Horizonte	34
5.2.1. MOVE	40
5.2.1.1. Corredor MOVE Cristiano Machado	40
5.2.2. Metrô	45
6. PROPOSTA DE INTERVENÇÃO	48
6.1. Análise da área de escopo	48
6.2. Utilização da área para instalação FV	52
6.3. Tecnologias escolhidas	54
6.3.1. Opções de mobilidade urbana	54
6.3.2. Opções de tecnologia fotovoltaica.....	57
6.4. Dimensionamento dos sistemas	60
6.4.1. Demanda energética do sistema de ônibus elétricos	61

6.4.2. Cargas no trajeto dos ônibus S-Cap	63
6.4.3. Distância percorrida pelos ônibus elétricos	64
6.4.5. Dimensionamento do SFV	65
6.4.5.1. Área mínima para a demanda de projeto	68
6.4.5.2. Potencial de geração elétrica total	71
6.4.6. Análise da redução de emissão de GEE	72
6.5. Escolha das tecnologias e disposição do SFV	75
6.6. Possibilidade de expansão futura do sistema	78
7. CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUÇÃO

Como diversas outras metrópoles brasileiras, Belo Horizonte vem sofrendo nas últimas décadas, problemas referentes à sua infraestrutura de transportes, dentre os quais congestionamentos, poluição atmosférica resultante da emissão veicular e acidentes, o que se deve, em especial, ao enorme contingente de veículos particulares presentes nas ruas, os quais, em sua grande maioria, são movidos a combustíveis não renováveis (BHTRANS, 2013). Unindo esses problemas a diversos outros fatores de cunho político, topográfico e cultural, observa-se que Belo Horizonte possui, nos dias atuais, um péssimo cenário acerca de questões de mobilidade urbana, o que se agrava ainda mais com o aumento exponencial da taxa de motorização da população, alcançando a média de 1 automóvel para cada 2 habitantes na capital mineira (BIAGUE, 2011). Isto provém não tão somente do aumento do poder aquisitivo da classe média e das formas de financiamento de um veículo nos últimos anos, mas também das péssimas condições observadas no aparato de transporte coletivo local. Desta forma, os habitantes acabam preferindo manter um – ou, às vezes, mais – veículos particulares e gastar com sua manutenção do que confiar na infraestrutura de transporte coletivo disponível, uma vez que o primeiro é visto como mais “confiável” e “seguro” do que o segundo (NEIJ, 2015; MCCORMICK, 2013).

Visando contornar tal cenário e orientar a uma realidade que prime pela sustentabilidade no meio urbano, Belo Horizonte passou a investir em ações de transformação infraestrutural sustentável no setor de mobilidade urbana. Com a elaboração do Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte – PlanMob-BH – em 2013, a cidade expôs a situação histórica da mobilidade urbana ao longo das últimas décadas, os problemas e necessidades locais observados, e traçou possíveis linhas de intervenção para resolvê-los, baseando-se em casos de sucesso registrados em outras cidades do mundo (BHTRANS, 2013). Dentre as propostas de intervenção, destacam-se projetos e soluções como implementação de ciclovias, uso de novas tecnologias mais eficientes no transporte público, restrições de estacionamento em áreas centrais e a pedestrianização das ruas nos entornos de centros históricos locais, que lhe garantiram o prêmio *Sustainable Transport Award* – STA – em 2015 (ZOTTIS, 2014; WWF, 2014). Mas, sem dúvidas, um dos resultados mais significativos do PlanMob-BH foi a implementação do sistema de Transporte Rápido por Ônibus – BRT – local, o MOVE, em 2014, o qual conta, atualmente, com uma rede de mais de 20km

de corredores capaz de atender cerca de 500 mil usuários diariamente (PARREIRAS, 2015).

Pensando em trazer à prática os conceitos de transformação urbana sustentável, ao se tomar como exemplo casos de sucesso prévios e adequá-los à realidade de uma determinada cidade, o presente projeto tem por objetivo demonstrar que é possível ir um passo além na busca pela mobilidade urbana sustentável, implementando uma tecnologia de transporte coletivo urbano mais limpa do que a atualmente utilizada dentro do sistema MOVE, através da associação de ônibus elétricos a um sistema de geração de energia fotovoltaico, instalado sobre a cobertura de duas das principais estações de transferência integrantes do sistema BRT local.

Para a realização deste, foi realizada uma extensa revisão de literatura e análise de estudos, projetos e técnicas voltados à sustentabilidade no ambiente urbano. Foram explorados artigos e pesquisas que focam na evolução tecnológica dentro das áreas de mobilidade urbana sustentável e de energia solar fotovoltaica integrada à rede, nos desafios da transformação urbana sustentável e nas possibilidades de intervenções que podem ser realizadas neste patamar no processo de desenvolvimento da economia sustentável em outras cidades.

Por fim, verificar se a implementação do sistema fotovoltaico dentro de um sistema BRT para fins de compensação energética dos gastos da frota veicular com eletricidade se mostra uma solução sustentavelmente atrativa aos usuários do serviço de transporte coletivo local, sendo uma tecnologia tão ou mais confiável, acessível e eficiente quanto à tecnologia aplicada atualmente no BRT, capaz de diminuir os índices de emissão de gases de efeito estufa e de motorização nas ruas de Belo Horizonte, e, a possibilidade de implementar e replicar o sistema proposto em outros pontos da região e em outras municipalidades.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo desenvolver uma proposta visando implantar uma tecnologia de geração fotovoltaica em estações do BRT para alimentação de ônibus elétricos, e verificar as potenciais reduções dos impactos ambientais que podem ser obtidas a partir do emprego da energia fotovoltaica no lugar do diesel.

3. CIDADES E A TRANSFORMAÇÃO URBANA SUSTENTÁVEL

Ao longo dos anos, o *boom* da urbanização proporcionou uma rápida expansão populacional em diversas cidades em todo o globo, o que fez com que as taxas de ocupação urbana mundiais saltassem de 13% no início do século XX para mais de 50% nos dias atuais, com níveis estimados de chegar a 70% até 2050 (MCCORMICK, 2013). Consequentemente, isso trouxe para essas regiões urbanizadas um novo cenário de desafios econômicos, sociais e ambientais, criados por problemas com segregação e tensões sociais, congestionamento, poluição atmosférica e um aproveitamento ineficiente de energia e materiais. Hoje, aproximadamente 70% das emissões globais de CO₂ relacionados à produção e consumo de energia estão diretamente associadas ao que acontece dentro das áreas urbanas, o que as tornam peças chaves para o desenvolvimento sustentável e para as mudanças climáticas (NEIJ, 2015; MCCORMICK, 2013).

Devido ao papel dominante das cidades no consumo, produção e poluição global, torna-se cada vez mais necessário pôr em prática políticas formuladas por órgãos nacionais e internacionais para mudanças infraestruturais em níveis locais, distritais e regionais (MCCORMICK, 2013). De acordo com a *World Wildlife Fund – WWF* (2012) –, dependendo da maneira como as infraestruturas urbanas forem planejadas e geridas dentro das próximas três décadas, as cidades podem se tornar tanto uma força de destruição ambiental quanto uma fonte primária de rejuvenescimento ecológico. Para atingir este último resultado, estima-se que os US\$ 350 trilhões previstos a serem gastos com infraestrutura urbana ao longo dos próximos 30 anos em todo o globo deverão ter foco em projetos de baixa ou zero emissão de carbono, especialmente nas cidades de pequeno/médio porte em grande expansão, onde os impactos poderão ser maiores (WWF, 2012). Além do mais, em razão de inúmeras frustrações observadas com as lentas ações nacionais e globais voltadas para mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável, a tendência é que tais projetos ocorram à nível local, distrital e municipal ao invés de em maior escala – em nível nacional e global – devido à habilidade que as colaborações locais têm tanto para formar visões e estratégias associadas ao conhecimento científico, quanto para iniciar ações em pequena escala (MCCORMICK, 2013).

Neste patamar, as áreas urbanas devem se mostrar atrativas e inclusivas, sustentáveis e resilientes, prósperas e inovadoras, não somente em âmbito local, mas

também servindo de modelos a nível nacional e internacional. Ao mesmo tempo, elas não são entidades isoladas, mas sim interconectadas, servindo como modelos umas às outras para mudanças em maior escala (MCCORMICK, 2013). Entidades governamentais locais de todo o mundo vêm formando diversas redes de união para redução de gases de efeito estufa e para um uso mais eficiente de água, energia e recursos (KAUTTO, 2012). Porém, é válido ressaltar que cidades diferentes tem condições diferentes para atingir o desenvolvimento sustentável, resultado das diferenças entre os principais problemas que elas enfrentam. Enquanto nos países em desenvolvimento tais problemas são mais ligados à superpopulação e infraestruturas defasadas, os países desenvolvidos sofrem mais com as crescentes tensões sociais e segregação, produção de resíduos sólidos e consumo ineficiente de energia e recursos (MCCORMICK, 2013). Tais problemas não são necessariamente resultado do processo de urbanização, mas também podem ser oriundos de uma má governança e planejamento das cidades (RODE; BURDETT, 2011).

Dois conceitos que se misturam ao se tratar de cidades sustentáveis são os de “desenvolvimento urbano sustentável” e o de “transformação urbana sustentável”. Segundo McCormick (2013), enquanto o primeiro foca na integração econômica, social e ambiental visando o bem-estar da população sem comprometer o meio ambiente, o segundo enfatiza os processos de mudanças estruturais das cidades a serem realizados para direcioná-las à sustentabilidade. A transformação urbana sustentável possui duas vertentes básicas: a dos motores de mudanças radicais – que englobam “governança e planejamento”, “inovação e competitividade” e “estilo de vida e consumo” – e o das estruturas sustentáveis multidimensionais – que incluem “gestão de recursos e adequação climática”, “transporte e acessibilidade”, “edificações” e “ambiente e espaço público”. A proposta do presente trabalho está diretamente relacionada a três destes enfoques, que serão aprofundados a seguir: “inovação e competitividade”, “transporte e acessibilidade” e “edificações”.

3.1. Inovação e competitividade

Um dos grandes desafios das cidades é como conciliar seu crescimento econômico à proteção e recuperação de seu entorno ambiental. Deste modo, o desenvolvimento e uso de tecnologias limpas passa a ter grande importância no cenário do desenvolvimento sustentável, em especial no que diz respeito ao aumento da competitividade dos centros urbanos na economia mundial. McCormick (2013)

explicita bem a importância da inovação tecnológica e competitividade para se alcançar a transformação urbana sustentável:

O desenvolvimento econômico urbano sustentável é uma importante área de pesquisa na qual é necessário um enfoque em como encorajar relações simbióticas entre as indústrias, governos e universidade para assegurar um gerenciamento sustentável dos capitais humano, ecológico e econômico e tornar os sistemas urbanos ecoeficientes. (MCCORMICK, 2013, p. 7).

Assim, percebe-se que a colaboração entre os diversos atores presentes na sociedade é de suma importância para se garantir uma maior eficiência dos sistemas urbanos. A partir dessa integração, as cidades podem se tornar verdadeiros *living labs*, ou seja, locais que podem ser usados para desenvolver, testar e aprender a partir da inovação tecnológica e social em tempo real (VOYTENKO, 2015). Para Evans (2015), “*living labs* são um meio de juntar todos os agentes em um local específico para resolverem um problema específico”, no qual o governo, o setor produtivo, a academia e a sociedade agem em conjunto – em um modelo de hélice quádrupla – visando o desenvolvimento tecnológico, como ilustrado na Figura 1:

Figura 1 - Modelo de hélice quádrupla da inovação baseado no conhecimento



Fonte: EVANS, 2015¹.

3.2. Transporte e acessibilidade

Dentro do cenário de cidades sustentáveis, a mobilidade e acessibilidade urbanas estão ligadas a uma gama de escolhas que afetam simultaneamente a pegada ecológica e a conservação ambiental (WWF, 2012). Para se ter ideia, o setor de transportes responde por, aproximadamente, 20% das emissões globais totais de

¹ Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/275643299_Advancing_Urban_Innovation_Living_Labs_for_Sustainable_Building_and_Planning>. Acesso em set. 2016.

CO₂, ao passo que o deslocamento motorizado de pessoas dentro dos centros urbanos é responsável por 26% do total de energia consumida no mundo (BIAGUE, 2011; CARVALHO, 2011). Consequentemente, os meios de transporte são vistos como uma peça chave na busca pela sustentabilidade ecológica e melhora da qualidade de vida da população, uma vez que as cidades são capazes de alcançar ganhos significativos nestas áreas através de diferentes frentes de atuação: implementando políticas de restrição a carros em certas áreas urbanas, expandindo o transporte público, promovendo o uso de bicicletas, tornando as cidades mais centradas no bem estar do pedestre e desenvolvendo meios de transporte sustentáveis (WWF, 2012).

As iniciativas dentro do setor de mobilidade urbana são muito influenciadas pelo modo como as cidades são projetadas. Muitas das grandes cidades brasileiras, incluindo Belo Horizonte, acabaram se expandindo de maneira similar ao observado nos Estados Unidos nas décadas de 1970 e 1980: alastrando-se das áreas centrais para áreas suburbanas. Segundo Evans (2016), tal fenômeno causou uma diminuição da densidade populacional local e aumentando as distâncias entre os pontos das cidades. Consequentemente, aumentou-se a dependência do uso de automóveis para o deslocamento da população ao longo do dia em detrimento do transporte coletivo.

Ainda que as pesquisas e práticas para o transporte urbano sustentável acabem focando, em sua maioria, apenas nos problemas da poluição e da segurança, é necessário que as mesmas tenham uma abordagem mais integrada, que trate simultaneamente destas questões em conjunto com outras, como segurança energética, problemas de acessibilidade e equidade no desenvolvimento econômico, para que a implementação de sistemas sustentáveis de transporte dentro de um contexto urbano seja realizada devidamente (MCCORMICK, 2013; MEGIA-DUGAND et al., 2013).

3.3. Edificações

As edificações são responsáveis por cerca de 40% das emissões globais de dióxido de carbono nos centros urbanos, taxa essa que chega a 80% em grandes cidades, principalmente pelo uso de sistemas de aquecimento e climatização movidos à energia termelétrica em muitos países do hemisfério norte, de clima temperado e frio e cuja matriz energética ainda é, prioritariamente, calcada no uso de combustíveis fósseis (REIS, 2011; WWF, 2012).

No Brasil, cuja matriz de eletricidade é majoritariamente hidrelétrica, 42% do consumo de energia elétrica provém da demanda de edificações, sendo as residenciais responsáveis por 23% deste consumo, enquanto as comerciais e as públicas por, respectivamente, 11% e 8%. Os sistemas de ar condicionado respondem por cerca de 50% do consumo dos edifícios comerciais e públicos das capitais nacionais durante o verão, marca essa que pode chegar a 70% no caso de edifícios envidraçados (RUTHER, 2004).

Com tal cenário, muitas cidades iniciaram programas de construção sustentável ou *green building*, exigindo o emprego de medidas de eficiência energética em novas edificações e incentivando a adaptação – ou *retrofitting* – de edificações já existentes, uma vez que esta última se mostra como uma das alternativas de melhor custo x benefício no que diz respeito à redução de emissão de gases de estufa por parte das edificações (WWF, 2012). Estima-se que em 2050 a Europa alcance um cenário de eficiência energética em edificações da ordem de 50% de redução dos gastos observados em 2012 com aquecimento e ar condicionado, através de projetos de geração de energia descentralizada e próxima à fonte de consumo e do emprego de medidas de eficiência energética nas construções (GALDINO, 2014).

O grande desafio para o setor de construção e edificação é ser capaz de integrar conforto, eficiência e sustentabilidade aos seus edifícios, mantendo-os acessíveis e atrativos, de maneira a ajudar seus habitantes a mitigarem as ações de mudança climática, a utilizarem energia renovável, a reduzirem o consumo excessivo de materiais e a incorporarem princípios de reutilização em seu cotidiano (MCCORMICK, 2013; RODE et al, 2011). O sucesso desta estratégia depende, ainda, de um maior entendimento do comportamento e do consumo humano dentro do contexto do ambiente construído, assim como também da sua aplicação não somente em edifícios isolados, mas aos entornos e distritos que os integram aos sistemas de transporte e à infraestrutura urbana (MCCORMICK, 2013).

4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O Sol é considerado uma das melhores alternativas às fontes fósseis quando se fala em geração de energia, uma vez que, em aproximadamente 12 minutos, ele é capaz de enviar à Terra energia suficiente para suprir toda a demanda energética mundial diária, sendo, portanto, uma fonte de energia limpa, permanente e virtualmente inesgotável (SANTOS et al, 2012). O Brasil possui um elevado potencial solar devido à sua posição no globo terrestre, na faixa tropical e equatorial

(CRESESB, 2000). A irradiação média anual no país varia de 1.200 a 2.400 kWh/m²/ano, apresentando, assim, valores muito superiores aos de diversos países europeus que investem massivamente nesta tecnologia, como a Alemanha – entre 900 e 1.250 kWh/m²/ano – e a Espanha – entre 1.200 e 1.850 kWh/m²/ano (EPE, 2012). De tal maneira, a energia solar é, hoje, aproveitada por coletores solares para o aquecimento de água em edificações e para a geração de energia elétrica, em sistemas fotovoltaicos (SANTOS et al., 2012).

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos de células fotovoltaicas ligados em série ou paralelo – formando assim os painéis ou placas fotovoltaicas (PV) – associados a inversores eletrônicos responsáveis pela adequação da corrente produzida pelas células à demanda da rede elétrica. A geração de energia pelas células fotovoltaicas é possível graças ao chamado “efeito fotovoltaico”, descoberto em 1839 por Becquerel, que observou a capacidade de alguns materiais em produzirem corrente elétrica quando expostos à luz (ONUDI, 2014). Segundo Ruther (2004),

quando os fótons contidos na energia do sol incidem sobre um material semicondutor (e.g. silício) com determinadas características elétricas (junção elétrica p-n ou p-i-n), a energia de uma fração destes fótons pode excitar elétrons no semicondutor, que por sua vez poderão dar origem a uma corrente elétrica. (RUTHER, 2004, p. 8).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em sistemas autônomos, os quais demandam um sistema de armazenamento em baterias e sistemas complementares de produção energética, uma vez que, na maior parte das vezes, a energia produzida não corresponde à procura pontual do consumidor (PORTAL ENERGIA, 2004); e em sistemas ligados à rede, nos quais a energia produzida é injetada na rede de distribuição – que opera como um *backup* quando a demanda excede a geração – dispensando assim os bancos de bateria utilizado nos sistemas isolados e diminuindo o custo total da instalação em cerca de 30% (RUTHER, 2004).

4.1. Células fotovoltaicas: tecnologias existentes

Atualmente, as células fotovoltaicas são classificadas em 3 grandes grupos. Segundo Krebs (2012), as primeiras células fotovoltaicas, baseadas na tecnologia de silício mono e poli cristalino (m-Si e p-Si, respectivamente) e com uma junção p-n semicondutora, constituem a chamada 1ª geração de células solares, as quais apresentam poucos problemas e mostram uma ótima estabilidade intrínseca – ou seja, durante a operação. Estas necessitam de uma elevada demanda energética

para sua confecção, exigindo altas temperaturas de processamento que podem chegar 950°C durante a etapa de difusão de fósforo na lâmina de silício (GALDINO, 2014), o que acaba por aumentar a pegada ecológica desta tecnologia durante a análise de ciclo de vida da célula.

Por conta desta alta demanda energética, as pesquisas se direcionaram ao desenvolvimento de novas tecnologias que requeressem menos energia e materiais para sua confecção, dando origem, assim, à 2ª geração de células solares, que englobam todas as tecnologias de filme fino, como as células de silício amorfo (a-Si), de telureto de cádmio (CdTe) e de disseleneto de cobre-índio (CIS). Segundo Villalva (2012), “uma vantagem dos filmes finos é o seu baixo coeficiente de redução de potência com o aumento da temperatura, o que os torna mais adequados para locais com temperaturas muito elevadas”, caso típico no Brasil. Apesar da diminuição da demanda de energia em sua confecção e de se mostrarem mais versáteis que as anteriores – o que fez com que as células de filme fino pudessem rapidamente rivalizar com as de silício cristalino no mercado –, novos problemas referentes à estabilidade surgiram, o que acabou por torna-las menos eficazes quando comparadas às de 1ª geração (KREBS, 2012).

Com o passar dos anos, as células de 3ª geração começaram a surgir, mostrando-se bem diferente das anteriores por englobarem células tandem/multi-junção e uma maior diversidade de materiais para confecção, como, por exemplo, os polímeros orgânicos na confecção das placas fotovoltaicas orgânicas (OPVs). Elas são similares fisicamente às de 2ª geração, sendo também consideradas células de filme fino, porém se diferindo destas por serem constituídas por materiais orgânicos. Outro tipo de célula que se insere na 3ª geração são as células híbridas orgânica/inorgânica, como as células solares sensibilizadas por corante (DSSC). Em termos gerais, a 3ª geração resolve o problema da complexidade de fabricação, podendo ser fabricadas com equipamentos mais modestos e razoavelmente eficientes (KREBS, 2012). Outra vantagem está na temperatura de confecção das células, muito inferior ao das gerações anteriores, o que diminui consideravelmente a pegada de carbono das células orgânicas quando comparadas às tecnologias de gerações anteriores, conforme os valores apresentados por Roes (2009) da demanda energética por parte das OPVs e das DSSC:

Tabela 1 - Demanda de energia não-renovável, pegada de carbono e tempo de payback de uma célula fotovoltaica polimérica flexível comparada a outras tecnologias fotovoltaicas

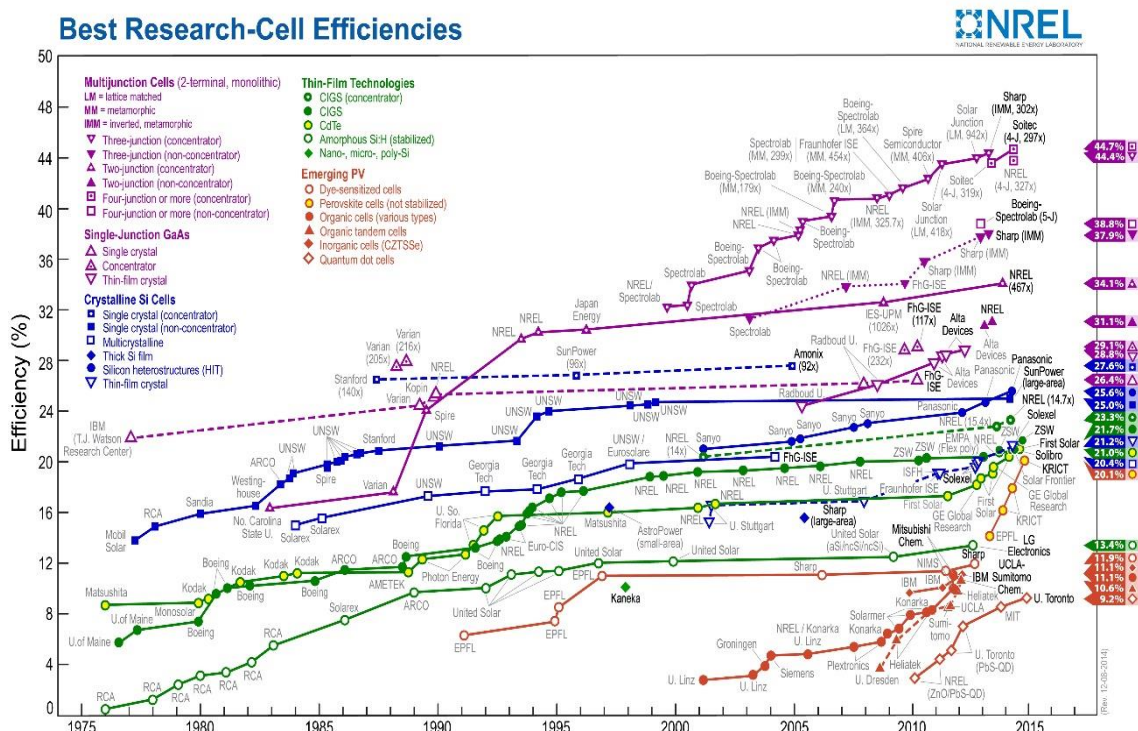
	OPV	m-Si	Filme fino			
			CdTe	CIS	a-Si	DSSC
Demanda de energia não-renovável (MJ/Wp)	2,4	24,9	9,5	34,6	17,1	5,8
Pegada de carbono (g Co₂-eq/Wp)	132	1293	542	2231	993	255
Tempo de payback (anos)	0,19	1,95	0,75	2,71	1,34	0,45

Fonte: ROES et al., 2009, p. 384.

O grande desafio da 3ª geração ainda reside em seus baixos valores de eficiência, principalmente na produção em grande escala. Enquanto células orgânicas em escala laboratorial já atingem valores de eficiência na casa de 11% (RAYNERGY TEK, 2016), aquelas produzidas para aplicação em sistemas fotovoltaicos ainda atingem valores ínfimos, da ordem de 5% de eficiência. O fato de ser uma tecnologia relativamente nova torna-a igualmente cara, fazendo com que o sistema atinja valores entre R\$ 1.000 à R\$ 1.800 por m² instalado (SUNEW, 2016), o que faria com que o Watt-pico (Wp) instalado de um sistema OPV custasse uma média de R\$ 28,00 enquanto os sistemas que utilizam tecnologias à base de silício operam com valores da ordem de R\$ 7 por Wp instalado (SANTOS, 2012).

A Figura 2, a seguir, mostra o atual estado de arte das células fotovoltaicas no que diz respeito à eficiência, desde 1976 até os dias atuais, em escala laboratorial. Os testes são padronizados e os resultados confirmados por laboratórios de testes reconhecidos e independentes, como o *National Center for Photovoltaics* (NCPV) do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e o *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* (AIST), ambos nos Estados Unidos, ou o *Fraunhofer-Gesellschaft*, na Alemanha:

Figura 2 - Resultados dos testes de recordes de eficiência energética



Fonte: NREL, 2016²

Já a Tabela 2 apresenta um comparativo entre as eficiências das tecnologias de primeira, segunda e terceira geração, comparando a eficiência em laboratório com a eficiência em escala de produção comercial:

Tabela 2 - Eficiência dos diferentes tipos de células fotovoltaicas

Material	Eficiência em laboratório	Eficiência em produção	Eficiência em produção em série
m-Si	24,7%	18%	14%
p-Si	19,8%	15%	13%
a-Si	13%	10,5%	7,5%
CIS/CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%
OPV	11,5%	-	-
Peroviskita	22,1%	-	-
DSSC	11,9%	-	-

Fonte: O autor (2016), com base em SOUZA, (2016) e NREL (2016).

²Disponível em: <http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg>

4.2. Geração distribuída: sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são aqueles caracterizados pela ligação direta da energia produzida na rede elétrica convencional, dispensando o uso de acumuladores, englobando sistemas cuja potência instalada varia de poucos kWp – nas instalações residenciais – até alguns MWp – em sistemas de maior porte operados por empresas (GALDINO, 2014).

A geração distribuída surgiu como uma forma de se trazer as infraestruturas geradoras de energia elétrica para mais perto dos grandes centros consumidores, visando uma diminuição dos custos com linhas de transmissão e uma maior redução – ou em alguns casos até a eliminação – das perdas com transmissão e distribuição da energia nestes sistemas quando comparados com os sistemas convencionais de geração centralizada. No entanto, esse modelo de produção energética trouxe um aumento do nível de curto circuito e harmônicos na rede, juntamente com o surgimento de fluxos de carga contrários aos convencionais (SANTOS, 2012).

Em nível de escala, esses sistemas podem ser subdivididos de acordo com a potência instalada em 3 categorias em: microgeração fotovoltaica distribuída, minigeração fotovoltaica distribuída, e usinas fotovoltaicas.

4.2.1. Micro e mini geração fotovoltaica

As centrais geradoras de energia classificadas como de microgeração e minigeração distribuída são sistemas de pequeno ou médio porte conectados à rede de distribuição através de instalações de unidades consumidoras, diferenciando-se quanto à potência instalada. No caso de instalações fotovoltaicas, as centrais microgeradoras tem potência instalada menor que 100 kWp, capaz de gerar potência de até 75 kW, enquanto as minigeradoras variam entre 100 e 1.000 kWp instalados, produzindo potência entre 76 kW até 5 MW (ANEEL, 2012).

Um destaque a se fazer quando se trata de micro e minirredes são os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações (SFIEs). Esse tipo de instalação, realizada sobre os telhados ou sobre as fachadas, se mostra como uma solução para o problema da disponibilidade de espaço dentro do perímetro urbano. A energia gerada nestes sistemas pode ser utilizada totalmente na edificação, o que reduz as perdas com transmissão e distribuição e diminui o consumo de energia oriunda da concessionária local (GALDINO, 2014).

Este tipo de integração nos edifícios demanda uma série de componentes, entre os quais se incluem os painéis solares, inversores, diodos, fusíveis, disjuntores, cabos elétricos, terminais, caixa de conexão e sistema de proteção contra sobretensão e descargas atmosféricas, além do sistema de fixação ao envoltório, caso seja necessário. A vida útil esperada para esses arranjos fotovoltaicos – utilizando células de 1ª e 2ª geração – é de cerca de 30 anos com a correta manutenção (RUTHER, 2004). No caso das células de 3ª geração, mais especificamente as OPVs, por serem uma tecnologia ainda nova e com maior instabilidade, a vida útil se mostra significativamente menor, ao menos com células em escala laboratorial, chegando a durar cerca de 10.000 horas quando expostas às condições climáticas europeias (KREBS, 2013).

4.2.2. Usinas fotovoltaicas

A classificação de usina fotovoltaica (UFV ou USF) é dada a sistemas de grande porte, com potência da ordem de MWp, e que fornecem energia em alta tensão para distribuição ao invés de para autoconsumo (PORTAL SOLAR, 2016). Por conta disso, tais usinas se apresentam como uma opção viável em países com boas taxas anuais de insolação e que contam com uma elevada dependência dos combustíveis fósseis para a geração elétrica (GALDINO, 2014).

A maior parte das usinas fotovoltaicas são construídas diretamente sobre o solo, podendo ser tanto fixas quanto com sistema de rastreamento da posição do Sol, o que aumenta a eficiência do sistema por permitir que os painéis estejam sempre na angulação mais favorável para a incidência solar. A maior usina solar do mundo encontra-se na Califórnia, Estados Unidos, com potência instalada de 579 MWp em uma área de deserto de 13 km² (PORTAL SOLAR, 2016).

No Brasil, a primeira UFV implantada está localizada em Tauá/CE, e conta com 4680 módulos de p-Si de 215 Wp e 9 inversores de 100 kWp, totalizando uma potência instalada de 1,0 MWp e uma geração média mensal de 135,10 MWh/mês (GALDINO, 2014).

Em Belo Horizonte, tem-se o exemplo recente da USF Mineirão, uma usina fotovoltaica com potência instalada de 1,42 MWp – o equivalente ao consumo médio de cerca de 900 residências. O projeto, de custo aproximado de R\$ 10 milhões, conta com 5910 módulos de silício policristalino (p-Si) de 240 Wp e cobre uma área de 11.500 m² das 16.424 m² da cobertura do estádio Mineirão, o que permite uma capacidade de geração de 1.610 MWh/ano, energia suficiente para abastecer cerca de

1200 residências de médio porte durante o ano (PORTO, 2014). O projeto evita, ainda, a emissão de cerca de 155,91 toneladas de CO₂ por ano quando comparada à um sistema termelétrico de igual potência (MARTIFER SOLAR, 2016, p. 62).

5. MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL

A ideia de sustentabilidade no patamar da mobilidade urbana está ligada ao conjunto de políticas públicas de deslocamentos de pessoas e bens que promovam o uso de meios de transporte que não comprometam o meio ambiente, evitem a degradação da área urbana e não prejudiquem o próprio transporte, baseado no conceito de acesso amplo e democrático ao espaço urbano (BIAGUE, 2011). Iniciativas tais como a criação de ciclovias, o desenvolvimento de novas tecnologias mais ecoeficientes na área de transporte, em associação com uma maior integração social no que tange aos problemas de acessibilidade ao sistema público de transporte são vistos como ferramentas importantes na busca pela promoção do conceito de economia sustentável nos centros urbanos (NEIJ, 2015; OLIVEIRA, 2010).

A integração do conceito de sustentabilidade dentro do setor de transportes é fundamental. Em 2008, o setor foi responsável por mais da metade do uso de derivados de petróleo no mundo e por contribuir com 25% do total de emissões de CO₂ provenientes da queima desses derivados. No Brasil, os combustíveis mais utilizados ainda são a gasolina e o óleo diesel, mesmo o país sendo um dos pioneiros e o principal produtor de etanol a partir da cana-de-açúcar no mundo (REIS, 2012), devido especialmente a seguidos cenários que desencorajaram seu uso.

No final da década de 1970, o surgimento do Programa Nacional do Alcool – o Pró-Álcool – em conta do elevado custo do petróleo, mostrava-se promissor ao incentivar a produção alcooleira e o desenvolvimento de veículos movidos à etanol. Porém, com a mudança do cenário econômico nos anos 80, com queda no valor do petróleo e valorização do preço do açúcar, associado a problemas de tecnologia dos veículos a álcool e constante desabastecimento do combustível, o projeto foi abandonado (RIOS, 2010; GUTIERREZ, 2017).

A partir dos anos 2000, as constantes discussões sobre alternativas ao petróleo, redução de emissões, aquecimento global, juntamente com o surgimento dos motores com tecnologia *flex* possibilitaram ao etanol – uma tecnologia de baixa emissão quando comparado ao petróleo – tornar-se novamente forte no mercado nacional. Entretanto, as políticas públicas de valorização do pré-sal minaram os investimentos realizados neste combustível alternativo no Brasil, tornando os

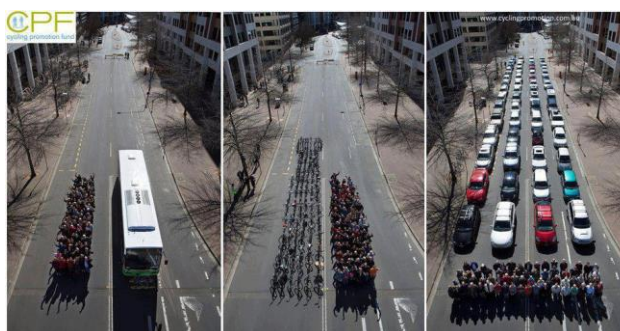
derivados de petróleo, novamente, mais atrativos aos usuários do transporte individualizado (RIOS, 2010; GUTIERREZ, 2017). Por conta de tal cenário, o desenvolvimento de infraestruturas de transporte coletivo que garantam uma redução dos níveis de emissão de gases de efeito estufa – GEE – tanto ao utilizar fontes energéticas alternativas aos derivados de petróleo, quanto ao reduzir o número de veículos individuais nas vias, se mostra como uma importante linha de ação dentro da área de mobilidade urbana sustentável.

5.1. Transporte coletivo de massa

Um dos focos mais constantes das iniciativas de mobilidade urbana sustentável nas cidades inteligentes é a transformação dos sistemas de transporte coletivo de massa, devido a fatores como seu potencial de redução do número de veículos individuais nas ruas, a capacidade de promover a integração social ao interconectar diversas regiões periféricas das áreas centrais, a possibilidade de desenvolvimento de novas tecnologias ambientalmente benéficas integrando o poder público, a academia, o setor privado e a sociedade civil, além da própria situação das frotas públicas – em muitos casos, completamente sucateadas – nas cidades (EVANS, 2015; OLIVEIRA, 2010; REIS, 2012).

A Figura 3 ilustra a otimização do espaço nas vias públicas obtida ao se adotar o transporte coletivo no lugar do individualizado, comparando quanto de espaço um grupo de 60 pessoas ocuparia em um único ônibus, em 60 bicicletas e em 60 carros:

Figura 3 - Espaço necessário em uma mesma via para três modos de deslocamento



Fonte: Cycling Promotion Fund, 2013³

³ Disponível em: <<http://urbanismodiario.blogspot.com.br/2013/06/quanto-espaco-60-pessoas-ocupam-numa-rua.html>>

Como explica Carvalho (2011), os sistemas de ônibus no Brasil, por exemplo, “respondem por mais de 60% dos deslocamentos urbanos” e “são responsáveis por apenas 7% das emissões totais de CO₂”, ao passo que os automóveis individuais, os quais participam com 30% dos deslocamentos, contribuem com 50% do total de emissões. Em termos de sustentabilidade, essa é uma das maiores razões para buscar promover a coletivização do transporte e diminuir a presença dos veículos leves nas ruas.

A planificação dos sistemas de transporte coletivo pode resultar em uma boa forma de se desenvolver a integração intermodal dentro dos corredores urbanos.

Alguns dos sistemas e tecnologias que vêm sendo adotados dentro das cidades sustentáveis ao redor do mundo, como o BRT, o VLT e os ônibus elétricos, serão apresentados ao longo deste capítulo.

5.1.1. BRT

O Transporte Rápido por Ônibus ou BRT (*Bus Rapid Transit*) pode ser definido como:

sistema de transporte por ônibus, de alta qualidade, que oferece um rápido, confortável e custo-efetivo serviço de mobilidade urbana ao disponibilizar infraestrutura segregada e prioritária, operações rápidas e frequentes, e excelência em *marketing* e serviço ao consumidor. (ITDP, 2007).

As características do BRT normalmente variam de acordo com as condições particulares de cada cidade. Porém, um de seus pontos fundamentais é a exclusividade da linha na maior parte do trecho do sistema (MEJÍA-DUGAND, 2012). Segundo o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento – ITDP (2007) – alguns dos mais bem-sucedidos sistemas BRT no mundo apresentam as seguintes características:

- Possuir uma rede integrada; oferecer estações seguras e confortáveis;
- Nivelamento entre a plataforma de embarque e os ônibus;
- Localização adequada das estações nas vias;
- Coleta da passagem antes do embarque e integração de tarifas entre rotas;
- Acesso restrito ao sistema para operadores prescritos;
- Características distintivas de *marketing*; utilizar veículos de baixa emissão;
- Centro de controle central que empregue ferramentas de localização e gerência; provisões especiais para pessoas com dificuldades físicas;
- Disponibilizar mapas de itinerário e informações de tempo de viagem.

Por ser visto como um meio para se atingir a transformação sustentável dentro da infraestrutura de transportes, o conceito do BRT é considerado uma solução viável para combater os problemas de mobilidade urbana em várias cidades (MEJÍA-DUGAND, 2012). O fato de ser um meio de transporte consideravelmente barato e flexível, juntamente com as melhoras radicais observadas em diversas localidades no que diz respeito à segurança pública, à qualidade do ar e do transporte público após a instalação do sistema, são considerados pontos cruciais para a expansão do BRT em várias cidades em desenvolvimento (WWF, 2012). Além disso, por utilizarem veículos mais eficientes energeticamente, que podem admitir uma variedade de alimentação energética – biodiesel, gás natural, eletricidade, por exemplo – ao mesmo tempo em que a concepção de seu sistema exige uma racionalização da prestação do serviço e uma otimização operacional, a adoção do sistema BRT entre as propostas de intervenção viária em uma cidade contribui consideravelmente para a diminuição de emissões na região (PBH, 2010).

5.1.2. Ônibus elétricos

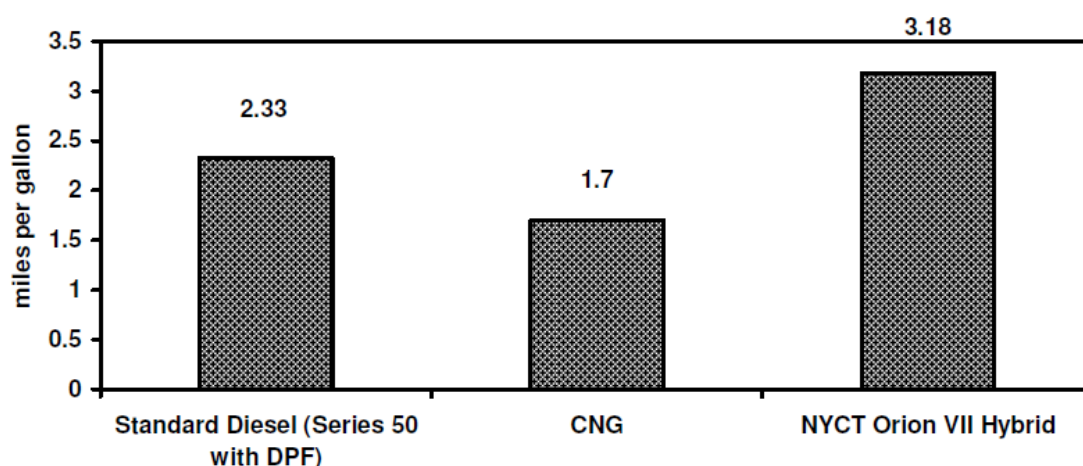
Os ônibus elétricos surgiram como uma resposta às preocupações com qualidade de ar e saúde da população nos centros urbanos e ao aumento constante do preço dos combustíveis tradicionais. Encaixam-se nesta categoria os ônibus 100% elétricos, equipados com baterias, normalmente de lítio (Li-ion) devido à sua menor dimensão e peso, os ônibus híbridos que combinam duas ou mais fontes de energia. Os sistemas híbridos podem associar motores a diesel – menor dimensionado no caso – a motores elétricos com baterias, que atuam neste caso como fonte energética complementar (EESI, 2016; WHITEMAN, 2015).

Os modelos mais antigos, como os bondes elétricos, que se locomoviam sobre trilhos, e os primeiros trólebus, surgidos no início do século XX, apresentavam conexão às linhas elétricas a partir de ganchos pantográficos. Por conta da rigidez de seu trajeto, custos infraestruturais para sua implementação e operação, e dos próprios problemas no fluxo de trânsito causados, essas tecnologias foram abandonadas no Brasil em meados dos anos 70 e 80, sendo retomadas posteriormente em sistemas muito mais avançados, como o VLT e veículos que permitem maior flexibilidade e mobilidade nas vias, com o desenvolvimento dos trólebus modernos (GUTIERREZ, 2017). Estes serão explorados nos itens a seguir.

Quando comparados aos ônibus diesel tradicionais, os híbridos diesel-elétricos mostram vantagens como consumirem menos energia e produzirem

significativamente menos emissões de poluentes, serem bem mais silenciosos e demandarem menores custos com manutenção. Outro ponto positivo é o aumento da eficiência do conjunto motor, o que diminui o consumo de combustível, quando comparado aos modelos convencionais, como pode ser visto na Figura 4. O combustível representa uma despesa considerável para as frotas urbanas, podendo chegar a aproximadamente 3% dos custos operacionais do sistema (EESI, 2016).

Figura 4 – Economia média de combustível por tecnologia de ônibus



FONTE: EESI, 2016, p. 4.

Apesar de a tecnologia ainda enfrentar algumas barreiras, principalmente no que tange o preço de custo dos veículos quando comparados aos ônibus diesel tradicionais, tal questão pode ser contornada através de incentivos governamentais ou programas de subvenção voltados para fontes alternativas de combustível (EESI, 2016). Outra questão é a vida útil das baterias Li-ion, cuja capacidade diminui por conta do processo de envelhecimento, diretamente relacionado ao tempo e à frequência de uso e recarga. Estima-se que, no final da sua vida útil, a sua capacidade é da ordem de 80% da inicial, podendo ocorrer também que a resistência interna da bateria dobre (ROGGE, 2015).

A Volvo desenvolveu em 2015, na Suécia, um modelo híbrido elétrico-diesel com tecnologia *plug-in*, o que permite recargas rápidas nos pontos de embarque através de um conector preso a um poste e ligado a um adaptador no teto do ônibus. Tal veículo é capaz de rodar 70% do tempo no modo elétrico, usando apenas a energia das baterias, e os 30% restantes no modo híbrido, a diesel, o que permite uma

redução do consumo de combustível e de emissão de CO₂ da ordem de 70% quando comparado ao ônibus diesel convencional. (VASCONCELOS, 2015).

Já no cenário dos ônibus 100% elétricos a bateria, o Brasil iniciou sua participação em 2013 com o E-Bus, ônibus de 18 m de comprimento e capacidade para 150 passageiros desenvolvido pela Eletra e em operação em São Paulo. Ele utiliza um sistema de baterias de lítio capaz de lhe garantir autonomia de 200 km quando totalmente carregado – carga esta que demanda, em média, três horas – e de receber recargas rápidas de 5 minutos durante o período de operação, que lhe proporcionam autonomia adicional de mais 11 km por recarga (ELETRA, 2016). Em Belo Horizonte, a adoção recente dos veículos 100% elétricos ainda se dá em fase de testes em algumas linhas convencionais e suplementares ao longo da cidade, com veículos da montadora chinesa Build Your Dreams (BYD) cuja autonomia pode chegar a 250 km após recargas completas de duas a três horas (PARANAIBA, 2015; 2016).

Além dessas, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, como é o caso dos ônibus elétrico-solares, apresentados a seguir.

5.1.2.1. Ônibus elétrico-solar

Uma categoria especial dos ônibus híbridos é a dos ônibus elétrico-solares, a qual apresenta um sistema fotovoltaico complementar ao sistema principal de motor elétrico. A utilização de módulos FV hoje tem duas finalidades: em sistemas menores, serve para alimentar sistemas auxiliares, como o de iluminação ou ar condicionado; nos de maior capacidade, serve para aumentar a autonomia do veículo entre recargas (WHITEMAN, 2015).

Alguns exemplos vêm sendo observados ao longo do globo e vêm retornando bons resultados. Por exemplo, o ônibus elétrico Kayoola, primeiro protótipo africano desenvolvido em Uganda, foi capaz de ter um aumento de 12km na autonomia, chegando a uma velocidade máxima de 100km/h e a um total de 92km de autonomia (MUGERWA, 2016).

O australiano Tindo, primeiro ônibus solar do mundo, é um veículo de 27 lugares que consegue, através de um banco de baterias de cloreto de sódio-níquel (Na-NiCl₂), uma autonomia total de 200 km em condições urbanas típicas com uma velocidade média de 76km/h e uma capacidade de recarga de 1km por minuto (ADELAIDE CITY COUNCIL, 2014).

A BYD é responsável pelos ônibus híbridos elétrico-solares – ou seja, com painéis fotovoltaicos instalados sobre a carroceria para auxiliar a demanda energética

do banco de baterias – de dois andares hoje utilizados em Londres, os quais possuem autonomia de 190 milhas (cerca de 305km) e são completamente recarregados em 4 horas. Estes veículos são hoje vistos como peça fundamental para que a cidade atinja o patamar de 80% de redução das emissões de CO₂ até 2050 (ZARIPOVA, 2016).

Um dos pontos de evolução da tecnologia no futuro próximo pode ser a substituição das placas FV de filme fino hoje utilizadas – nos casos observados, de silício amorfo com eficiência em torno de 5% – por OPVs, que apresentam níveis de eficiência e leveza similares, mas sendo muito menos impactante ao meio ambiente por dispensar o uso do silício em sua confecção e muito mais versáteis quanto à aplicação, podendo ser impressas diretamente em plástico ou vidro (MADSEN, 2016). Essa mudança poderia tornar os ônibus solares ainda mais sustentáveis ao analisar-se o ciclo de vida do sistema.

5.1.2.2. *Capabus*

Uma tecnologia ainda não difundida nos sistemas BRT devido ao pouco tempo de emprego em escala comercial é a do *capabus*, ônibus elétricos equipados com um sistema de supercapacitores ou ultracapacitores em conjunto com a bateria. Isso permite um aumento do alcance operacional do veículo e, conseqüentemente sua eficiência, além de permitir a realização de recargas extremamente rápidas nos terminais – em alguns modelos, essa recarga completa dura até 5 minutos – e em subestações que podem ser instaladas nos pontos de embarque ao longo do trajeto (ROGGE, 2015; SINAUTEC, 2016). Alguns modelos alcançam boas marcas de autonomia, como é o caso do *Higer Ucap* implementado na Servia em 2016, que pode rodar por até 18 km após uma recarga completa de 5 minutos, e com um consumo abaixo de 1 kWh/km, o que representa uma redução de 13 ton de CO₂ anual na atmosfera (CHINA BUSES, 2016; HIGER, 2016).

Os capacitores, componentes acumuladores de energia elétrica, se diferenciam das baterias convencionais por armazenarem energia elétrica ao invés de energia química, como ocorre nas baterias, e devido a sua capacidade de carga e descarga rápidas, o que permite que suas recargas sejam realizadas com maior rapidez sem que isso afete sua vida útil, e ainda à sua menor capacidade de armazenamento, o que faz com que sejam necessárias um maior número de cargas durante um mesmo espaço de tempo quando comparados às baterias de níquel-cádmio (NiCd) e Li-ion (SILVA, 2012). Uma diferença crucial do *capabus* para os demais ônibus elétricos é que este não fica sem eletricidade repentinamente, uma vez

que, quando o banco de ultracapacitores se aproxima de seu limite, diminui a sua potência na liberação da carga, possibilitando ao veículo chegar até uma estação de recarga. Esta diferença está na forma não-linear com que um banco de supercapacitores é recarregado, ou seja, ela ocorre mais rapidamente quando o supercapacitor apresenta uma baixa carga (ex: 30%) do que quando tem uma alta carga (ex: 98%). O inverso ocorre na descarga. (SINAUTEC, 2016).

Esse tipo de tecnologia pode tanto ser empregada em ônibus elétricos autônomos quanto em trólebus que necessitem autonomia da rede em algum trecho onde não haja instalação da rede alimentadora. Neste caso, a recarga pode ser realizada durante o trajeto pela própria rede ou nas estações de embarque, através de uma pequena subestação retificadora, conectadas eletricamente pelo sistema de tração do veículo e que recarregam o supercapacitor em cerca de 30 segundos (SILVA, 2012).

Outra possibilidade que vêm sendo desenvolvida é a de estações de recarga por indução eletromagnética, o que dispensa a necessidade de cabos para a recarga, mantendo ainda assim a rapidez nas recargas, com valores já observados de recargas de 10 segundos em testes realizados na China, dispondo energia suficiente para garantir 5 km de autonomia para os *capabuses* (HOWE, 2015). Esses resultados, inclusive, superam os já observados no projeto TOSA – *Trolleybus Optimisation Système Alimentation* – que, também utilizando um sistema de recarga por indução, alcançou valores de carga parcial de um banco de 14 baterias de titanato de lítio (LTO) – com capacidade total de 38 kWh – em 15 segundos (TOSA, 2013).

5.1.3. Trólebus moderno

Os trólebus modernos são uma variedade de ônibus elétrico conectado diretamente à rede elétrica suspensa por meio de hastes – *trolley pole* – instaladas sobre a carroceria, em uma estrutura elétrica semelhante à encontrada nos bondes tradicionais (AMBIENTALTRANS, 2016).

Quando comparado a híbridos diesel-elétricos, a nova tecnologia trólebus apresenta maior potência nas subidas (AMBIENTALTRANS, 2016; LOBO, 2014), o que o torna uma excelente opção para regiões com elevação de terreno. Seu principal destaque, claro, está no fato de ser um veículo tradicionalmente 100% elétrico com zero de emissões, o que garante diversos benefícios em sua implementação, dentre elas e redução da pegada de carbono local no setor de transportes. Como relata Lobo

(2015a) em reportagem sobre o sistema trólebus atualmente em operação em São Paulo:

Sem expelir gases nocivos na atmosfera por serem movidos a energia elétrica, [...] são mais silenciosos, contribuindo para a redução de um outro tipo de poluição: a sonora. Os veículos duram mais que os ônibus comuns por apresentarem menores índices de trepidação. Os motores elétricos possuem alto índice de eficiência energética, confiabilidade e durabilidade. No ABC, os trólebus pouparam 4,3 milhões de litros de diesel em 2013. Já em São Paulo, estes veículos evitaram que fossem lançadas no ar 13 mil toneladas de CO₂ neste mesmo ano. Além disso, os ônibus elétricos pouparam 5,3 milhões de litros de diesel. (LOBO, 2015a).

Embora considerada uma tecnologia silenciosa e limpa, uma das maiores críticas aos trólebus é a interferência visual causada por sua rede aérea, especialmente quando a mesma passa por centros históricos, o que pode ser contornado com a utilização de veículos híbridos com sistema de tração autônoma – os chamados trólebus bimodal ou *dual-bus* – nestas áreas, ou com a instalação de postes arquitetônicos e cabos de aço ornamentais com design harmônico (ITDP, 2014). Outras críticas, cruciais inclusive para a desativação de parte do sistema em São Paulo no início dos anos 2000, residem na possibilidade de queda de energia durante a operação, bem como o seu elevado custo de manutenção e operação quando comparado ao sistema diesel (ITDP, 2014). Segundo Lobo (2014), “em uma análise crua, os trólebus é sem sombra de dúvida mais caro que os veículos convencionais por depender da rede elétrica, que é vital para o ônibus elétrico e que custa cerca de U\$ 1,1 milhão por km”. Além disso, apresenta baixa flexibilidade devido a sua dependência da rede elétrica, o que impossibilita a ultrapassagem entre os veículos. Isso, no entanto, pode novamente ser contornado com a utilização dos *dual-bus* (LOBO, 2014), tecnologia apresentada a seguir.

5.1.3.1. *Dual-bus: trólebus híbridos com autonomia da rede*

A evolução tecnológica dentro do setor automobilístico permitiu o surgimento nos últimos anos de uma variação dos trólebus que soluciona o problema da limitação espacial do veículo nas vias. O *dual-bus* é um veículo híbrido que conta com um sistema auxiliar para suprir a demanda energética do trólebus em locais sem a presença de rede eletrificada, o que garante uma maior flexibilidade aos mesmos em trechos que, por conta de irregularidades no pavimento e falta de corredores exclusivos, há constantes quedas dos pantógrafos (BAZANI, 2011), aumentando, portanto, o alcance do sistema dentro da malha urbana.

O conceito é similar ao dos ônibus híbridos tradicionais. A diferença está apenas no fato da fonte principal de energia ser a rede eletrificada, o que caracteriza o veículo como um trólebus. O sistema auxiliar pode tanto ser um motor a diesel de pequeno/médio porte, como visto na linha de trólebus em Castellón, na Espanha (HOLTKAMP, 2009), um conjunto de baterias ou supercapacitores recarregáveis durante o trecho eletrificado, como os veículos utilizados em Novosibirsk, Rússia e Gdynia, Polônia – que utilizam baterias Li-ion que lhes proporciona autonomia da rede de aproximadamente 15 km (LIOTECH, 2016; RUSANEN, 2015) –, ou até mesmo por uma combinação de dois sistemas, como visto em São Paulo, com o veículo lançado pela Eletra em conjunto com a Mercedes-Benz, que possui tanto um motor alimentado por diesel ou biodiesel quanto um banco de baterias que é recarregado durante a frenagem no trecho eletrificado. (ELETRA BUS, 2015; LOBO, 2015b).

5.1.4. VLT

O VLT, sigla para o termo Veículo Leve sobre Trilhos, é uma modernização dos tradicionais bondes, utilizando veículos usualmente elétricos, que apresentam piso baixo e prioridade viária e são mais leves que os metrô e trens ferroviários (NTU, 2009). Possui uma grande versatilidade infraestrutural, podendo ser instalado em ruas, estradas, trilhos de trem abandonados ou em operação, calçadas, em estruturas aéreas ou subterrâneas ou até mesmo em canais drenados, além de comportar veículos únicos ou articulados (BOORSE, 2000).

Empregado em grande escala na Europa, apresenta diversos pontos atrativos para sua implementação: leveza, o que garante menor consumo energético e desgaste dos trilhos; pisos baixos, que possibilitam maior acessibilidade aos portadores de necessidades físicas; bom desempenho operacional tanto em vias exclusivas quanto em meio ao tráfego rodoviário; menor emissão de poluentes e geração de ruídos; e elevada capacidade para transportar passageiros quando comparado a outros modais de superfície, podendo garantir uma capacidade entre 15 e 30 mil passageiros sentados por hora (RMTC, 2012).

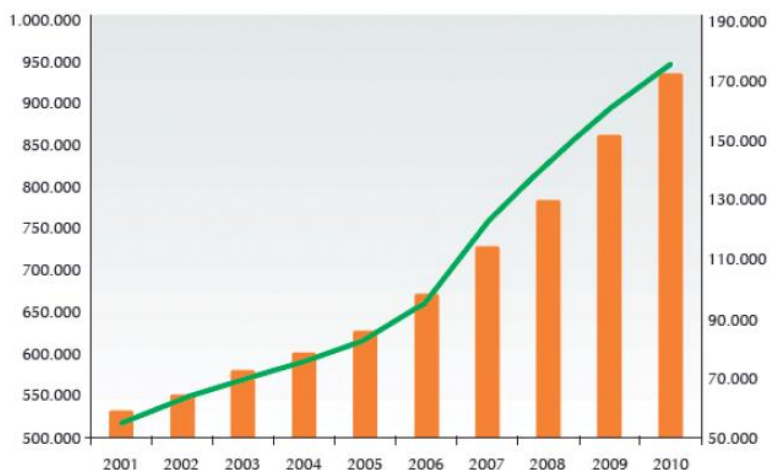
Em contrapartida, em casos de implementação do sistema em meio ao tráfego rodoviário, há de se ter precauções para evitar a ocorrência de acidentes. Outro ponto negativo deste tipo de integração é a limitação da velocidade do veículo, que deve respeitar os limites da via em que o trilho eletrificado esteja instalado, o que pode tornar o VLT um sistema mais lento quando comparado a outros sistemas de transporte em massa de alta capacidade, como o metroviário. A segregação dos

trilhos do restante da via contorna o problema da velocidade controlada, porém torna necessária a instalação de infraestrutura complementar para o acesso dos passageiros, como plataformas de embarque semelhante às utilizadas no BRT (BOORSE, 2010).

5.2. Mobilidade urbana em Belo Horizonte

Com a expansão da cidade ao longo das décadas, Belo Horizonte passou a enfrentar um cenário de mudanças quanto à sua matriz de transporte urbano. Em comparação à primeira metade dos anos 2000, a frota veicular local, no que tange automóveis e motocicletas particulares, vêm apresentando um crescimento vertiginoso, apresentando, nos dias atuais, valores mais de duas vezes maiores do que no início do século XXI, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Evolução da frota de automóveis e motocicletas de BH – 2001 a 2010



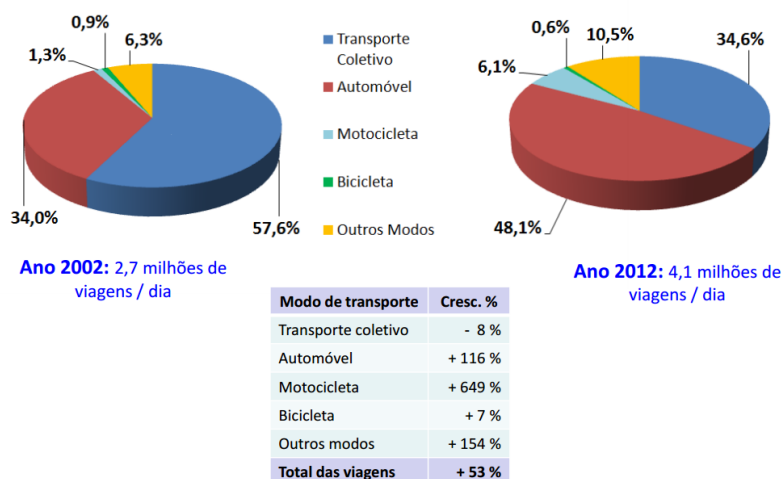
Fonte: PBH, 2012, p. 51.

É possível ver ao analisar o gráfico que a taxa de crescimento das motocicletas (em verde, com valores brutos representados na abscissa da direita) vem se mostrando mais vertiginosa que a dos automóveis (em laranja, com valores brutos representados na abscissa da esquerda) dentro do período de tempo analisado.

Tal expansão da frota particular fez com que a matriz de transporte urbano da cidade ganhasse uma nova feição, deixando de se pautar primariamente no transporte coletivo para ser dominado pelo transporte particular por automóveis e motos. Como resultado, o número de viagens diárias por passageiro também

aumentou consideravelmente, quase duplicando seus valores no período entre 2002 e 2012, como demonstrado na Figura 6 abaixo:

Figura 6 – Matriz de transporte urbano de Belo Horizonte (exceto “a pé”)



Fonte: LACERDA, 2014, p. 8⁴.

Conseqüentemente, em uma matriz majoritariamente baseada em combustíveis fósseis, as taxas de emissão de gases de efeito estufa (GEE's) aumentou de modo proporcional. Isso pode ser visto na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 – Indicadores de gases de efeito estufa em Belo Horizonte (2008 – 2013)

Indicador	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Varição
EG total (emissão total de GEE)	3.434.481	3.466.319	3.754.272	3.967.013	4.236.797	4.417.834	29%
EG rodoviário	1.751.809	1.774.383	2.056.742	2.188.525	2.333.359	2.337.834	33%
EG aéreo	398.514	473.744	605.335	767.517	813.776	799.630	101%
EG demais setores	1.284.158	1.218.192	1.092.195	1.010.972	1.089.633	1.280.369	0%
População	2.434.642	2.452.617	2.375.151	2.385.640	2.395.785	2.479.165	11%
EG total/hab.	1,41	1,41	1,58	1,66	1,77	1,78	54%
EG rodoviário/hab.	0,72	0,72	0,87	0,92	0,97	0,94	31%
EG aéreo/hab.	0,16	0,19	0,25	0,32	0,34	0,32	97%
EG demais setores/hab.	0,53	0,50	0,46	0,42	0,45	0,52	-2%
EG rodoviário em relação a EG	51,01%	51,19%	54,78%	55,17%	55,07%	52,92%	4%

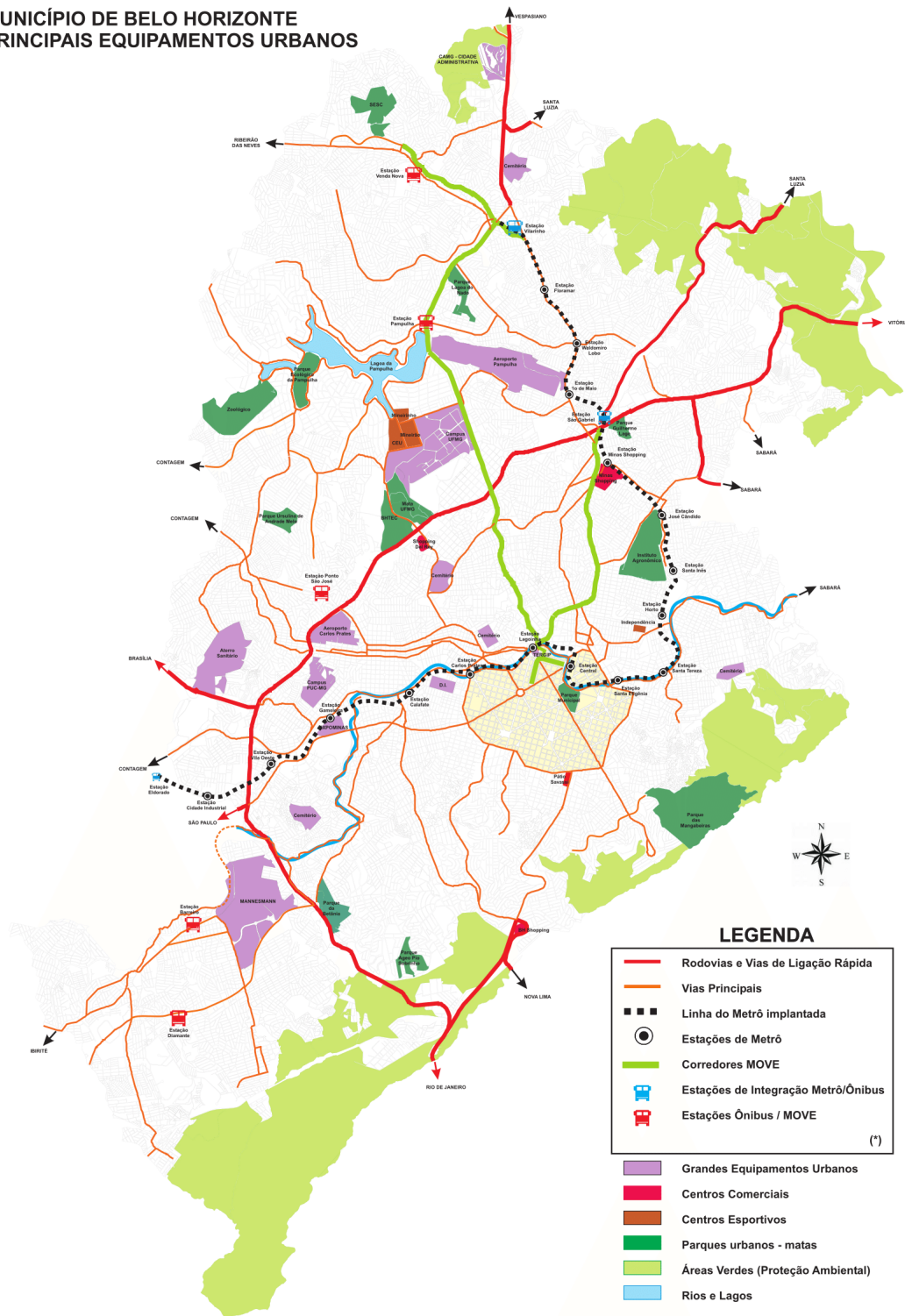
Fonte: O autor, baseado em PBH, 2013.

⁴ Disponível em: <<http://www.forumdemobilidadeurbana.com.br/palestras/Forum%20LIDE%20Mob%20BH%20mar14%20PrefeitoML.pdf>>. Acesso em out. 2016.

Nos termos do conceito de mobilidade urbana sustentável, mais especificamente no que concerne a meios de integração intermodal, Belo Horizonte ainda se encontra em um estágio inicial. Um instrumento de suma importância para as ações locais nas áreas de transporte coletivo, individual e não-motorizados a serem realizadas no futuro pela Prefeitura vem sendo o Plano de Mobilidade Urbana, o PlanMob-BH, divulgado em 2013. Os diagnósticos obtidos nas primeiras fases de seu desenvolvimento serviram como base para a implementação do sistema BRT na cidade e sua integração com o sistema metroviário já existente. Na Figura 7, é apresentado o mapa viário de Belo Horizonte, destacando-se os principais equipamentos urbanos adotados, como o sistema MOVE, representado pela linha contínua verde, e o sistema de metrô, pela linha tracejada preta:

Figura 7 – Principais equipamentos urbanos de Belo Horizonte

MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE
PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS URBANOS



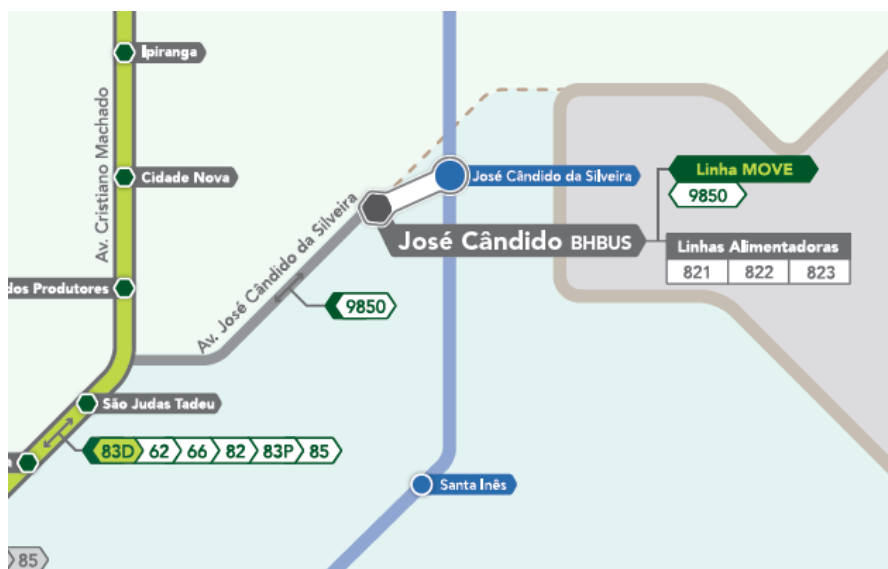
Elaboração: BHTRANS / GEMOB - Março / 2010
 (*) Atualização: Fevereiro/2016

Fonte: BHTRANS, 2016⁵

⁵ Disponível em: <http://www.pbh.gov.br/smpl/MOB_M002.pdf>. Acesso em ago. 2016.

Ao analisar-se a imagem, percebe-se que a integração entre os dois sistemas supracitados ocorre, hoje, em três pontos: na Estação Lagoinha, que possui acesso ao Terminal Rodoviário Governador Israel Pinheiro (TERGIP); na Estação São Gabriel, parte integrante do Corredor MOVE Cristiano Machado; e na Estação Vilarinho, parte integrante do Corredor MOVE Antônio Carlos. Outro ponto de integração intermodal no sistema viário de Belo Horizonte seria a Estação José Cândido da Silveira, porém o mesmo ainda não é considerado parte integrante do sistema MOVE por inadequações estruturais, que serão explanadas mais adiante neste capítulo. Dito isso, é válido ressaltar que, hoje, uma linha do MOVE, a 9850, realiza esta integração entre o MetrôBH e o Corredor Cristiano Machado, conforme pode ser visto, a seguir, na Figura 8:

Figura 8 – Acesso da linha MOVE 9850 ao Corredor Cristiano Machado



Fonte: BHTRANS, 2016⁶.

A associação do sistema BRT ao já existente sistema metroviário se apresenta como uma boa ferramenta de limitação à crescente participação dos automóveis e motocicletas particulares na matriz de transportes local, podendo interligar regiões distantes do centro urbano de modo mais eficiente e rápido.

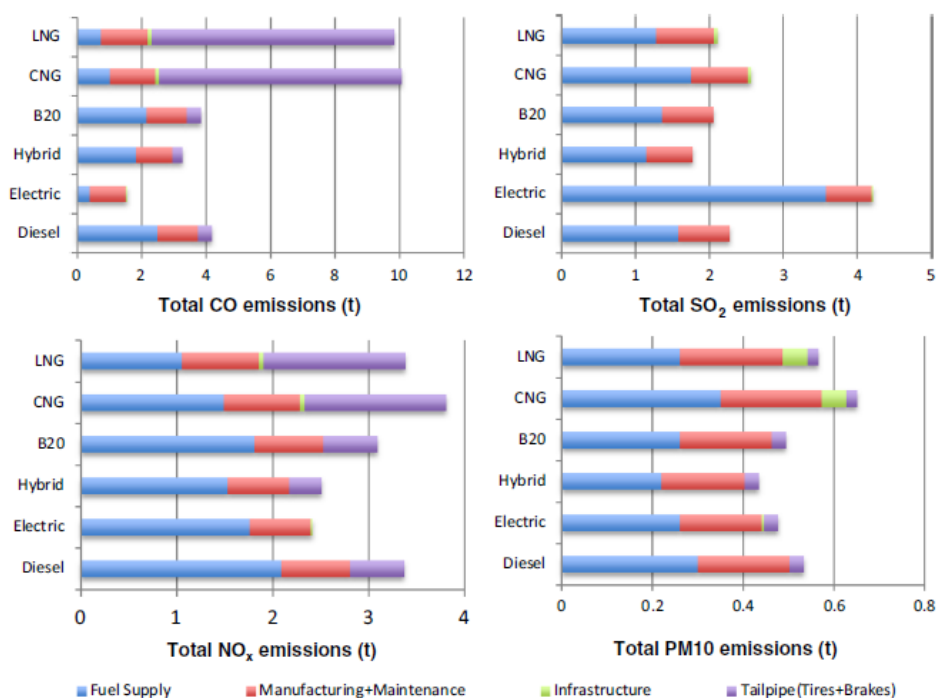
⁶ Disponível em: <http://www.bhtrans.pbh.gov.br/portal/page/portal/portalpublicodl/Temas/Onibus/MOVE/MOVE-informacoes-corredores/MAPADAREDEMOVE%20_NEW.pdf>. Acesso em ago. 2016.

Consequentemente, quanto menos veículos realizando viagens diárias, menor a taxa de emissão de gases poluentes por origem rodoviária.

Porém, vale ressaltar que, no atual estágio de implementação do sistema, o mesmo ainda utiliza veículos movidos a diesel, os quais, mesmo tendo maior condição de operarem em situações que proporcionem menores emissões de CO₂ (graças aos corredores exclusivos para ônibus no sistema BRT), ainda contribuem para o total de GEE's emitidos por via rodoviária em Belo Horizonte. Encontra-se aqui um potencial para a utilização de tecnologia visando diminuir ainda mais a emissão de GEE's, seja com veículos 100% elétricos similares aos que já vêm sendo testados em algumas linhas locais, seja com veículos híbridos elétrico-diesel.

A Figura 9, a seguir, mostra um comparativo entre diferentes soluções de combustíveis e energéticos utilizados em ônibus (diesel, híbrido diesel-elétrico, eletricidade, biodiesel 20% (B20), gás natural comprimido – CNG e gás natural liquefeito – LNG) no que diz respeito à emissão de alguns tipos de poluição e toxidade observados durante o ciclo de vida dos mesmos:

Figura 9 – Emissão de gases poluentes veiculares por tecnologia (ton)



Fonte: ERCAN, 2015, p. 1226.

Desde o final de 2015, iniciaram-se na cidade testes com ônibus 100% elétricos, oferecidos para teste pela fabricante chinesa BYD (SUAREZ, 2016) e, mais

recentemente, o atual governador de Minas Gerais, Fernando Pimentel, assinou despacho que prioriza a implementação de ônibus elétricos a serviço da Cidade Administrativa, interligando-a à Estação Vilarinho, ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves e a outros prédios públicos necessários à Administração, tais como o da Cemig, Codemig, Fapemig, BDMG e o Palácio da Liberdade, dentro do chamado “Sistema de Mobilidade de Baixo Carbono” (AGENCIA MINAS GERAIS, 2016-a). Tal fato se mostra como um passo inicial no caminho para a substituição da tecnologia atualmente empregada na frota urbana de ônibus local, não apenas dentro do sistema BRT, mas em um todo, o que contribuiria em demasia para a diminuição do total de emissões provenientes da queima do diesel.

5.2.1. MOVE

O sistema MOVE, como é conhecido o sistema BRT adotado em Belo Horizonte inaugurado em março de 2014, possui atualmente uma extensão total de 23,1 km distribuídos entre 3 grandes corredores: Corredor Antônio Carlos, Corredor Cristiano Machado e Corredor MOVE Área Central. Além dos corredores, o sistema ainda conta com 3 trechos de faixa exclusiva para ônibus, nas Avenidas Dom Pedro II, Carlos Luz e Cristiano Machado (trecho entre as Estações São Gabriel e Vilarinho). A Figura 10 apresenta o mapa da rede MOVE hoje instaurada

Segundo a BHTrans (2016), esses corredores comportam um total de 45 estações, das quais 5 são estações de integração – estações maiores nas quais se realizam as ligações entre as linhas alimentadoras dos bairros e as linhas do MOVE – e 40 estações de transferência, localizadas no centro dos corredores.

São utilizados 3 tipos de veículos no sistema, dependendo diretamente do tipo de via em que ele circula: ônibus articulados, com capacidade para 153 passageiros, nas linhas troncais (que circulam ao longo dos corredores do MOVE); ônibus padron, com capacidade para 100 passageiros, nas troncais e diametrais (que interligam bairros diferentes e tem parte do trajeto nos corredores do MOVE); e ônibus convencionais, com capacidade para 75 passageiros, nas linhas alimentadoras (que interligam os bairros às estações de integração).

5.2.1.1. Corredor MOVE Cristiano Machado

Para o presente projeto, o corredor a ser analisado é o Corredor Cristiano Machado, cuja extensão atual de 7,1 km (ITDP, 2016) engloba, conforme destacado

expansão de sua área de influência graças aos empreendimentos localizados no vetor norte da cidade, à presença do terminal São Gabriel – o qual se planeja tornar o novo Terminal Rodoviário de Belo Horizonte – e à implantação da Via 710 (BHTRANS, 2016).

Em relação às estações, cada uma das 9 estações de transferência possui entre 3 e 4 plataformas de embarque, em um total de 29 plataformas ao longo do Corredor (das quais, 26 não sofrem interferência à irradiação solar por conta de construções adjacentes), com área média de 115 m² de cobertura cada (valores obtidos com a ferramenta de cálculo de área por polígonos do Google Earth Pro). Na Tabela 4 a seguir, são informadas as distâncias aproximadas entre as estações integrantes do Corredor Cristiano Machado, obtidas com auxílio da ferramenta de cálculo de distâncias disponibilizadas pelo Google Earth Pro:

Tabela 4 - Distância entre estações no Corredor Cristiano Machado

Estação 1	Estação 2	Distância (m)
Silviano Brandão	Sagrada Família	650 m
Sagrada Família	São Judas Tadeu	350 m
São Judas Tadeu	Feira dos Produtores	750 m
Feira dos Produtores	Cidade Nova	450 m
Cidade Nova	Ipiranga	400 m
Ipiranga	União	270 m
União	Ouro Minas	450 m
Ouro Minas	Minas Shopping	750 m
Minas Shopping	São Gabriel	900 m

Fonte: O autor, 2016

A Estação São Gabriel é subdividida dentro do sistema MOVE em dois setores: o setor Leste, que integra o MOVE Metropolitano, responsável pelo atendimento aos municípios de Santa Luzia, Sabará, Caeté, Nova União, Taquaraçu de Minas e Jaboticatubas, e o setor Oeste, integrante do Corredor MOVE Cristiano Machado. Ela é a estação de integração mais carregada de todo o sistema BRT de Belo Horizonte, operando 33 linhas alimentadoras e 12 linhas troncais. Na Figura 11, é possível visualizar como se dá o acesso dos ônibus do MOVE em ambos os setores, além da integração entre o sistema e o MetroBH:

Figura 12 – Acesso à Estação Vilarinho via Cristiano Machado



Fonte: RMBH, 2016⁹

Esse trecho de aproximadamente 6 km conta com 15 pontos de parada de ônibus no sentido São Gabriel/Vilarinho (sendo 12 deles antes da Cristiano Machado se bifurcar na Av. Vilarinho) e outros 10 pontos no sentido contrário. Hoje, o acesso à Estação Vilarinho pela linha 62 é realizado através da Rua Dois Mil Trezentos e Setenta e Quatro, o que demanda uma manobra de retorno em U à 300 m do último ponto da linha na Cristiano Machado (sentido bairro), o que faz com que a distância deste ponto à Estação Vilarinho seja de, aproximadamente, 1 km.

Na Tabela 5, são apresentadas as distâncias entre os pontos de ônibus existentes no trecho descrito, nos dois sentidos. Como a proposta de intervenção também sugere a utilização da Avenida Vilarinho para o acesso dos veículos à Estação Vilarinho, a tabela mostra também a distância entre a última estação antes da Avenida Vilarinho, em frente ao número 11.010 da Av. Cristiano Machado, e a Estação Vilarinho. Para corroborar com os estudos acerca da proposta vindoura, foi acrescentada à tabela a distância entre o último ponto na Av. Cristiano Machado antes do início da Av. Vilarinho e o setor de embarque da Estação Vilarinho:

⁹ Disponível em: <<http://www.rmbh.org.br/pt-br/mapa-colaborativo>>. Acesso em ago. 2016.

Tabela 5 - Distância entre estações no Corredor Cristiano Machado

Sentido São Gabriel/Vilarinho		
Ponto 1	Ponto 2	Distância
Estação São Gabriel	Av. Cristiano Machado, 7600	650 m
Av. Cristiano Machado, 7600	Av. Cristiano Machado, 8050	600 m
Av. Cristiano Machado, 8050	Av. Cristiano Machado, 8952	450 m
Av. Cristiano Machado, 8952	Av. Cristiano Machado, 9366	550 m
Av. Cristiano Machado, 9366	Av. Cristiano Machado, 9540	300 m
Av. Cristiano Machado, 9540	Av. Cristiano Machado, 9708	350 m
Av. Cristiano Machado, 9708	Av. Cristiano Machado, 9826	300 m
Av. Cristiano Machado, 9826	Av. Cristiano Machado, 10050	500 m
Av. Cristiano Machado, 10050	Av. Cristiano Machado, 10550	300 m
Av. Cristiano Machado, 10550	Av. Cristiano Machado, 10390	300 m
Av. Cristiano Machado, 10390	Av. Cristiano Machado, 10732	550 m
Av. Cristiano Machado, 10732	Av. Cristiano Machado, 11010	250 m
<i>- Rota atual</i>		
Av. Cristiano Machado, 11010	Av. Cristiano Machado, 11338	400 m
Av. Cristiano Machado, 11338	Av. Cristiano Machado, 11586	250 m
Av. Cristiano Machado, 11586	Av. Cristiano Machado, 11936	350 m
Av. Cristiano Machado, 11936	Estação Vilarinho	1000 m
<i>- via Av. Vilarinho</i>		
Av. Cristiano Machado, 11010	Estação Vilarinho	1000 m
Sentido Vilarinho/São Gabriel		
Ponto 1	Ponto 2	Distância
Estação Vilarinho	Av. Cristiano Machado, 11336	900 m
Av. Cristiano Machado, 11336	Av. Cristiano Machado, 10657	750 m
Av. Cristiano Machado, 10657	Av. Cristiano Machado, 10527	220 m
Av. Cristiano Machado, 10527	Av. Cristiano Machado, 10241	450 m
Av. Cristiano Machado, 10241	Av. Cristiano Machado, 10163	400 m
Av. Cristiano Machado, 10163	Av. Cristiano Machado, 9685	750 m
Av. Cristiano Machado, 9685	Av. Cristiano Machado, 9467	450 m
Av. Cristiano Machado, 9467	Av. Cristiano Machado, 9207	350 m
Av. Cristiano Machado, 9207	Av. Cristiano Machado, 8953	400 m
Av. Cristiano Machado, 8953	Av. Cristiano Machado, 8721	450 m
Av. Cristiano Machado, 8721	Estação São Gabriel	1000 m

Fonte: O autor, 2016

5.2.2. Metrô

O sistema metroviário de Belo Horizonte é, hoje, composto por 25 Trens Unidade Elétricos (TUEs) de superfície, cada um composto por dois carros motores e dois carros reboques, capazes de comportar o equivalente a 12 ônibus lotados. Cada carro possui dois truques de dois eixos, sendo os truques motores equipados com dois motores de tração de potência unitária de 242 kW (CBTU, 2016). Na Tabela 6 abaixo, são apresentados alguns dados técnicos do trem elétrico:

Tabela 6 - Dados técnicos do metrô de superfície de Belo Horizonte

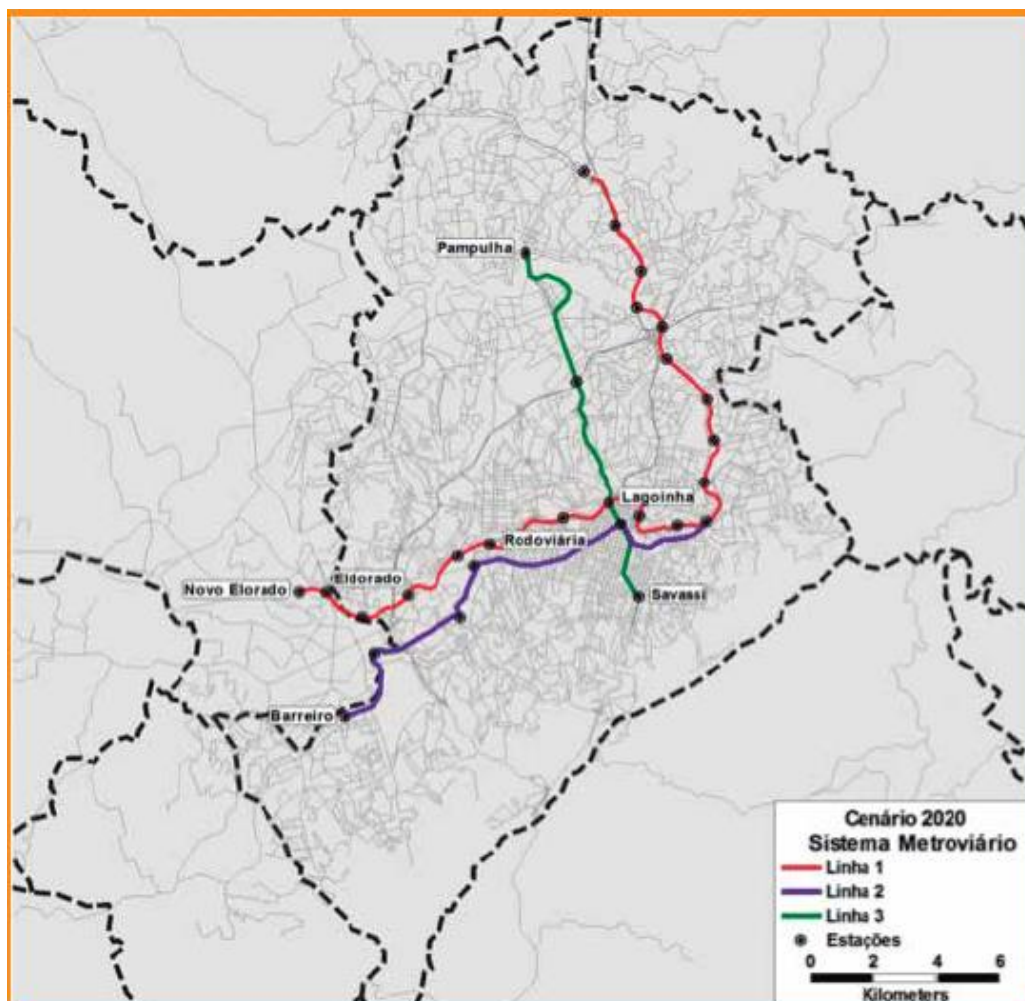
Comprimento do TUE completo entre faces de engate	91.565 mm
Largura externa máxima	2.978 mm
Altura externa máxima da cobertura ao boleto dos trilhos	3.910 mm
Altura máxima do pantógrafo ao boleto do trilho	4.600 mm
Massa do TUE (tara)	201,8 Ton
Tensão nominal	3.000 V
Bitola	1.600 mm
Desempenho unihorário	2.520 kW
Velocidade máxima de projeto	90 km/h
Velocidade máxima de serviço	80 km/h
Velocidade média comercial	46 km/h
Lotação por carro motor	
Assentados	59
Em pé	189
Total	248
Lotação por carro reboque	
Sentados	72
Em pé	198
Total	270
Lotação total por TUE	1036

Fonte: CBTU, 2016

Atualmente, o metrô conta apenas com uma linha em operação, a Linha 1, que liga Venda Nova ao bairro Água Branca, em Contagem, englobando um total de 19 estações em seu trajeto de 28,2 km e atendendo, diariamente, uma média de 220.000 usuários (CBTU, 2016). Destas, 2 são estações de integração intermodal com o MOVE (São Gabriel e Vilarinho), enquanto a Estação Minas Shopping dá a possibilidade de acesso rápido ao Corredor Cristiano Machado. Também é válido destacar as estações Primeiro de Maio, Waldomiro Lobo e Floramar, localizadas dentro do trecho da Av. Cristiano Machado entre as estações São Gabriel e Vilarinho e, portanto, relevantes para o projeto aqui apresentado.

Dentro do horizonte 2020 do PlanMob-BH, está prevista a ampliação da malha metroviária com mais duas linhas, interligando o Barreiro à Área Hospitalar e a Pampulha à Savassi, conforme pode ser visto a seguir na Figura 13:

Figura 13 – Segmentos metroviários previstos para o horizonte 2020



Fonte: PBH, 2012, p. 62.

6. PROPOSTA DE INTERVENÇÃO

A partir dos conceitos de desenvolvimento, teste e aprendizado que permeiam a utilização de novas tecnologias em prol do bem-estar social, econômico e ambiental em áreas estratégicas das cidades inteligentes utilizadas como *living labs*, juntamente com a capacidade de reprodução e expansão de escala dos resultados positivos obtidos nessas experiências em outros distritos desta mesma cidade – e até mesmo em outras –, o presente projeto não se limita apenas a uma proposta fixa que impacte tão somente uma pequena área da malha urbana durante sua vida útil.

Conforme enunciado no capítulo 2, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma proposta visando implantar uma tecnologia de geração fotovoltaica em estações do BRT, para alimentação de ônibus elétricos, e verificar as reduções dos impactos ambientais proporcionados por esta solução.

Este objetivo se traduz em apresentar uma solução à questão da mobilidade urbana – no que tange tanto a redução da matriz veicular individual nas vias quanto a porcentagem de emissão de GEEs oriundos desta matriz – que possa, em médio prazo, ser expandido para outros corredores e, quiçá, ser visto como um método inovador que venha a ser replicado em outras cidades que enfrentem os mesmos problemas citados no capítulo anterior.

Desta maneira, chegou-se à uma proposta de associação entre inovações em setores de energia e mobilidade urbana, na qual seja possível oferecer uma solução que atenda às demandas de sustentabilidade, segurança, acessibilidade e conforto ao usuário – alguns dos pilares que sustentam a aplicação do BRT – levada ao próximo nível tecnológico, o de veículos zero emissão, e que sejam integralmente alimentados por sistemas fotovoltaicos, através do sistema de compensação de energia elétrica.

6.1. Análise da área de escopo

Para a realização desta proposta, sugere-se a utilização de uma área prevista dentro do projeto de expansão do sistema MOVE, no trecho da Avenida Cristiano Machado, entre as estações São Gabriel e Vilarinho. A escolha da área está atrelada a alguns pontos:

- Baixa presença de linhas do sistema MOVE no trecho, atendido, hoje, tão somente pelas linhas 62 e 66;

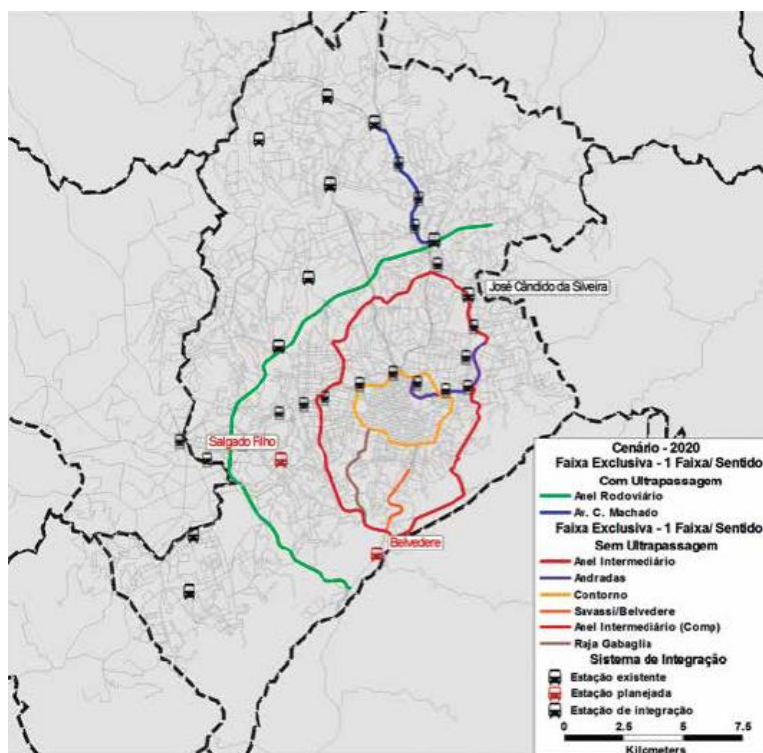
- Existência de duas coberturas de grande porte com potencial de instalação e geração fotovoltaica nas duas Estações supracitadas;
- Previsão, dentro do PlanMob-BH, de expansão da malha do MOVE, englobando o referido trecho dentro de seu Cenário 2020.

Exposta a ideia geral da proposta de projeto, nos tópicos seguintes serão apresentadas:

- Uma análise do cenário atual da área de escopo englobando a infraestrutura existente para a instalação fotovoltaica e para os veículos a serem implementados;
- As tecnologias escolhidas e as razões para suas escolhas;
- O dimensionamento do sistema, comparando diferentes tecnologias fotovoltaicas e considerando tanto a geração apenas para suprir a demanda veicular quanto o aproveitamento total de toda a área disponível para geração; e
- Os potenciais cenários de expansão futura do sistema proposto.

Para a delimitação da área de escopo, o passo inicial foi analisar as obras previstas de expansão do sistema MOVE dentro de um cenário de curto/médio prazo. Dentro do Relatório Final do Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte, lançado antes da inauguração dos 3 corredores MOVE atualmente em operação, a Prefeitura de Belo Horizonte apresentou um mapa de suas previsões de expansão do sistema até o ano 2020, conforme pode ser visualizado abaixo na Figura 14:

Figura 14 - Corredores de BRT e Terminais de Ônibus Previstos para o Horizonte 2020



Fonte: PBH, 2012, p. 64.

A partir desse planejamento previsto no relatório supracitado, no presente trabalho analisou-se dentre as opções de corredores aquele que apresentasse uma maior possibilidade de integração intermodal baseando-se nos equipamentos urbanos hoje existentes, especialmente a própria rede consolidada do MOVE.

Assim, optou-se pela escolha do trecho de parte das avenidas Cristiano Machado e Vilarinho, representado na imagem acima em azul na parte superior do mapa, que interliga ambas as Estações MOVE São Gabriel e Vilarinho. Neste cenário proposto, o acesso à Estação Vilarinho, hoje realizada pela Rua 2.374 (conforme explicado anteriormente no capítulo 4), passaria a ser feito através da Avenida Vilarinho, utilizando uma entrada existente e que atualmente encontra-se fechada, como pode ser visto na Figura 15 a seguir:

Figura 15 – Acesso previsto à Estação Vilarinho pela Av. Vilarinho



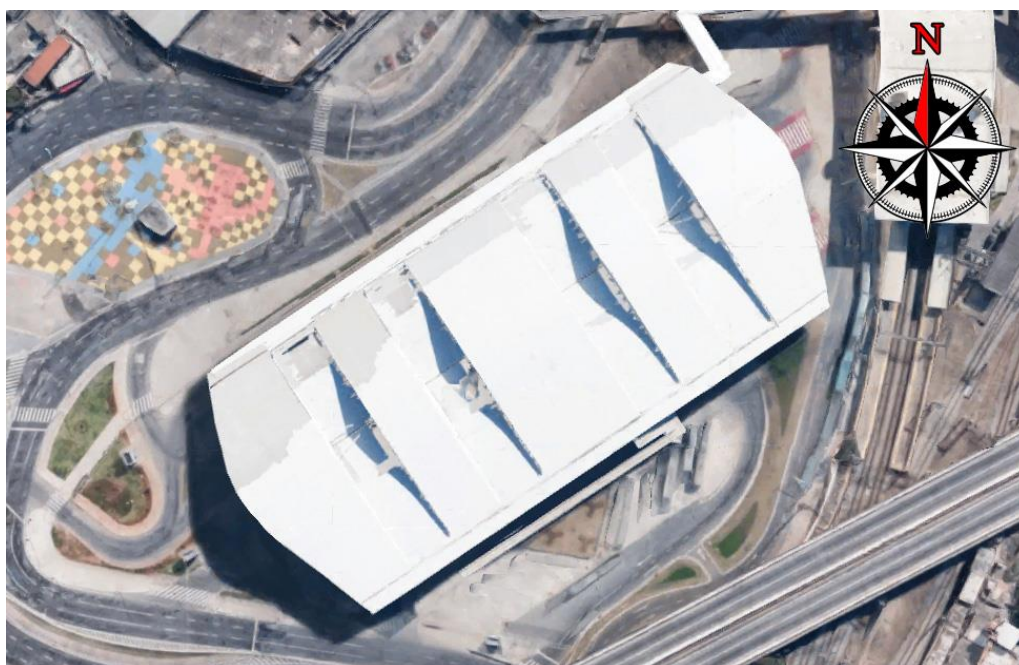
Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.

Esse trecho, que apresenta uma extensão total de cerca de 6 km, mostra grande potencial de integração intermodal ao longo do percurso, uma vez que, além das duas estações supracitadas, a mesma conta com outras 3 estações de metrô: a Primeiro de Maio, a Waldomiro Lobo e a Floramar. Considerando o MetroBH é do tipo metrô de superfície, o trecho, em maior parte de sua extensão, é composto por via de 3 pistas, dificultando a implementação de uma infraestrutura exclusiva para o MOVE como ocorre nos Corredores MOVE Cristiano Machado e Antônio Carlos sem prejudicar o tráfego dos demais veículos que por ali circulam. Tal perfil foi, inclusive, considerado dentro do planejamento do PlanMob BH para o Cenário 2020, no qual se previa a intervenção do MOVE no local a partir de utilização de faixa exclusiva com ultrapassagem. Outra limitação válida de se destacar está nas proximidades da Estação Primeiro de Maio na Av. Cristiano Machado e na Av. Vilarinho já próximo da Estação, onde há restrição de altura em 5,5 m na via por conta da existência de viadutos. Os pontos aqui citados podem ser observados no Apêndice A.

6.2. Utilização da área para instalação FV

Um ponto positivo para a escolha da área descrita é a existência de duas amplas áreas de cobertura para fins de implantação de sistemas geradores fotovoltaicos nas duas estações do MOVE ali localizadas. Com o auxílio da ferramenta de cálculo de área por polígonos do Google Earth Pro, encontrou-se que a cobertura do Setor Oeste da Estação São Gabriel é de aproximadamente 14.000 m². Porém, conforme pode ser visto a seguir na Figura 16, parte dessa cobertura sofre interferência da própria estrutura, gerando maior sombreamento durante as horas de incidência solar:

Figura 16 – Estação MOVE São Gabriel – vista superior



Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.

Assim, para fins de dimensionamento do sistema fotovoltaico, considerou-se apenas as 5 camadas superiores da cobertura da edificação, correspondentes a um total de 8.000 m² de área utilizável.

Já a Estação Vilarinho, vista a seguir na Figura 17, apresenta uma área ainda maior que a anterior, uma vez que a edificação é dividida em dois setores, um deles comportando o Shopping Estação BH, enquanto o outro o seu estacionamento. Na parte inferior dos dois setores, estão localizadas as plataformas de embarque tanto para metrô quanto para ônibus:

Figura 17 – Estação MOVE Vilarinho – vista superior



Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.

Devido a menor interferência por sombreamento gerado pela própria arquitetura predial ou por existência de equipamentos na cobertura, optou-se por utilizar a área referente ao estacionamento a céu aberto no setor sul, sobre o qual pode-se erguer uma cobertura que proteja os veículos estacionados da incidência solar ao mesmo tempo que possa gerar energia a partir de um sistema fotovoltaico nela instalado. Com o uso da mesma ferramenta anterior, chegou-se ao valor de 11.500 m² de área total de cobertura para esse setor.

É válido levar em consideração outro ponto favorável à escolha do trecho: a existência de duas garagens para ônibus nas proximidades da Avenida Cristiano Machado. A primeira delas, pertencente à Viação Itapemirim no bairro Maria Virgínia, está localizada a aproximadamente 2,5 km da Estação São Gabriel. Já a outra, pertencente à Viação Progresso, está situada no bairro Minaslândia a uma distância equivalente à anterior. Esta, inclusive, já é atualmente utilizada como garagem para os ônibus Millenium BRT articulados que circulam pelo Corredor MOVE Cristiano Machado. Ambas as garagens, no caso de se optar por um projeto de intervenção que

utilize o BRT, poderiam ser utilizadas para guardar os veículos durante seu período ocioso.

6.3. Tecnologias escolhidas

Após a avaliação dimensional e espacial da área de escopo, escolhida, o próximo passo foi levantar quais as melhores opções de transporte coletivo de massa dentre as apresentadas no item 5.1 para circularem no trecho e, posteriormente, quais as tecnologias de módulos fotovoltaicos mais aplicáveis às coberturas selecionadas.

6.3.1. Opções de mobilidade urbana

Para a área delimitada, foram analisados quatro cenários de intervenção de mobilidade urbana capazes de serem aplicadas em vias urbanas em projetos similares, sendo estes:

- a) Expansão do corredor BRT existente na Av. Cristiano Machado, construindo uma Linha Exclusiva que separe o sistema dos demais veículos, sem alteração dos modelos de ônibus utilizados;
- b) Expansão do corredor BRT existente na Av. Cristiano Machado, implementando uma Pista Exclusiva para ônibus do MOVE, sem a separação deste sistema do restante da via, sem alteração dos modelos de ônibus utilizados;
- c) Instalação de sistema VLT, com implementação de trilho eletrificado em uma pista exclusiva;
- d) Instalação de sistema trólebus, utilizando veículos híbridos com sistema auxiliar para prover autonomia em locais onde a eletrificação aérea não possa ser realizada (vide os pontos citados no item 6.1 por onde há limite de altura por existência de viadutos);
- e) Aplicação de ônibus híbridos elétricos ou 100% elétricos.

Os itens a) e b) apresentam dificuldades espaciais consideráveis. No caso da instalação da Linha Exclusiva, o melhor local para tal seria a parte central da via, tal como ocorre no Corredor Cristiano Machado antes da Estação São Gabriel, o que mantém as duas mãos da via com 4 pistas para os demais veículos. No trecho selecionado, porém, há um estreitamento da via na altura da Estação Primeiro de Maio do MetrôBH, onde o metrô de superfície desce pelo viaduto e passa a trilhar no canteiro central da Cristiano Machado até a Estação Vilarinho. Assim, uma possível

Linha Exclusiva acabaria por tomar pelo menos duas das três pistas disponíveis, devido à necessidade de espaço para também instalar terminais de embarque.

Já no caso da Pista Exclusiva, a rota proposta acaba dificultando a opção. Como a ideia é acessar a Estação Vilarinho pela Avenida Vilarinho, a pista exclusiva ideal na Av. Cristiano Machado seria na pista mais à esquerda no sentido São Gabriel – Vilarinho. Porém isso impossibilita o embarque ao longo do trecho, já que não há espaço disponível para instalação de infraestrutura pertinente. Se optar pela pista mais à direita, há como se realizar tal embarque, sendo a dificuldade para os ônibus, nesse caso, o fato de terem que dividir a pista com outros veículos individuais nos pontos de intercessão com vias de acesso adjacentes e realizar a mudança da pista mais à direita para a mais à esquerda nas proximidades da Av. Vilarinho.

O item c) sofre de problema similar ao item a). A eletrificação por trilho tornaria pelo menos duas pistas inacessíveis aos demais veículos, o que aumentaria drasticamente o cenário de engarrafamentos na região. Além disso, haveria a necessidade de disponibilizar uma área exclusivamente para o VLT ficar estacionado durante o período inoperante.

No caso do item d), a utilização de trólebus híbridos resolve um dos problemas estruturais da área de escopo: o limite de 5,5 m altura nas áreas com viadutos, o que dificulta a eletrificação aérea. Quando sem eletrificação, um sistema auxiliar à diesel ou um banco de baterias ou de supercapacitores poderia alimentar o veículo, até o mesmo retornar a uma zona com rede eletrificada. Essa autonomia permite com que os trólebus andem na pista mais à direita, possibilitando o embarque de passageiros, ao passo que possa mudar de pista no momento de acessar a Av. Vilarinho. Sua escolha demandaria também a instalação de estruturas que permitissem a reconexão do veículo à rede elétrica após passar por um trecho em que operasse autonomicamente.

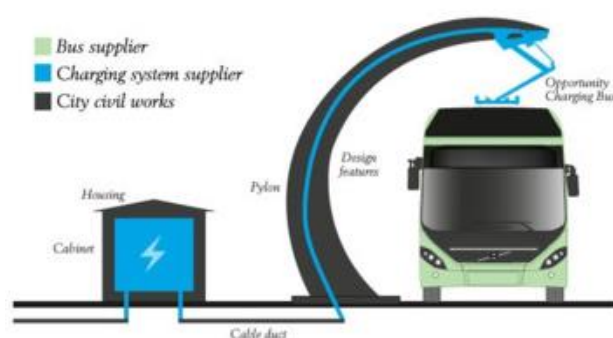
Finalmente, o item e) não mostra necessidades de intervenção infraestrutural que o restrinja a apenas trafegar por uma via, podendo fazer um deslocamento similar a b) e a d). Ainda assim, haveria a necessidade de se instalar terminais de recarga dependendo do tipo de tecnologia adotada. No caso dos híbridos diesel-elétrico e dos 100% elétricos, requerem-se terminais de recarga na garagem escolhida para o ônibus estacionar durante o período inoperante, uma vez que as Estações da área de escopo não possuem espaço disponível para um veículo ficar estacionado por longos períodos. Já para ônibus com supercapacitores, demanda-se a instalação de terminais de recarga rápida, que podem ser realizadas tanto nos pontos

de embarque ao longo da via quanto nas próprias Estações, dado que as recargas completas dos bancos de supercapacitores, dependendo do modelo de ônibus, atingem valores da ordem de 5 minutos. A existência de um número considerável de pontos de ônibus convencionais na extensão da Av. Cristiano Machado no trecho analisado torna atraente, por exemplo, o emprego de ônibus com supercapacitores, sendo necessária a adequação desses pontos para a instalação das centrais de recarga rápida do supercapacitor.

Outro ponto a se considerar na análise para filtrar as opções ainda mais é a emissão de GEE's ocasionada por algumas dessas tecnologias durante a operação. Neste ponto, os veículos zero emissão como os trólebus com sistema auxiliar elétrico e os ônibus 100% elétricos acabam por superar aqueles que utilizam sistema diesel auxiliar (híbridos diesel-elétrico) ou integralmente diesel (modelos hoje utilizados no MOVE).

Entre os trólebus híbridos elétricos e os ônibus elétricos, um aspecto decisório foi a questão visual atrelada às duas tecnologias. Os trólebus demandam eletrificação suspensa, o que poderia causar um maior impacto visual negativo nos trechos onde a rede estivesse presente. Apesar de não parecer um aspecto tão significativo, dentro do contexto de cidades inteligentes há uma busca cada vez mais constante pela eliminação das fiações elétricas aparentes, optando-se pelas instalações subterrâneas. No caso dos ônibus supercapacitores, por exemplo, a estação de recarga rápida poderia contar com dutos subterrâneos, como visto na Figura 18:

Figura 18 – Esquema de sistema de recarga rápida em ponto de ônibus



Fonte: VOLVO, 2016¹⁰.

¹⁰ Disponível em: <http://electricitybrid.volvobuses.com/pdf/Opportunity_Charging_System_FS_EN.pdf>. Acesso em out. 2016.

Outra opção é essas estações serem instaladas no próprio solo, fornecendo energia por indução magnética, como no exemplo a seguir na Figura 19:

Figura 19 – Esquema de sistema de recarga rápida no solo por indução magnética



Fonte: ARUP, 2014¹¹.

Finalmente, as recentes experiências com ônibus 100% elétricos em testes realizados em algumas linhas locais e suplementares em Belo Horizonte, juntamente com a implementação do recém lançado projeto “Sistema de Mobilidade de Baixo Carbono” na Cidade Administrativa pelo governo de Minas Gerais e a existência de duas garagens nos arredores da área de escopo (conforme levantado anteriormente no item 5.1) também contaram como pontos positivos à opção pelo item E como tecnologia a ser adotada durante a análise do sistema.

6.3.2. Opções de tecnologia fotovoltaica

Para se determinar qual tipo de módulo fotovoltaico seria ideal para o cenário estudado, há de se dar importância às características físicas da superfície que receberá a instalação quanto o próprio custo de instalação do sistema. Conforme explica Galdino (2014, p. 330), as tecnologias em filme fino, ainda que menos eficientes, normalmente possuem melhor relação R\$/m². Neste caso, mesmo

¹¹ Disponível em: <http://www.arup.com/news/2014_01_january/09_january_worlds_most_demanding_electric_bus_route_launched>. Acesso em out. 2016.

ocupando uma maior área, denotam menor investimento. Já os módulos de silício cristalino (m-Si e p-Si), mais eficientes, levam a sistemas com maior custo de estruturas metálicas e cabeamento.

Tanto esses módulos cristalinos quanto os modelos de silício amorfo (a-Si) são rígidos, encapsulados em vidro e necessitam de estruturas de fixação, o que torna o sistema mais pesado do que, por exemplo, um sistema similar em filme fino flexível colado diretamente sobre manta impermeabilizante termoplástica de poliolefina (TPO), como demonstrado, a seguir, na Tabela 7:

Tabela 7 - Exemplos de cargas mecânicas impostas por três módulos FV distintos

Tecnologia	Integração	Configuração do sistema	Eficiência da tecnologia	kgf/m ² (Módulo Fotovoltaico)	kgf/m ² (Estrutura)	kgf/m ² (Sistema)
a-Si		Sanduíche Vidro/ Vidro fixado em estrutura de alumínio	6-8%	20	5	25
a-Si		Módulo flexível colado em manta impermeabilizante	6-8%	3,6	3,4	7,0
c-Si		Vidro com Moldura fixado em estrutura de alumínio	14-18%	12	5	17

Fonte: GALDINO, 2014, p. 331.

Tais estruturas de fixação também denotam uma superfície plana para sua instalação, razão pela qual as placas rígidas são, normalmente, a opção mais utilizada para instalações planas. Superfícies irregulares ou curvas, por outro lado, indicam a opção por placas flexíveis que se adequam às suas características.

Considerando, portanto, que uma das coberturas – a da Estação São Gabriel – apresenta convexidade ao longo de sua área, a melhor escolha para esta central geradora específica seria a instalação de placas flexíveis sobre manta TPO. No mercado atual, a maior parcela desse tipo de módulo com potência e níveis de eficiência compatíveis com o objetivo do projeto são as de disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), devido a sua maior potência e eficiência. Algumas marcas apresentam

modelos cujas potências variam entre 80 e 300 W por módulo e níveis de eficiência que podem variar entre 10 e 13%. Ainda assim, é possível encontrar módulos flexíveis de silício amorfo (a-Si) viáveis para a proposta do projeto, mesmo apresentando eficiência inferior às CIGS (entre 6 e 8% em média). Esta opção gera uma maior economia nos custos de instalação – e, conseqüentemente, um tempo de retorno de capital menor – por conta do barateamento que essa tecnologia sofreu ao longo dos anos. Outro tipo de tecnologia flexível em estágio de desenvolvimento são as células orgânicas (OPV). Esta, entretanto, ainda não se encontra em estágio suficientemente maduro para a proposta, uma vez que a baixa potência e eficiência das células as permitem produzir apenas cerca de 45 W por m² de área ativa (SUNEW, 2016). O m² de OPV produzido pela Sunew, por exemplo, seria capaz de gerar apenas 125 Wh anuais no atual cenário da tecnologia (MORAES, 2015). Assim, a finalidade da OPV em um sistema fotovoltaico, como apresentada pela própria Sunew (2016) em seu portfólio, é de complementar as demais tecnologias, em locais que “demandem leveza, flexibilidade, transparência e baixa dependência do grau de inclinação, como fachadas, coberturas leves, guarda-sóis, mobiliários urbanos e até mesmo automóveis”.

Para a Estação Vilarinho, há dois cenários possíveis: ao se aproveitar diretamente a área do estacionamento descoberto, há viabilidade para o uso de placas rígidas sobre estrutura de alumínio, o que permitiria tanto o uso de células de silício cristalino (m-Si e p-Si) quanto de uma maior gama de modelos a-Si, normalmente encapsulados em vidro mesmo sendo desenvolvidos em filme fino. Porém, isso acabaria inviabilizando o uso das vagas ali presentes para os usuários. Como proposto anteriormente, para se manter essas vagas, uma solução seria construir uma cobertura sobre a área do estacionamento. São vários os tipos de estrutura que podem ser instaladas nesse caso, mas o mais habitual é optar por modelos em policarbonato, o que tornaria mais atrativo o uso de módulos flexíveis, como no caso da Estação São Gabriel.

Assim, em ambas as centrais geradoras fotovoltaicas previstas, optou-se pelo uso de placas flexíveis. A tecnologia mais adequada será definida adiante, no item 6.3.2, onde será apresentado um comparativo entre os valores previstos para a produção de energia elétrica para sistemas que utilizem módulos CIGS e a-Si – tecnologias essas que, em regiões com temperatura média anual mais elevada, se apresentam como a opção mais adequada devido ao maior suporte a tais níveis de temperatura – juntamente com uma breve análise de ciclo de vida de cada tecnologia

no que diz respeito à provável redução de emissão de GEEs ao se substituir ônibus diesel por ônibus elétricos alimentados por esses sistemas fotovoltaicos.

6.4. Dimensionamento dos sistemas

O dimensionamento do sistema fotovoltaico (SFV) depende diretamente da demanda energética da frota de ônibus que operará no trecho selecionado. Em outras palavras, a energia mínima a ser suprida pelo sistema FV em um dia deve corresponder à demanda elétrica do sistema de ônibus escolhido. No horário de insolação, a potência do sistema FV deve ser suficiente para suprir o consumo da frota elétrica durante as 24 horas do dia. Estando o sistema ligado à rede elétrica, a energia suprida em excesso num determinado horário pode ser absorvida pela distribuidora de energia local, que alimentará o sistema no horário que não houver insolação ou esta for deficiente em relação à demanda. O saldo – positivo ou negativo – ao final do mês poderá ser creditado ou debitado ao cliente conforme Resolução Normativa ANEEL 482/2012:

“No Sistema de Compensação de Energia (*net metering*) adotado pelo Brasil (Resolução Normativa ANEEL 482/2012), quando o SFV gera mais energia do que a demanda pela instalação consumidora, a energia excedente é entregue à rede elétrica e o medidor registra essa energia. O contrário ocorre quando a edificação consome mais energia do que a gerada pelo sistema FV, fazendo com que, neste caso, o medidor registre o fluxo em seu sentido convencional. No fim do mês, caso o balanço energético seja positivo [...], a distribuidora disponibilizará um crédito energético referente ao excedente, que será compensado nas faturas subsequentes, em um prazo de até 36 meses [...]. Os créditos de energia ativa que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão ser utilizados para compensar o consumo de outras unidades, previamente cadastradas e atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo da unidade com sistema de compensação de energia elétrica. No caso de consumo por outra unidade consumidora (que não é a geradora), haverá incidência de impostos sobre a energia consumida” (GALDINO, 2014, p. 327-328).

Como o SFV proposto será conectado à rede, na prática o sistema de ônibus elétrico poderá funcionar dentro do sistema de compensação energética, já que haverá ocorrência de recargas durante os períodos sem incidência solar. Portanto, o primeiro passo no dimensionamento do SFV será determinar qual a demanda energética dos ônibus em um dia de operação, o que está diretamente ligado ao número de veículos disponibilizados, a quantidade de horas em operação e o número de viagens de cada veículo (ou a distância total percorrida em um dia). Além disso, outro fator importante é o tipo de tecnologia utilizado para a alimentação dos ônibus,

baterias de lítio (Li-ion) ou supercapacitores (S-cap). Uma vez calculada a demanda, pode-se determinar a área mínima utilizável para geração fotovoltaica e, em seguida, o potencial total de geração das áreas disponíveis. Esse valor também será importante para o item 6.4, pois estará diretamente relacionado ao potencial de expansão do projeto no futuro.

6.4.1. Demanda energética do sistema de ônibus elétricos

No cálculo da demanda energética da frota de ônibus elétricos a ser adotada no sistema proposto, foram consideradas duas tecnologias para análise: ônibus com banco de baterias de lítio (Li-ion) – tecnologia essa a mais difundida quando se fala em veículos elétricos com valores mais altos de autonomia – e ônibus com cadeia de super ou ultracapacitores – uma tecnologia mais recente, mas cuja principal vantagem é a velocidade das recargas tanto parciais, quanto completas.

Rogge (2015) e Göhlich (2014) executaram testes para calcular o aumento do consumo energético de ônibus elétricos quando utilizando – ou não – sistemas de climatização interna. Nestes dois estudos, foram considerados ônibus de dimensões e pesos máximos de operação diferentes, mas, em ambos os casos, equipados com baterias Li-ion. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Consumo específico de energia em ônibus elétricos Li-ion

	Göhlich (2014)	Rogge (2015)
Comprimento do veículo (m)	12	18
Peso máx. operação (ton)	18	28
Consumo médio SEM sistema de climatização interna (kWh/km)	1,96	1,90
Consumo médio COM sistema de climatização interna (kWh/km)	2,47	2,30
Aumento do consumo específico (%)	26,00%	21,05%

Fonte: O autor (2017), baseado em GÖHLICH (2014) e ROGGE (2015).

Obtidos os valores de aumento do consumo específico quando utilizando ar condicionado observados por Rogge e Göhlich, juntamente com os dados já disponibilizados pelos fabricantes dos modelos BYD K9 – que utilizam baterias Li-ion de fosfato de ferro (LiFePO₄) – e Sinautec U-Cap – modelo de *capabus* que, por sua vez, são equipados com banco de supercapacitores – foi possível determinar quais seriam os rendimentos destes dois modelos em condições similares de operação. Desta maneira, torna-se possível fazer uma comparação de um maior número de cenários possíveis para o sistema aqui sugerido. Os valores obtidos estão sintetizados, a seguir, na Tabela 9:

Tabela 9 - Consumo específico e autonomia dos modelos BYD K9 e Sinautec U-cap

Modelo	BYD K9	Sinautec U-Cap
Tipo de bateria	Li-ion (LiFePO ₄)	Supercapacitor (S-cap)
Capacidade total do banco de baterias (kWh)	324	9
Autonomia, SEM uso do ar condicionado (km)	250	9,6
Consumo específico, SEM uso do ar condicionado (kWh/km)	1,3	0,94
Autonomia, COM uso do ar condicionado (km)	197,5	5,7
Consumo específico, COM uso do ar condicionado (kWh/km)	1,64	1,58
Aumento do consumo específico (%)	26%	68,5%

Fonte: O autor (2017), baseado em BYD (2017); ROGGE (2015) e SINAUTEC (2016).

É válido salientar aqui que tamanha discrepância entre os aumentos de consumo específico nos dois casos acima se deu, principalmente, devido ao comportamento diferente entre baterias de lítio e capacitores na alimentação energética dos veículos.

6.4.2. Cargas no trajeto dos ônibus S-Cap

Observa-se, com os dados acima, a necessidade de realização de recargas rápidas por parte dos veículos *S-cap* ao longo do trajeto proposto. A área de escopo delimitada possui uma distância de aproximadamente 6,1 km entre as duas Estações de Transferência do MOVE, de modo que cada *capabus* consumiria cerca de 5,7 kWh no trajeto de ida entre estações quando operando sem o ar condicionado. Por interpolação, se uma recarga completa dos 9 kWh utilizados pelo ônibus dura cerca de 5 minutos, uma recarga de 5,7 kWh duraria por volta de 3 minutos.

Todavia, com a necessidade de se manter o ar condicionado ligado pelas características climáticas locais, faz-se necessária a instalação de terminais de recarga rápida em alguns pontos de embarque do trecho nos dois sentidos. Como, segundo a Sinautec (2016), cada recarga de 30 segundos possibilita ao veículo trafegar mais 1,6 km, a instalação de uma estação de recarga rápida em cada sentido da Cristiano Machado já seria suficiente para garantir a realização do trajeto. A fim de se manter a carga restante de bateria próximo dos 30% na hora da recarga - assim como ocorre no cenário sem ar condicionado – os pontos ideais para instalação dos pontos de recarga rápida seriam na Av. Cristiano Machado, 10050 (Ponto 1, sentido São Gabriel/Vilarinho) e Av. Cristiano Machado, 9467 (Ponto 2, sentido Vilarinho/São Gabriel).

Neste caso, por interpolação, presume-se que, em uma recarga de 30 segundos, o consumo na estação de recarga seria de cerca de 1,4 kWh. Desta maneira, é possível determinar uma projeção do consumo de energia total de cada veículo *capabus* ao longo do trajeto, entre recargas rápidas e completas. Os valores são apresentados, abaixo, na Tabela 10:

Tabela 10 - Consumo energético por recargas de cada *capabus*

Ponto de recarga	Distância percorrida (km)	Gasto energético no percurso (kWh)	Alimentação energética na recarga (kWh)	Energia disponível pós recarga (kWh)
Ponto 1	3,7	5,8	1,4	4,6
Vilarinho	2,4	3,8	8,2	9,0
Ponto 2	3,92	6,2	1,4	4,2
São Gabriel	2,2	3,5	8,3	9,0

Fonte: O autor (2017).

Desta maneira, cada ônibus tipo *capabus* consumiria, em um percurso de ida e volta completo no trecho selecionado para o estudo, 19,3 kWh, dos quais 9,6 kWh no trajeto sentido São Gabriel/Vilarinho e 9,7 kWh no sentido Vilarinho/São Gabriel. Para fins de dimensionamento dos arranjos fotovoltaicos, esse valor será arredondado para 10 kWh em ambos os sentidos.

6.4.3. Distância percorrida pelos ônibus elétricos

Definido o consumo médio total entre recargas dos bancos de bateria ou de capacitores de cada tipo de veículo, o passo seguinte é determinar a distância total percorrida por eles durante um dia de operação. Para isso, é necessário determinar a quantidade de ônibus a serem implementados, a frequência de partidas de cada um desses e o tempo total gasto no percurso entre as estações.

Tomando como base a linha 62 do MOVE, de acordo com os dados de itinerário disponibilizados pela BHTrans, nos horários de pico (6-8h; 11-14h e 15-18h) há um maior fluxo de veículos e menor espaço entre as saídas do ponto inicial (média de 5 min entre partidas). Essa linha circula 24h por dia, tendo maior espaçamento entre partidas no horário entre 22h e 5h, quando há partidas a cada 20 minutos. No trecho analisado da Av. Cristiano Machado, a estimativa de tempo de percurso é de 45 minutos em ambos os sentidos. Há de se considerar, no entanto, que os ônibus da linha 62 realizam 3 paradas a mais do que na proposta de itinerário no sentido São Gabriel/Vilarinho, além de percorrer um trecho de 1 km adicional para acessar a Rua 2374 e adentrar a Estação Vilarinho.

Ao se traçar um paralelo com a linha 62, considera-se aqui que a linha proposta também levaria por volta de 45 minutos para realizar o trajeto, contabilizando que as paradas para embarque se dessem no mesmo volume. No caso do emprego dos *capabus*, soma-se ainda o tempo de recarga na estação de transferência correspondente. Assim, para comparar os cálculos realizados, considerou-se que cada veículo sairá da segunda estação de transferência 50 minutos após partir da primeira nos dois cenários.

Para essa frequência de partidas, os cenários analisados foram calculados com frotas de 4 veículos, partindo de cada estação a cada 25 minutos, iniciando o serviço às 6:00 nas duas estações. O último ônibus nos dois cenários partiria para sua última viagem às 21:25 na São Gabriel e sairia às 22:15 da Vilarinho, chegando às 23h na São Gabriel. Para o cenário "S-cap", neste caso, haveria mais uma recarga antes do veículo partir para a garagem. Considerou-se que, independente da garagem

escolhida – seja da viação Itapemirim, seja da Progresso, a distância entre ela e a Estação São Gabriel é de 2,5 km. Em ambos os cenários, haveria também uma estação de recarga na garagem para deixar o veículo 100% carregado para operação no dia seguinte. Assim, entre a saída da garagem, viagens e retorno à garagem, cada veículo percorreria cerca de 130 km por dia, o que corresponderia a, aproximadamente, 10 viagens de ida e volta.

Desta maneira, no cenário “S-cap”, com as recargas parciais durante o percurso e completas nas Estações e na garagem ao fim do dia, estimou-se um consumo aproximado de 205 kWh/dia por ônibus. Já para os cenários “Li-ion”, os veículos poderiam ser utilizados durante todo o período de operação do sistema sem necessidade de recargas parciais, apenas com uma recarga completa a ser realizada na garagem, fora do horário de operação. Considerando o consumo de 1,64 kWh por km rodado, obtido da média apresentada anteriormente do modelo BYD K9, cada ônibus tipo Li-ion demandaria cerca de 213,2 kWh/dia. Já para os dados observados por Rogge (2015), a demanda aumentaria para 321,1 kWh/dia. Finalmente, para o cenário de Göhlich (2014), a demanda energética seria de 299 kWh/dia. Assim, conforme indicado a seguir na Tabela 11, a demanda energética total do sistema de ônibus estaria entre 821,6 e 1.284,4 kWh/dia, dependendo da tecnologia e base de estudos adotadas:

Tabela 11 - Demanda diária do sistema de ônibus proposto

Tecnologia	Consumo específico (kWh/km)	Distância percorrida (km/dia)	Consumo diário veicular (kWh/dia)	Tamanho da frota (un.)	Demanda diária do sistema (kWh/dia)
Li-ion (K9)	1,64	130	213	4	852
Li-ion (Rogge)	2,47		321		1.284
Li-ion (Göhlich)	2,3		299		1.196
S-cap	1,58		205		821

Fonte: O autor, 2016.

6.4.5. Dimensionamento do SFV

Anteriormente, no item 5.2.2, definiu-se que as melhores alternativas quanto à tecnologia a ser adotada nos módulos fotovoltaicos pelas características

físicas das coberturas nos locais de implementação dos sistemas seriam células de silício amorfo e CIGS, dispostas sobre manta flexível e impermeável do tipo TPO.

Como explica Galdino (2014), pelas características do sistema de compensação de energia definido pela ANEEL em sua Resolução Normativa 482/2012, uma geração anual fotovoltaica muito acima da demanda da unidade consumidora-geradora pode não ser interessante, devido à incidência de impostos sobre essa energia excedente caso consumida por outras unidades não-geradoras. Ao mesmo tempo, ao se dimensionar o sistema fotovoltaico (SFV) para uma produção superior à demanda no caso proposto, abre-se a possibilidade para uma expansão futura da frota e do alcance do sistema. Além do mais, através da realização de uma análise de viabilidade financeira, há a chance de, mesmo com a incidência de impostos sobre esse excedente, os gastos da unidade consumidora-geradora serem inferiores ao do consumo de eletricidade fornecida pela distribuidora.

Por essa razão, serão apresentados dois dimensionamentos distintos para o SFV. Primeiramente, o dimensionamento para a área mínima exigida a fim de se atender à demanda de projeto, baseado nas tecnologias das baterias utilizadas pelos ônibus. Em seguida, o dimensionamento do potencial gerador das áreas selecionadas, em um cenário de aproveitamento completo da área útil disponível em ambas as edificações.

Buscando determinar a taxa de desempenho do SFV, esses dimensionamentos foram realizados com auxílio da ferramenta PVsyst. Novamente, Galdino (2014) explica que, para SFV's de maior porte (como no caso proposto), se faz necessário o uso de programas de dimensionamento a fim de reduzir o grau de incerteza na estimativa da taxa de desempenho do sistema. O programa em questão, cuja interface pode ser visualizada a seguir, na Figura 20, é amplamente utilizado no dimensionamento de sistemas conectados à rede (SFCR), devido à sua grande base de dados para módulos e inversores, diferentes graus de complexidade – desde um nível mais simplificado para pré-projetos, quanto mais detalhado para simulações –, e possibilidade de projeção dos custos de produção energética:

Figura 20 - Interface do programa PVsyst: tela de dimensionamento do SFCR



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 7.

Outra vantagem da utilização do PVsyst é a possibilidade de se adicionar outros modelos de painéis fotovoltaicos não constantes na base de dados do sistema, sendo apenas necessário adquirir os dados fornecidos pelo fabricante e acrescentá-los ao programa. Essa ferramenta permitiu a realização do dimensionamento do SFV fazendo uso de módulos fotovoltaicos atualmente comercializados, sendo escolhidos dois módulos CIGS, o Solopower SP3S 190 W e o Global Solar PowerFlex 100 W, e um módulo a-Si, o Uni-Solar PVL 144 W. Os dados técnicos de cada módulo, calculados sobre condições padrões de teste – 1.000 W/m² de irradiância solar, massa de ar 1,5, a 25°C de temperatura – são apresentados a seguir, na Tabela 12:

Tabela 12 - Comparação técnica entre os módulos analisados

	SP3S 190W	PowerFlex 100W	PVL 144W
Tecnologia	CIGS	CIGS	a-Si junção tripla
Potência máxima (Pmax)	190 W	100 W	144 W
Tolerância	- 3% / + 5%	- 7% / + 10%	- 5% / + 5%
Tensão em Pmax (Vmp)	55,3 V	17,8 V	33 V
Corrente em Pmax (Imp)	3,4 A	5,6 A	4,36 A
Corrente de curto-circuito (Isc)	4,3 A	6,4 A	5,3 A
Tensão de circuito-aberto (Voc)	78,0 V	23,3 V	46,2 V
Eficiência	9,7%	12,7 %	6,7%
Comprimento	1,886 m	2,017 m	5,486 m
Largura	1,146 m	0,494 m	0,394 m
Área	2,1614 m ²	0,9964 m ²	2,1614 m ²
Espessura	2 mm	3 mm	4 mm
Peso	5,2 kg	3,3 kg	7,7 kg
Peso por m²	2,4 kg/m ²	3,3 kg/m ²	3,6 kg/m ²

Fonte: O autor, baseado em Global Solar (2016); Solopower (2010); Uni-Solar (2009).

Pela localização da área de escopo, os dados climáticos utilizados no dimensionamento foram os disponibilizados pelo Aeroporto da Pampulha. A direção dos módulos foi baseada na própria orientação das edificações em relação ao norte geográfico – ou seja, foram apontados para Norte-Nordeste na Estação Vilarinho e para Nordeste na Estação São Gabriel – enquanto a inclinação adotada para os módulos (23°) foi um pouco superior a latitude local de aproximadamente 20°, a fim de diminuir as perdas ocorridas no inverno (MEDEIROS, 2011).

Para o dimensionamento dos inversores, seguindo os ensinamentos de Galdino (2014), segundo uma linha de pensamento mais conservadora, optou-se por adotar valores de potências iguais – ou levemente superiores – à potência instalada das simulações.

6.4.5.1. Área mínima para a demanda de projeto

Ao final do item 6.3.1, ficaram determinadas as respectivas demandas de energia elétrica sugeridas para cada uma das tecnologias de ônibus elétricos aplicáveis no projeto proposto. Esses valores também correspondem à produção

mínima que o SFV projetado deverá gerar em sua média diária anual para garantir o devido funcionamento do sistema de ônibus.

Em posse desses dados, pôde-se partir para o dimensionamento da área mínima necessária para que as instalações fotovoltaicas pudessem suprir tal demanda, com o auxílio da ferramenta PVsyst. É válido destacar que, buscando garantir uma margem de segurança na produção ao longo de sua vida útil – devido a perdas potenciais ocorridas com o tempo – os sistemas a seguir apresentados foram superdimensionados para uma produção 10% superior à demanda. O excedente produzido aqui seria consumido pelas próprias estações nas quais os SFV's serão instalados, evitando-se assim a incidência de imposto sobre essa parcela excedente e garantindo uma economia nos gastos com energia elétrica provinda da concessionária.

Para o cenário “S-cap”, os quatro veículos que compõem a frota de teste realizariam recargas rápidas em terminais localizados em ambas as estações São Gabriel e Vilarinho. Entretanto, devido à necessidade de se realizar recargas parciais quando os ônibus retornam da Estação São Gabriel à garagem e quando chegam à essa mesma estação, oriundos da garagem no início do serviço, a demanda elétrica nesta será maior do que na Estação Vilarinho. A demanda neste cenário seria de, aproximadamente, 820 kWh/dia, sendo suprida da seguinte forma pelas duas instalações FV: Estação São Gabriel, 430 kWh/dia + 10% e Estação Vilarinho, 390 kWh/dia + 10%. Os resultados obtidos através do PVsyst podem ser conferidos na Tabela 13:

Tabela 13 - Dimensionamento do SFV para ônibus S-cap

Modelo	Tipo	Pot. Instalada (kWp)	Nº de módulos	Área (m ²)	Prod. anual (MWh)	Prod. diária média (kWh)	TD*
<i>Estação Vilarinho – Demanda 390 kWh/dia (+10%)</i>							
SP3S 190W	CIGS	110	580	1256	158	433	86,7%
Poweflex 100W	CIGS	125	1248	1244	159	436	76,9%
PVL-144W	a-Si	111	770	1664	158	433	86,3%
<i>Estação São Gabriel – Demanda 430 kWh/dia (+10%)</i>							
SP3S 190W	CIGS	120	630	1362	173	474	87,3%
Poweflex 100W	CIGS	135	1350	1345	174	477	77,8%
PVL-144W	a-Si	120	836	1807	175	480	88,1%

Obs: * - TD = Taxa de Desempenho. É definida pela relação entre a produção média (kWh/kWp) e o tempo de incidência solar a 1000 W/m² sobre o painel fotovoltaico. (MEDEIROS, 2011).

Fonte: O autor, 2016.

Já para o cenário “Li-ion”, uma vez que o objetivo de sua implementação é garantir o serviço sem necessidade de recargas durante o horário de serviço, o ideal seria instalar o SFV apenas na Estação São Gabriel, dada sua maior proximidade das garagens disponíveis para estacionamento dos veículos no horário de inatividade, quando seriam realizadas as recargas completas. A razão para essa escolha é minimizar as perdas derivadas de transmissão da energia elétrica através da rede. Desta maneira, foram calculadas as áreas mínimas necessárias da cobertura da Estação São Gabriel para os três modelos de consumo específico de energia apresentados anteriormente, como pode ser observado na Tabela 14:

Tabela 14 - Dimensionamento do SFV para ônibus Li-ion

Modelo	Tipo	Pot. Instalada (kWp)	Nº módulos	Área (m ²)	Prod. anual (MWh)	Prod. diária média (kWh)	TD
<i>Modelo de consumo K9 – Demanda 853 kWh/dia (+ 10%)</i>							
SP3S 190W	CIGS	238	1253	2708	345	946	87,7%
Poweflex 100W	CIGS	264	2640	2630	344	943	79,1%
PVL-144W	a-Si	238	1650	3566	344	943	87,6%
<i>Modelo de consumo Rogge – Demanda 1.284 kWh/dia (+10%)</i>							
SP3S 190W	CIGS	324	1705	3685	470	1.288	87,9%
Poweflex 100W	CIGS	365	3658	3645	469	1.285	77,6%
PVL-144W	a-Si	326	2266	4898	470	1.288	87,3%
<i>Modelo de consumo Göhlich – Demanda 1.196 kWh/dia</i>							
SP3S 190W	CIGS	303	1595	3447	439	1.203	87,8%
Poweflex 100W	CIGS	333	3330	3318	440	1.206	80,0%
PVL-144W	a-Si	303	2100	4541	438	1.200	87,7%

Fonte: O autor, 2016.

6.4.5.2. Potencial de geração elétrica total

Considerando um aproveitamento total da área útil disponível de cobertura nas edificações para geração elétrica, foi possível calcular qual o potencial de expansão do sistema em termos de geração total de energia elétrica. Tal dado influencia diretamente tanto na quantidade de veículos elétricos em circulação, quanto no aumento do alcance do serviço através de ônibus zero emissão dentro do sistema BRT local.

Como visto anteriormente, aproveitando apenas áreas sem interferência de sombreamento por estruturas ou construções próximas, tem-se uma área total disponível de 19.500 m², dos quais 8.000 m² referentes à Estação São Gabriel e os demais 11.500 m² ao setor sul da Estação Vilarinho. Assim como no tópico anterior, foram analisados os cenários para três módulos fotovoltaicos comercialmente disponíveis. Os resultados são apresentados abaixo, na Tabela 15:

Tabela 15 - Capacidade máxima de geração fotovoltaica no sistema proposto

Modelo	Pot. Instalada (kWp)	Pot. Inversor (kW)	Área instalada (m ²)	Prod. Anual (MWh)	Prod. diária média (kWh)	TD
<i>Estação São Gabriel – Área disponível = 8.000 m²</i>						
SP3S 190W	703	706	7.997	1017	2.786	87,6%
Powerflex 100W	803	804	7.999	1.033	2.830	77,9%
PVL-144W	532	535	7.985	763	2.090	86,8%
<i>Estação Vilarinho – Área disponível = 11.500 m²</i>						
SP3S 190W	1.010	1.050	11.490	1.469	4.025	88,1%
Powerflex 100W	1.152	1.200	11.479	1.509	4.134	79,3%
PVL-144W	766	798	11.497	1.092	2.992	86,3%

Fonte: O autor, 2016.

Pelos resultados obtidos, o potencial de geração elétrica nas duas coberturas permite uma expansão considerável do sistema de ônibus elétrico proposto. A faixa de produção diária total, somando os dois SFV, estaria entre 5,08 MWh/dia (para a menor potência instalada) e 6,96 MWh/dia (para a maior potência instalada). Para ilustrar, de acordo com os dados sobre consumo de energia elétrica no Brasil apresentados pela EPE, em 2015, na região Sudeste, a média de consumo

mensal por residência (sem distinção entre as unidades) foi de 175 kWh (EPE, 2016). Neste cenário de consumo, o potencial elétrico de ambos SFV's em conjunto seria o equivalente ao consumo de 870 a 1190 residências, dependendo da tecnologia fotovoltaica adotada.

Conforme explicitado no item anterior, a demanda na estação São Gabriel, em qualquer um dos cenários trabalhados de tipo de baterias utilizadas nos veículos, seria maior que na Estação Vilarinho para a área de escopo. Porém, a maior capacidade disponível da Estação Vilarinho em termos de potencial de geração torna atrativa a possibilidade de expansão do sistema em outros corredores MOVE conectados a essa estação, o que será explicado mais detalhadamente adiante, no item 6.6.

6.4.6. Análise da redução de emissão de GEE

Confirmada a viabilidade do emprego de ônibus elétricos alimentados por sistemas fotovoltaicos quando comparados aos tradicionais ônibus Diesel hoje utilizados no MOVE, o próximo passo é determinar o potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa ao longo da vida útil estimada das instalações fotovoltaicas.

Como pode ser observado na Tabela 16, abaixo, a média de emissões de CO₂ oriundos dos ônibus com motor Diesel é 1,28 kg a cada km rodado:

Tabela 16 - Rendimento quilométrico e emissões por modalidade

Modalidade	Rendimento energético km/l ou km/kWh (A)	Emissões por fonte energética kg de CO ₂ /l ou kWh (B)	Emissões quilométricas kg de CO ₂ /km (B/A)
Metrô	0,028	0,087	3,16
Ônibus	2,5	3,200	1,28
Automóvel ¹	8,5	1,747	0,19
Motocicleta ²	30	2,307	0,07
Veículos pesados	2,5	3,2	1,28

Fonte: CARVALHO, 2011, p. 15.

Se, de maneira similar ao proposto neste projeto, fosse empregada uma frota de 4 veículos a diesel realizando, cada um, o percurso analisado de 130 km/dia, cada ônibus seria responsável pela emissão de 166,4 kg de CO₂ por dia. Dentro do período de 30 anos correspondente à vida útil do SFV, cada ônibus Diesel emitiria 1.822.080 kg CO₂, enquanto a frota de 4 veículos, 7.288.320 kg CO₂.

Apesar de os ônibus 100% elétricos serem considerados veículos zero-emissão, deve-se levar em conta a pegada de carbono atrelada à confecção dos módulos fotovoltaicos nesta análise de redução. Voltando aos dados apresentados anteriormente no capítulo 3, os módulos CIGS apresentam uma pegada de pouco mais de 2 kg de CO₂ equivalente a cada Watt-pico instalado. Já para os módulos a-Si, esse valor encontra-se abaixo de 1 kg. Considerando tão somente as instalações propostas para atender a demanda de consumo da frota de ônibus do item 6.3.2.1, chegou-se aos seguintes resultados, apresentados abaixo na Tabela 17:

Tabela 17 - Análise da redução de emissão de GEE – Cenário “Área mínima”

Tipo de ônibus			S-cap		
Demanda total do sistema:			821,6 kWh/dia		
Modelo PV	Pot. Instalada (kWp)	Pegada de carbono (kg CO ₂ -eq/Wp)	Emissão GEE (kg CO ₂ -eq)	Redução de GEE, em comparação a ônibus Diesel (kg CO ₂ -eq)	Percentual de redução de GEE
SP3S 190W	230	2,231	513.130	6.765.190	92,83%
PowerFlex 100W	260	2,231	580.060	6.708.260	92,04%
PVL-144W	231	0,993	229.383	7.058.937	96,85 %
Tipo de ônibus			Li-ion (K9)		
Demanda total do sistema:			852,8 kWh/dia		
SP3S 190W	238	2,231	530.978	6.757.342	92,71%
PowerFlex 100 W	264	2,231	588.984	6.699.336	91,92%
PVL-144W	238	0,993	236.334	7.051.986	96,76%
Tipo de ônibus			Li-ion (Rogge)		
Demanda total do sistema:			1.284,4 kWh/dia		
SP3S 190W	324	2,231	722.844	6.565.476	90,08%
PowerFlex 100W	365	2,231	814.315	6.474.005	88,83%
PVL-144W	326	0,993	323.718	6.964.602	95,56%
Tipo de ônibus			Li-ion (Göhlich)		
Demanda total do sistema:			1.196,0 kWh/dia		
SP3S 190W	303	2,231	675.993	6.612.327	90,72%
PowerFlex 100W	333	2,231	742.923	6.545.397	89,81%
PVL-144W	303	0,993	300.879	6.987.441	95,87%

Fonte: O autor, 2016.

Percebe-se que, para todos os cenários de consumo da frota elétrica, a redução do percentual de emissões de CO₂ equivalente é bastante elevada, independentemente da tecnologia fotovoltaica adotada. Se os SFV's fossem instalados na totalidade das áreas disponíveis das Estações MOVE para ampliação da frota de ônibus elétricos, na mesma proporção os percentuais de redução de GEE seriam próximos aos apresentados na Tabela 17.

A ampliação da captação FV, utilizando toda a área disponível de 19.500 m², para o aumento da frota dos ônibus elétricos em substituição ao ônibus Diesel, tem sua análise apresentada na Tabela 18. Nesta situação, a frota de ônibus elétrico passa a ser composta de 23 a 30 ônibus, dependendo da tecnologia FV escolhida:

Tabela 18 - Análise de GEE dos ônibus Diesel substituídos pelo sistema FV de área total

Área total disponível de 19.500 m ²		GEE bus Diesel: 7.288.310 kg CO ₂ eq/30 anos/4 bus		
Modelo FV	Área inicialmente utilizada (m ²)	Fator de ampliação da área	Nova frota de ônibus elétricos	GEE ônibus Diesel substituídos
SP3S 190W	2.618	7,45	30	54.286.570
PowerFlex 100W	2.589	7,53	30	54.894.647
PVL-144W	3.471	5,62	22,5*	40.945.618
Média	2.893	6,9	27,5	50.042.278

* Obs.: 22,5 ônibus representa uma frota de 23 ônibus, na qual um teria metade da utilização.

Fonte: O autor, 2016.

A Tabela 19, por sua vez, analisa esta substituição dos ônibus Diesel por ônibus elétricos utilizando três tecnologias FV com a correspondente redução de emissão de GEE em cada caso, considerando a frota já ampliada de ônibus:

Tabela 19 - Análise da redução de emissão de GEE's – Cenário "Área total disponível"

Modelo PV	Potência instalada (kWp)	Pegada de carbono (kg CO ₂ -eq/Wp)	Emissão GEE (kg CO ₂ -eq)	Redução de GEE (kg CO ₂ -eq)	Percentual de redução de GEE
SP3S 190W	1.713	2,231	3.821.703	43.572.377	91,9%
PowerFlex 100W	1.955	2,231	4.361.605	43.012.475	90,8%
PVL-144W	1.298	0,993	1.288.914	43.185.166	97,3%

Fonte: O autor, 2016.

6.5. Escolha das tecnologias e disposição do SFV

Ao analisar as vantagens de cada tecnologia previamente apresentada ao longo deste estudo, juntamente com os valores obtidos nas simulações realizadas, optou-se como melhores opções para as tecnologias de armazenamento da energia para os ônibus e das células fotovoltaicas, respectivamente, supercapacitores e células CIGS.

No caso dos supercapacitores, além de mais econômicos nos cenários analisados, possibilitam uma maior expansão do planejamento de distribuição dos veículos dentro da malha urbana, sendo necessária a realização de estudos complementares para determinar a melhor localização da instalação de seus terminais de recarga rápida. As baterias de lítio-íon, apesar de garantirem maior autonomia entre cargas, possuem menor vida útil por conta da menor capacidade de recargas, além de demandarem um tempo muito elevado para realizarem a recarga completa, o que faria ser necessária a aquisição de um número maior de ônibus na frota para atender a mesma frequência de viagens dos ônibus *S-cap*. Apesar de permitirem a realização de recargas rápidas, isso não é interessante para as baterias Li-ion, uma vez que sua capacidade de armazenamento não é constante durante sua vida útil e diminui com o tempo e o número de recargas realizadas, mesmo que parciais. Além disso, com exceção do que se observa com as LTO utilizadas no TOSA, o tempo dessas recargas rápidas para baterias Li-ion é muito superior ao dos supercapacitores, que toleram mais ciclos de carga e descarga.

Em relação à tecnologia fotovoltaica a ser empregada nas centrais geradoras, apesar de apresentarem uma menor pegada de carbono dentro da análise de seu ciclo de vida, os painéis de silício amorfo flexíveis estão sendo substituídos no mercado pelos módulos CIGS mais eficientes, proporcionando uma geração elétrica consideravelmente maior que as células a-Si em uma mesma área útil.

Desta maneira, pôde-se projetar a disposição do sistema fotovoltaico sobre as coberturas de ambas as Estações MOVE consideradas no estudo. As seguintes figuras representam as configurações dos painéis nos cenários de área mínima necessária para alimentar uma frota de 4 veículos *S-cap* (Figura 21) e de aproveitamento da área total disponível (Figura 22):

Figura 21 - Disposição do SFV: cenário "Área mínima"



Fonte: O autor, 2017.

Figura 22 - Disposição do SFV: cenário "Área total disponível"



Fonte: O autor, 2017.

6.6. Possibilidade de expansão futura do sistema

Uma vez que a capacidade total disponível para o SFV nas duas edificações supera – e muito – a demanda da frota de teste, caso os testes práticos com o sistema corroborem com os resultados expostos anteriormente neste trabalho, haverá a possibilidade de expansão tanto do tamanho da frota, quanto do alcance do sistema, que poderia atender outras vias dentro dos corredores do MOVE integrados às duas Estações de Integração.

Dentro de um cenário de médio prazo, uma opção atrativa seria expandir o itinerário dos ônibus elétricos para o restante do Corredor MOVE Cristiano Machado. No caso dos ônibus *S-cap*, as estações de transferência podem ser adaptadas para comportarem terminais de recarga rápida. Além disso, dentro desse corredor, haveria a possibilidade de se aproveitar a cobertura do Terminal Rodoviário – TERGIP – para fins fotovoltaicos. Ele conta com uma área da cobertura de aproximadamente 10.000 m², o que possibilitaria a instalação dos terminais de recarga nos mesmos moldes das estações São Gabriel e Vilarinho. Isso pode ser facilitado devido à previsão de se realizar investimento para instalação fotovoltaica no local, inicialmente exclusivo para fins de climatização (AGENCIA MINAS GERAIS, 2016-b).

Outra possibilidade seria a instalação de micro SFV's nas estações de transferência do MOVE, que poderiam servir para alimentar postes de recarga de celular para os usuários do sistema, para alimentar o sistema automático de cobrança de passagem ou para fins de iluminação e ativação das portas automáticas nas plataformas.

No que diz respeito apenas à expansão do potencial fotovoltaico na região, tem que se falar também na possibilidade de aproveitamento de parte da produção para compensação do consumo energético do Metrô BH, já que o mesmo está presente no trecho analisado e interligado às estações São Gabriel e Vilarinho. Neste sentido, devido à elevada demanda energética do sistema metroviário, seria interessante a expansão do sistema fotovoltaico ao se aproveitar também as coberturas das três estações de metrô existentes na área de escopo: a Estação Primeiro de Maio, a Estação Waldomiro Lobo e a Estação Floramar.

A longo prazo, visando uma diminuição maior do número de automóveis individuais no trecho, entra-se em um estágio de desenvolvimento de iniciativas, tanto proibitivas quanto incentivadoras, por parte das autoridades locais. Iniciativas proibitivas, como a instauração de cobrança de pedágio ou sistema de rodízio na região, são alternativas mais viáveis para regiões centrais, com elevada concentração

de pedestres, o que não é o caso para a atual malha do MOVE. Assim, o foco mais interessante neste caso seriam as iniciativas incentivadoras, como, por exemplo, a implantação de estacionamentos públicos com tarifas reduzidas nos arredores ou nos próprios Terminais de Integração. Sistemas semelhante são vistos em outras cidades sustentáveis, como Estocolmo e Copenhagen, e são vistos como uma solução contra o adensamento da presença dos veículos individuais nas vias locais e para a consolidação da integração intermodal pública.

Em termos de tecnologia, o cenário a longo prazo permite a realização de investimentos para a evolução dos próprios ônibus elétricos, que poderão ser híbridos elétrico-solares com módulos OPV nas carrocerias dos mesmos. O sistema integrado aos veículos visaria alimentar parcial ou integralmente os sistemas de ar-condicionado, de modo a aumentar a autonomia entre recargas dos veículos. Apesar de, no atual estado da tecnologia, tais módulos não demonstrarem uma eficiência atraente mesmo para essa finalidade, os recentes resultados obtidos em laboratório dão uma boa perspectiva de evolução para as células orgânicas e poliméricas nos próximos anos, podendo, futuramente, ser passível de fazer parte do sistema proposto.

7. CONCLUSÃO

Após analisar todos os resultados coletados a partir dos estudos e simulações realizados, percebe-se que, em termos gerais, a implementação de ônibus elétricos alimentados por sistemas fotovoltaicos se mostra como uma alternativa interessante à tecnologia diesel atualmente empregada dentro do sistema BRT de Belo Horizonte do ponto de vista da sustentabilidade. Ainda que demande recursos financeiros elevados, devido ao custo superior dos veículos elétricos frente aos de motor Diesel e ao investimento inicial necessário para realizar a instalação do SFV, a possibilidade de redução acentuada das emissões de GEE observadas nas simulações é um grande atrativo à sua utilização. Além do mais, esses custos elevados com ambos os sistemas podem ser amortizados através de incentivos fiscais, de modo a se pagar facilmente dentro da vida útil estimada.

Em termos de redução de emissões, o uso de uma frota experimental de quatro ônibus tipo *S-cap*, alimentados por sistemas FV de placas CIGS, seria responsável pela emissão de 230 a 580 ton de CO₂-eq, ao passo que os ônibus Diesel substituídos teriam emitido de 7.288 ton CO₂ em 30 anos de vida útil, resultando em uma redução percentual aproximada entre 89% e 93%.

Por fim, dentro das propostas e diretrizes do sistema BRT apresentados no capítulo 5.1.1, os ônibus elétricos aqui propostos atendem muitas das características observadas nos sistemas BRT de maior sucesso, não só por serem veículos zero emissão, mas por conta de possuírem níveis aceitáveis de eficiência e autonomia, acessibilidade – sendo, em sua maioria, veículos com piso baixo, o que facilita o acesso para cadeirantes e portadores de necessidades físicas – e conforto, resultante especialmente dos baixos níveis de vibração ruído emitidos pela substituição do motor ciclo Diesel pelo motor elétrico.

Ao se comparar com sistemas de ônibus elétricos em outros locais do mundo, cuja matriz elétrica seja primariamente termoeletrica que, portanto, apresenta elevados níveis de emissão de GEE, o emprego de centrais fotovoltaicas para a alimentação dos ônibus, em local cuja matriz é predominantemente hidrelétrica, sempre que se necessitar de energia da rede elétrica, resultará em uma maior limitação na emissão de GEE, o que garante ainda mais a faceta sustentável do sistema aqui proposto frente a outras possibilidades de intervenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELAIDE CITY COUNCIL. **The World's First Solar Electric Bus**. Adelaide, 2014. Disponível em: <http://www.adelaidecitycouncil.com/assets/acc/Environment/energy/docs/tindo_fact_sheet.pdf>. Acesso em jul. 2016.

AGÊNCIA MINAS GERAIS. **Governo de Minas Gerais desenvolve projeto para instalação de veículos elétricos**. 28 set. 2016-a. Disponível em: <<http://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/governo-de-minas-gerais-desenvolve-projeto-para-instalacao-de-veiculos-eletricos>>. Acesso em set. 2016.

AGÊNCIA MINAS GERAIS. **Governo de Minas Gerais reassume gestão do terminal rodoviário de Belo Horizonte**. 01 mar. 2016-b. Disponível em: <<http://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/governo-de-minas-gerais-reassume-gestao-do-terminal-rodoviario-de-belo-horizonte>>. Acesso em set. 2016.

AMBIENTALTRANS – Ambiental Transportes Urbanos. **História do trólebus**. Disponível em: <http://www.ambientaltrans.com.br/trolebus_historia.html>. Acesso em set. 2016.

BARBI, Fabiana. **ICLEI case studies: Belo Horizonte's steps towards a new solar energy legislation**. 2010. Disponível em: <http://www.iclei.org.br/polics/CD/P2_4_Estudos%20de%20Caso/4_Energia%20Verde/PDF120_EC122_BeloHorizonte_ing.pdf>. Acesso em jul. 2016.

BHTRANS. **MOVE: perguntas frequentes**. Disponível em: <<http://www.bhtrans.pbh.gov.br/portal/page/portal/portalpublico/Temas/Onibus/MOVE/perguntas-frequentes-MOVE>>. Acesso em ago. 2016.

BHTRANS. **Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte – PlanMob-BH**. 2013. Disponível em: <http://www.bhtrans.pbh.gov.br/portal/page/portal/portalpublico/temas/Observatorio/observatorio-da-mobilidade-publicacoes-2013/PlanMob-BH_-_apresentacao.ppt.pdf>. Acesso em jul. 2016.

BIAGUE, Kaiodê Leonardo. **Mini usinas solares fotovoltaicas em sistemas de transporte rápido por ônibus – BRT (Bus Rapid Transit): uma abordagem propositiva a partir do projeto de corredores BRT em implantação na cidade de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/10cbf39a-36cf-4e3e-a717-9eae2448f1e9>>. Acesso em junho de 2016.

BOORSE, Jack W. **This is Light Rail Transit**. Transportation Research Board. Washington, nov. 2010. Disponível em: <http://www.apta.com/resources/reportsandpublications/Documents/light_rail_bro.pdf>. Acesso em nov. 2016.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em nov. 2016.

BYD – Build Your Dreams. **BYD K9 e-bus**: características. Disponível em: <<http://www.byd.com/la/auto/pt/ebus.html>>. Acesso em jan. 2017.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf>. Acesso em out. 2016.

CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos. **METRÔBH**: os trens. Disponível em: <<http://www.metrobh.gov.br/cbtu/final/equipamentos/trens/trens.htm>>. Acesso em ago. 2016.

CHADHA, Mridul. **China Gets Its First Solar-Powered Hybrid Buses**. 2012. Disponível em: <<http://cleantechnica.com/2012/07/30/china-gets-it-first-solar-powered-hybrid-buses>>. Acesso em jul. 2016.

EESI. **Hybrid buses costs and benefits**. Disponível em: <http://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf>. Acesso em jul. 2016.

ELETRA. **Tecnologia**. Disponível em: <http://www.eletrabus.com.br/eletra_por/index.html#>. Acesso em set. 2016.

EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas. **Análise da inserção da geração solar na matriz**: nota técnica. EPE. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em: ago. 2016.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. **Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2015**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricaaporclasse\(regi%C3%B5esesubistemas\)%E2%80%932011-2012.aspx](http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricaaporclasse(regi%C3%B5esesubistemas)%E2%80%932011-2012.aspx)>. Acesso em nov. 2016.

ERCAN, T.; TATARI, O. A hybrid life cycle assessment of public transportation buses with alternative fuel options. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 20, jul. 2015, p. 1213-1231.

ESMAP - Energy Sector Management Assistance Program, The World Bank. **Energy efficiency opportunities in Belo Horizonte**. Disponível em: <www.esmap.org/sites/esmap.org/files/FINAL_EECI_TRACE-Belo%20Horizonte_ENG.pdf>. Acesso em: jul. 2016.

EVANS, James. **Sustainable cities**. Palestra, 7'38". Disponível em: <<https://www.coursera.org/learn/gte-sustainable-cities/lecture/UX2Cv/sustainable-cities>>. Acesso em ago. 2016.

EVANS, James. **Advancing urban innovation**: living labs for sustainable building and planning. In: IARU SUSTAINABILITY SCIENCE CONGRESS, Copenhagen, 2015.

GÖHLICH, D.; KUNITH, A.; LY, T.A. **Technology assessment of na electric urban bus system for Berlin**. Berlim, mai. 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/263224970>>. Acesso em set. 2016.

GUADAGNIN, Cláudia. Startup mineira fabrica células solares tão finas e flexíveis quanto uma cartolina. **Gazeta do Povo**, Curitiba, 08 jun. 2016. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/startup-mineira-fabrica-celulas-solares-tao-finas-e-flexiveis-quanto-uma-cartolina-3rnofxy32rdoionu658bgp4xk>>. Acesso em ago. 2016.

GUIMARÃES, Guilherme. **Células orgânicas produzidas em território nacional: conheça o trabalho do CSEM Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://www.solarvoltenergia.com.br/celulas-organicas-produzidas-em-territorio-nacional-conheca-o-trabalho-do-csem-brasil/>>. Acesso em jul. 2016.

GUTIERREZ, Grace Cristina Roel. **Mobilidade urbana sustentável**. Belo Horizonte: UFMG, 17 fev. 2017. Notas de orientação.

GLOBAL SOLAR. **PowerFlex™ BIPV datasheet**. Arizona, 2016. Disponível em: <http://www.globalsolar.com/sites/default/files/uploads/documents/PowerFLEX_datash eet.pdf>. Acesso em nov. 2016.

HOWE, Marc. World's fastest charging electric bus debuts in China. **Gas 2**, Chicago, 05 ago. 2015. Disponível em: <<http://gas2.org/2015/08/05/worlds-fastest-charging-electric-bus-debuts-china/>>. Acesso em set. 2016.

ITDP – Instituto de Política de Desenvolvimento e Transportes. **Bus Rapid Transit: planning guide**. Nova York, 2007. Disponível em: <<https://www.itdp.org/the-brt-planning-guide/>>. Acesso em ago. 2016.

ITDP – Instituto de Política de Desenvolvimento e Transporte. **Os trólebus na cidade de São Paulo: uma análise preliminar**. São Paulo, fev. 2008. Disponível em: <<https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/trolebus-saopaulo.pdf>>. Acesso em out. 2016.

ITDP – Instituto de Política de Desenvolvimento e Transporte. **Avaliação BRT MOVE Cristiano Machado**. Disponível em: <<http://itdpbrasil.org.br/brt-cristianomachado/>>. Acesso em ago. 2016.

JORGENSEN, Mikkell, et al. The state of organic solar cells: a meta analysis. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 119, 2013, p. 84-93.

KAUTTO, Niina. Towards sustainable communities. In: SUSTAINABLE COMMUNITIES FORUM, 2012, Melbourne. **Paper for the sustainable communities forum for local government**. Melbourne, 2012.

KREBS, Fredrick C., et al. Freely available OPV - The fast way to progress. **Energy Technology**, v. 7, p. 378-381, 2013. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.201300057/epdf>>. Acesso em julho de 2016.

KREBS, F. C. The different PV Technologies and how they degrade. In: KREBS, F. C. (Ed.). **Stability and degradation of organic and polymer solar cells**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. p. 1-17.

LOBO, Renato. **Serviço de trólebus completa 66 anos no Brasil**. Via Trólebus, 26 set. 2015a. Disponível em: <<http://viatrolebus.com.br/2015/04/servicosdetrolebuscompl eta66anosnobrasil/>>. Acesso em set. 2016.

LOBO, Renato. **Dual Bus**: ônibus que opera como trólebus e elétrico híbrido. Via Trólebus, 23 set. 2015b. Disponível em: <<http://viatrolebus.com.br/2015/09/dualbus onibusqueoperacomotrolebuseeletricohibrido/>>. Acesso em set. 2016.

LOBO, Renato. **Trólebus ou ônibus híbrido**: veja a comparação dos modais. Via Trólebus, 19 ago. 2014. Disponível em: <<http://viatrolebus.com.br/2014/08/trolebus ouonibushibridovejaacomparacaodosmodais/>>. Acesso em set. 2016.

MADSEN, Morten Vesterager. **Why polimer solar cells**. Disponível em: <<http://plastic photovoltaics.com/lc/lc-polymersolarcells/lc-pol-why.html>>. Acesso em jul. 2016.

MARTIFER SOLAR. **Book of Works**. Disponível em: <http://www.martifersolar.com/downloads/book_of_works/WEB_book_EN.pdf>. Acesso em ago. 2016.

MCCORMICK, Kes et al. Advancing sustainable urban transformation. **Journal of Cleaner Production**, v.50, p.1-11, 2013.

MEDEIROS, Virgílio. **Energia solar**. Belo Horizonte: FUMEC, fev-jun. 2011. Notas de aula.

MEJÍA-DUGAND, Santiago et al. Lessons from the spread of Bus Rapid Transit in Latin America. **Journal of Cleaner Production**, v.50, 2012, p.82-90.

MEJÍA-DUGAND, Santiago. **Diffusion of environmental technology in a megacity: a case study of Mexico City**. 2013. 59 f. Tese (Licenciatura em Environmental Technology and Management) – Linköping University, Linköping.

MORAES, Tatiana. Minas Gerais poderia exportar energia solar. **Hoje em Dia**, Belo Horizonte, 15 fev. 2015. Disponível em: <<http://www.hojeemdia.com.br/horizontes/minas-gerais-poderia-exportar-energia-solar-1.299408>>. Acesso em set. 2016.

MUGERWA, Sydney. **Kayoola Bus EV**: Kiira's Prototype Electric/Solar Hybrid Full Bus Specifications. 2016. Disponível em: <<https://www.dignited.com/17027/kayoola-bus-ev-kiiras-prototype-electricsolar-hybrid-full-bus-specifications>>. Acesso em jul. 2016.

NEIJ, Lena; BULKELEY, Harriet; MCCORMICK, Kes. **Cities and climate change: the great decarbonisation challenge**. Lund: Klimat I Focus, 2014.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. **Research cell efficiency records**. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/ncpv/>>. Acesso em ago. 2016.

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. **Avaliação comparativa das modalidades de transporte público urbano**. Curitiba: Jaime Lerner, 2009

O GLOBO. **Belo Horizonte, a capital solar do país, mas com preço alto**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/belo-horizonte-capital-solar-do-pais-mas-com-preco-alto-6785421>>. Acesso em jul. 2016.

OLIVEIRA, Marília; OLIVEIRA, Orlando; OLIVEIRA, Joaquim. **Mobilidade urbana e sustentabilidade**. V Encontro Nacional da Anppas. Florianópolis, 2010.

PARANAIBA, Guilherme. Belo Horizonte inicia teste de ônibus elétrico com aprovação de passageiros. **Estado de Minas**, 2015. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/12/23/interna_gerais,719736/belo-horizonte-inicia-teste-de-onibus-eletrico-com-aprovacao-de-passag.shtml>. Acesso em jul. 2016.

PARANAIBA, Guilherme. BHTrans inicia testes com ônibus elétrico em linhas do transporte suplementar. **Estado de Minas**, 2016. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/08/12/interna_gerais,793517/bhtrans-inicia-testes-com-onibus-eletrico-em-linhas-suplementares.shtml>. Acesso em jul. 2016.

PARREIRAS, Matheus; LOPES, Valquiria. **Move oferece conforto e rapidez, mas ainda há filas, superlotação e baldeação**. Estado de Minas, mar. 2015. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/03/02/interna_gerais,623053/move-em-mao-dupla.shtml>. Acesso em jul. 2016.

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte. **Belo Horizonte sustainable city**. 2014. Disponível em: <http://www.franceamsud.org/observatorio/images/pdf-20marzo/belohorizonte_sostcity.pdf>. Acesso em jul. 2016.

PORTAL SOLAR. **Usina solar**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html>>. Acesso em ago. 2016.

PORTO, Marco Antônio Dumont. **Perspectivas no mercado de energia fotovoltaica**. In: FÓRUM MINEIRO DE ENERGIA RENOVÁVEL, 1, 2014, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/FORUMMINEIRO2014/Apresentacoes/PAINE_L5/cemig-marco%20aurelio.pdf>. Acesso em ago. 2016.

RAYNERGY TEK. **Raynergy Tek sets world record solution processed single junction OPV PCE 11.51% using halogen-free ink formulation**. Disponível em: <<http://www.raynergytek.com/news.asp>>. Acesso em ago. 2016.

REIS, Lineu Belico do. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2ª ed. Barueri: Manole, 2012.

RIOS, Jaime. **Tecnologia do etanol**. Belo Horizonte: FUMEC, fev. – jun. 2010. Notas de aula.

RMTC – Rede Metropolitana de Transporte Coletivo. **BRT e VLT**: entenda as diferenças. Goiânia, 06 nov. 2012. Disponível em: <<http://www.rmtcgoiania.com.br/blog/2012/11/06/brt-e-vlt-entenda-as-diferencas/>>. Acesso em nov. 2016.

ROES, A. L.; et al. Ex-ante environmental and economic evaluation of polymer photovoltaics. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, n. 17, p. 372-393, mar. 2009.

RODE, Philipp; BURDETT, Ricky. Cities: investing in energy and resource efficiency. In: UNEP. **Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication**. United Nations Environment Programme, p. 453-492, 2011. Disponível em: <<http://eprints.lse.ac.uk/47894/>>. Acesso em ago. 2016.

ROGGE, M.; WOLLNY, S.; SAUER, D. U. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport: a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. **Energies**, n. 8, p. 4587-4606, mai. 2015.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SANTOS, Marco Túlio N. C. M., et al. **ESTUDO DE VIABILIDADE DA CONSTRUÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTÁICA SOBRE O CTR MACAÚBAS**. 2012. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Bioenergética) – Universidade FUMEC, Belo Horizonte.

SINAUTEC. **A sustainable solution for public transportation**. Disponível em: <<http://www.olino.org/us/wp-content/uploads/2009/10/transportation.pdf>>. Acesso em nov. 2016.

SOLOPOWER. **SP3S specifications**. Oregon, 2010. Disponível em: <<http://solopower.com/wp-content/uploads/2014/07/DataSheetSolopanelSP3S.pdf>>. Acesso em nov. 2016.

SOUZA, Ronilson di. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**: livro digital de introdução aos sistemas solares. Ribeirão Preto: Blue Sol Energia Solar, 2016.

SPANGGAARD, Holger; KREBS, Fredrik C. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 83, p. 125-146, jun. 2004.

SUNEW. **Filmes fotovoltaicos orgânicos**: 3ª geração de módulos fotovoltaicos. Apresentação em Power Point. Belo Horizonte, out. 2016.

TOSA – Trolleybus Optimisation Système Alimentation. **TOSA 2013**: flash mobility, clean city, smart bus. 2013. Disponível em: <<http://www.tosa2013.com/#!/tosa2013>>. Acesso em set. 2016.

UNI-SOLAR. Solar laminate PVL-Series: model PVL-144. Michigan, 2009. Disponível em : <<http://www.nooutage.com/pdf/UniSolar-PVL144.pdf>>. Acesso em nov. 2016.

VOYTENKO, Yuliya; et al. Exploring Urban Living Labs for Sustainability and Low Carbon Cities in Europe. **Journal of Cleaner Production**, n. 123, ago. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281293206_Urban_Living_Labs_for_Sustainability_and_Low_Carbon_Cities_in_Europe_Towards_a_Research_Agenda>. Acesso em ago. 2016.

WHITEMAN, Zachary S. et al. Design, operation, control, and economics of a photovoltaic/fuel cell/battery hybrid renewable energy system for automotive applications. **Processes**, v.3, 2015, p.452-470.

WWF. **Belo Horizonte sustainability**. 2014. Disponível em: <http://wwf.panda.org/wwf_news/?228952/Belo-Horizonte-sustainability>. Acesso em jul. 2016.

WWF. **Urban solutions for a living planet**: learning cases. Stockholm, 2013.

ZARIPOVA, Adilya. **100% solar-powered buses arrive in London as UK eyes zero emissions by 2050**. PV Magazine, mar. 2016. Disponível em: <<http://reneweconomy.com.au/2016/100-solar-powered-buses-arrive-in-london-as-uk-eyes-zero-emissions-by-2050>>. Acesso em jul. 2016.

ZOTTIS, Luísa. **Seven ways Belo Horizonte, Brazil inspires sustainable cities**. 2014. Disponível em: <<http://thecityfix.com/blog/seven-ways-belo-horizonte-brazil-inspires-sustainable-cities-luisa-zottis/>>. Acesso em jul. 2016.

APÊNDICE A – Mapa do corredor selecionado para o estudo

