



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE PASSAGEIROS ENTRE DIVINÓPOLIS E BELO HORIZONTE INTEGRADO AO METRÔ-BH

1. INTRODUÇÃO

1.1. Tema do projeto

Ampliação do volume de usuários e abrangência do transporte ferroviário de passageiros na região metropolitana e perimetropolitana de Belo Horizonte, através da viabilidade de implementação de trem de passageiros entre Belo Horizonte e Divinópolis, integrado ao Metrô-BH e utilizando-se da faixa de domínio da Ferrovia Centro Atlântica (FCA).

1.2. Motivações do Projeto

A consolidação das metrópoles e regiões metropolitanas brasileiras acarretou em desafios relacionados à abrangência de cada uma delas. No Brasil com dimensões



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

continentais, as províncias se dividem em áreas territoriais extensas, equivalentes a países, que se subdividem em regionais e sub-regionais. Em Minas Gerais, há uma divisão em dez regionais de planejamento e suas subdivisões. Nesse ínterim, ocorre a formação de "sub-capitais regionais" nas cidades de médio porte, além da capital oficial do estado.

Essas “sub-capitais regionais” dispõem de infraestrutura adequada para atendimento das necessidades dos seus habitantes e mantêm relações socioeconômicas e empregatícias com municípios de menor porte em seus arredores. Isso resulta em desenvolvimento restrito às suas áreas de influência, criando conglomerados urbanos independentes com pouca ou nenhuma interferência de outros conglomerados.

Essa condição de independência pode limitar o desenvolvimento, pois a integração regional é fundamental para o progresso humano. O transporte eficiente é crucial a essa integração por acelerar o desenvolvimento e ampliar o acesso a serviços. Tal cenário acontece entre Divinópolis, conhecida como a capital do Oeste de Minas, e a capital Belo Horizonte.

Esses municípios, distando pouco mais de 100 km, são polos regionais conectados pela Estrada de Ferro-262, que vai de Vitória - ES a Garças de Minas, distrito de Iguatama - MG. O trecho entre Belo Horizonte e Vitória é operado pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), enquanto o trecho entre Belo Horizonte e Garças de Minas, é operado pela FCA, sob administração da Valor da Logística Integrada (VLI). A FCA denomina esse trecho de 155,82 km, entre Belo Horizonte e Divinópolis, como parte do corredor Centro-Leste.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

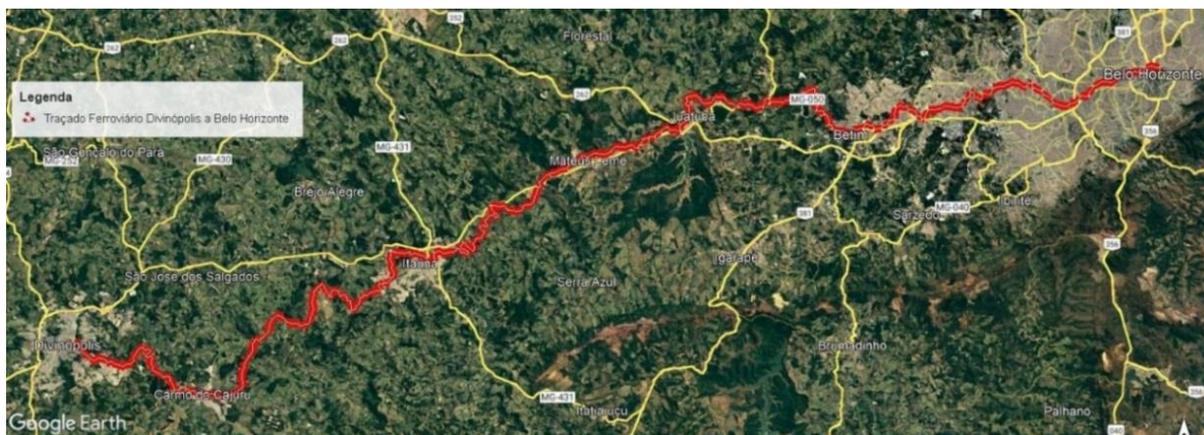


Figura 1 – Traçado ferroviário entre Belo Horizonte e Divinópolis.

Fonte: Google Earth (2022).

Ambas as cidades-polo, Belo Horizonte e Divinópolis, se desenvolvem de forma quase independente, com interação insatisfatória entre seus sistemas e fluxo de pessoas, focando principalmente na troca de mercadorias. O transporte rodoviário de passageiros é uma herança do transporte ferroviário, secularmente consolidado pela Estrada de Ferro Oeste de Minas (EFOM) e, posteriormente, pela Rede Mineira de Viação (RMV).

Apesar da substituição, o transporte rodoviário, especialmente para veículos grandes como ônibus, resulta em viagens demoradas, com duração de aproximadamente duas horas entre as cidades. A redução do tempo de deslocamento é essencial para melhorar a integração regional, uma vez que o modal ferroviário pode oferecer maior agilidade e segurança.

O modal ferroviário, capaz de transportar pessoas com segurança a altas velocidades, é uma solução importante para ampliar o serviço de trens de passageiros para além da capital mineira. Essa solução pode consolidar a integração entre a Sub-regional Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e a Regional Centro-Oeste do estado, que tem Divinópolis como polo.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

1.3. Tipo e Objetivo do Projeto

A proposta em questão, tratou-se de um estudo de caso que avaliou a viabilidade de usar a faixa de domínio da FCA, entre Eldorado (Contagem) e Divinópolis, para a construção ferrovias adequadas ao transporte ágil de passageiros, sem afetar o transporte de cargas. Considerou-se também, a expansão dos serviços metroferroviários no Vetor Oeste de Belo Horizonte, elevando assim, o número de usuários do Metrô-BH e tornando-o mais rentável.

2. DIAGNÓSTICO

2.1. Fundamentação teórica

2.1.1. Características e conceituação do transporte ferroviário

O transporte ferroviário movimenta grandes volumes de carga ou passageiros com alta eficiência energética em longas distâncias. Considerado o mais seguro dos transportes terrestres, a condução guiada pelos trilhos minimiza a ação direta dos condutores e aumenta a segurança operacional (ANTT, 2014).

Lenzion e Pereira (2013, p. 79) destacam que a regularidade do transporte ferroviário se deve à ausência da concorrência de outros veículos nas vias, evitando congestionamentos. Isso torna o transporte de passageiros por trilhos em uma ferramenta essencial à mobilidade urbana, permitindo deslocamentos ágeis, seguros e com alta previsibilidade.

As características do modal ferroviário permitem a operação a altas velocidades com segurança, como nos EUA, Europa e Ásia, reduzindo o tempo de deslocamento e aproximando

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

localidades distantes. Esse desempenho melhora com a otimização do traçado das vias, manutenção da via permanente e material rodante, eliminação de passagens de nível e aumento da potência das locomotivas ou redução da carga rebocada (NABAIS et al., 2014).

Ainda conforme Nabais et al. (2014), o transporte ferroviário de passageiros geralmente utiliza composições curtas ou médias, tipificadas como trens-unidade, de peso médio, com alta capacidade de aceleração e frenagem. Em contrapartida o transporte de cargas utiliza composições longas e pesadas, com aceleração e frenagem graduais.



Figura 2 – Comparativo dimensional típico de trens de carga e de passageiros.

Fonte: Istock (2022).

Infere-se que a operação do transporte ferroviário de passageiros deve ter paradas rápidas e periódicas, com deslocamento ágil e altas velocidades. Em contraste, o transporte de cargas deve ocorrer com o mínimo de interrupções e a velocidades reduzidas, devido ao comprimento e peso elevados dos trens, garantindo segurança e eficiência (SOUZA, 2018).

A NBR 16.387 da ABNT (2020, p. 1) "estabelece a metodologia e critérios para a classificação de uma via ou trecho ferroviário, com velocidade máxima autorizada até 128



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

km/h". A norma inclui requisitos e parâmetros de segurança na geometria da via permanente, influenciando diretamente o desempenho dos trens.

Assim, é estabelecida uma metodologia de classificação da via ferroviária representada pela codificação $X N_A N_B$, onde X indica predominância de trens de carga ou passageiros (P ou C), N_A a velocidade máxima autorizada (variando de 1 a 5 conforme **Tabela 1**) e, N_B a previsão de volume de transporte (variando de 1 a 6 conforme **Tabela 2**) (ABNT, 2020).

Tabela 1 – Velocidade máxima autorizada.

Codificação (NA)	Trens de carga km/h	Trens de passageiro km/h
1	0 a 15	0 a 25
2	16 a 40	26 a 45
3	41 a 64	46 a 95
4	65 a 95	96 a 128
5	96 a 128	Não aplicável

Fonte: ABNT (2020).

Tabela 2 – Previsões anuais de transporte.

Codificação (NB)	Milhões de toneladas brutas (ano)
1	0 a 30
2	31 a 60
3	61 a 90
4	91 a 140
5	141 a 190
6	Acima de 190

Fonte: ABNT (2020).

As atribuições da NBR 16.387 estabelecem parâmetros específicos de classificação viária para a Velocidade Máxima Autorizada (VMA) de 128 km/h, tanto para trens cargueiros quanto para trens de passageiros, sendo o corredor Centro-Leste da FCA classificado como C 3 2. Para que os trens de passageiros possam competir com o transporte rodoviário, a VMA de 128 km/h, considerada média velocidade, é relevante a esse tipo de transporte.

Conforme o Art. 61 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 (Brasil, 1997), a velocidade máxima nas rodovias é de 110 km/h para veículos leves e 90 km/h para veículos pesados, como ônibus e caminhões. Essa velocidade é bem menor que a VMA ferroviária de 128 km/h e, tal condição evidencia a maior competitividade do transporte ferroviário.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.1.2. Material rodante

2.1.2.1. Carros de passageiros

Os veículos destinados ao transporte ferroviário de passageiros são denominados carros e, conforme salienta Nabais et al. (2014, p. 288), “constituem a parcela mais nobre do material rodante rebocado, por suas evidentes características de conforto e segurança [...]”. Apesar de apresentarem o mesmo princípio dos vagões, os carros de passageiros são dotados de sistemas mais complexos para garantia da segurança, bem estar e conforto dos usuários.

De acordo com Nabais et al. (2014, p. 288), os carros de passageiros oferecem ampla versatilidade em serviços. São projetados de acordo com as características operacionais das ferrovias e podem ter diversas funcionalidades, dadas as formações das composições como trens de longa distância ou trens urbanos ou semiurbanos.

Trens de longo percurso possuem carros-poltrona, carros-restaurante, carros-leito e carros-bagageiros para a garantia do conforto dos usuários. Em contraste, trens urbanos e metropolitanos, de menor percurso, têm várias portas largas para facilitar o embarque e desembarque, assentos simples e espaço amplo para passageiros em pé (NABAIS et al., 2014).



Figura 3 – Carros de madeira, de aço inox para trens de longo percurso e trem urbano.

Fonte: Associação Nacional de Transportes Públicos, ANTP (2018).



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Conforme Lucas (2014, p. 41), desde a década de 1960, o transporte ferroviário incorporou a tecnologia de trens de caixa móvel ou pendulares. Essa inovação inclina a caixa dos veículos nas curvas, reduzindo as acelerações laterais. Assim, permite tráfego seguro e confortável em velocidades mais elevadas, facilitando inscrições em curvas acentuadas.

Esse avanço na dinâmica dos trens permite atingir velocidades de cruzeiro mais altas em traçados já existentes de raios menores, evitando a construção onerosa de vias exclusivas para trens de alta velocidade, que requerem raios muito amplos, e possibilitando o tráfego compartilhado entre cargas e passageiros (LUCAS, 2014).

2.1.2.2. Trens-unidade e trens rebocados por locomotivas

Conforme Vaz et al. (2014, p. 241), diferentemente do transporte ferroviário clássico, onde a força tratora está em uma única unidade, a necessidade de manobras rápidas, especialmente em ambientes urbanos, demanda tração descentralizada. Para facilitar manobras de reversão, comandos são instalados em ambas as extremidades dos trens, eliminando a necessidade de locomotivas adicionais na cauda.

Vaz et al. (2014, p. 242) afirma que isso permite que os operadores apenas troquem de cabine nas estações terminais, tornando a operação mais ágil e eficiente. Além disso, destaca as vantagens dos motores distribuídos ao longo das composições. Tal configuração, conhecida como trem-unidade, oferece maior eficiência energética com cargas por eixo menores, reduzindo o desgaste da via, melhorando a aceleração e frenagem, proporcionando maior aderência, especialmente em sistemas urbanos com frequentes paradas e partidas.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 4 – Trens-unidade e Trens rebocados por locomotivas.

Fonte: Stock (2022).

Em observância às descrições de Nabais et al. (2014) e Vaz et al. (2014), no Brasil existem trens-unidade diesel (TUD's) ou elétricos (TUE's). Os TUE's podem ter três carros (um motor e dois reboques), quatro carros (dois motores e dois reboques) ou seis carros (todos motorizados ou com reboques intercalados). Os TUD's, semelhantes aos TUE's, utilizam um ou mais motores diesel com transmissão hidráulica ou elétrica.



Figura 5 – Trem-Unidade Elétrico e Trem-Unidade Diesel.

Fonte: Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) e Trensurb (2022).

2.1.3. Modalidades do transporte ferroviário de passageiros

O transporte ferroviário de passageiros pode ser classificado conforme suas características de transporte, operação, deslocamento e abrangência e, de acordo com Nabais et al. (2014, p. 25):

Os trens de passageiros podem ser classificados como urbanos, intercity e de longa distância. Podem ser paradores, diretos ou expressos, e ainda apresentar linhas exclusivas, como os trens urbanos e os de alta velocidade, ou conviver com os trens cargueiros.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.1.3.1. Trens urbanos

O transporte urbano sobre trilhos divide-se em veículos leves, como VLT e monotrilho, com capacidade de 7.000 a 48.000 passageiros por sentido por hora em trajetos mais curtos. E também, os veículos pesados, como metrô e trens metropolitanos, que têm capacidade de 40.000 a 80.000 passageiros por sentido por hora, operando a 60-90 km/h em trajetos mais longos (CNT, 2016).

A CNT (2016, p. 17) define os trens metropolitanos como sistemas conectando municípios periféricos à metrópole, com estações espaçadas de 1.500 a 2.500 metros. Nos horários de pico, os intervalos variam de 3 a 5 minutos e de 9 a 15 minutos nos horários de vale. Esses trens operam com segregação total nas áreas centrais e parcial nas periféricas, podendo cruzar em nível e sendo alimentados por eletricidade ou diesel.

Os metrôs, segundo a CNT (2016, p. 17), operam em vias totalmente segregadas, predominantemente subterrâneas nas zonas centrais e não subterrâneas nos bairros. As estações são mais próximas, com espaçamento entre 700 a 1.200 metros, e intervalos de 1,5 a 3 minutos, mantendo eficiência fora dos horários de pico. Os metrôs são restritos à dinâmica urbana dentro de um município e são alimentados exclusivamente por eletricidade.



Figura 6 – Metrô e Trem Metropolitano.

Fonte: Metrô CPTM (2019).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.1.3.2. Trens intercidades

De acordo com Moro Júnior (2022), os trens intercidades operam a velocidades médias de 120 km/h a 150 km/h, conectando cidades próximas de até 400 km de distância. São importantes vetores de mobilidade, atendendo apenas as áreas centrais dos municípios. As estações são mais espaçadas do que as dos trens urbanos, permitindo viagens mais rápidas.

Os trens intercidades diferem dos trens urbanos em termos de frequência, capacidade de lotação e velocidade, não trafegando exclusivamente em áreas urbanas. Eles ligam duas regiões populosas, atravessando áreas inabitadas e, conseqüentemente, não urbanizadas, excedendo os limites dos serviços dos trens metropolitanos (NABAIS et al., 2014).

Em concordância a tais considerações, é concomitante também, a definição de trem suburbano da American Public Transit Association (APTA), (1994, p.119, tradução nossa)¹:

Trem suburbano: Operações ferroviárias locais e de trens de passageiros entre uma cidade central, seus subúrbios e/ou outra cidade central. Ele pode ser rebocado por locomotiva ou automotor e é caracterizado por bilhetes para várias viagens, tarifas específicas de estação para estação, prática empregada em ferrovias e geralmente apenas uma ou duas estações no distrito comercial central. Também conhecido como “trem suburbano”.



Figura 7 – Trem intercidades.

Fonte: CorkBeo (2022).

¹ **Rail Commuter:** Railroad local and passenger train operations between a central city, its suburbs and/or another central city. It may be either locomotive-hauled or self-propelled, and is characterized by multi-trip tickets, specific station-to-station fares, railroad employment practices and usually only one or two stations in the central business district. Also known as “suburban rail”.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.1.4. Geometria viária e operação ferroviária simultânea

O transporte ferroviário é constituído por dois subsistemas, sendo um que trata do material circulante que engloba os veículos de tração e rebocados e outro que trata das instalações fixas, que engloba a estrutura viária e seus sistemas, por onde circula o material rodante, denominada via permanente. A via permanente abrange toda a extensão transversal e longitudinal da linha férrea, inclusive as edificações, instalações e estruturas (BRINA, 1988).

Segundo Brina (1988, p.14), ambos os sistemas devem funcionar em perfeita sinergia para garantir a eficiência do transporte ferroviário. A via permanente não só serve como pista de rolagem, mas também suporta e distribui tensões. Portanto, a performance do material rodante está diretamente ligada às condições da via permanente, além de suas características próprias de potência e desempenho, logicamente.

2.1.5. Via permanente

A via permanente ferroviária é o conjunto de elementos e camadas que possibilitam a passagem dos veículos ferroviários de maneira estável e segura, transmitindo os esforços gerados por estes veículos e pelo meio ambiente até a fundação, subdividida em infraestrutura e superestrutura, conforme define Steffler (2013 apud Passos, 2018, p. 18):

A via permanente consiste na estrutura projetada e implantada com a finalidade de receber, suportar e transmitir ao solo os esforços advindos do deslocamento de uma composição, transmitidos através do contato roda-trilho, solicitados predominantemente nas direções vertical e horizontal, sendo possível a sua divisão em dois subgrupos, sendo a infraestrutura e a superestrutura.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

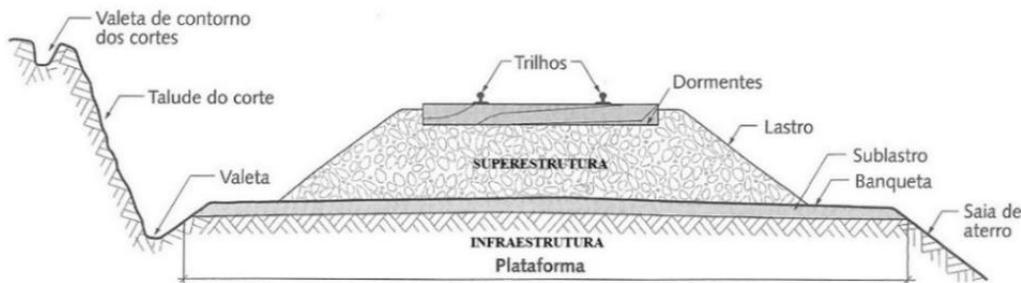


Figura 8 – Seção Transversal da plataforma ferroviária.

Fonte: Nabais et al. (2014).

A infraestrutura ferroviária inclui camadas inferiores ao lastro, denominada plataforma, que abrange terraplanagem, sistemas de drenagem e obras de arte, como pontes, túneis, viadutos, canaletas, bueiros e valetas. Esta base longitudinal é fundamental para a estabilidade da ferrovia, sendo concebida de modo que seja permanente (NABAIS et al., 2014).

O greide e a faixa de domínio são importantíssimos na infraestrutura ferroviária. O greide é o perfil do eixo da ferrovia, incluindo todos os elementos que o definem, enquanto a faixa de domínio é o terreno ao longo da ferrovia, previsto para proteção, futura expansão ou construção de edificações úteis, como galpões, oficinas, etc. (ROSA e RIBEIRO, 2016).

A superestrutura é composta por trilhos, fixações, AMVs, dormentes, lastro e sublastro, que distribuem os esforços das composições e necessitam de renovação ao fim da vida útil. Assim, a via permanente deve ser dimensionada para garantir a estabilidade e transmissão eficiente dos esforços (BRINA, 1988; NABAIS et al., 2014)

Em concordância com Brina (1988, p. 15) e Nabais et al. (2014, p. 20), a bitola é a distância entre as faces internas dos trilhos. No Brasil, predomina a bitola larga de 1,60 metros e a estreita de 1,00 metro, e casos pontuais de bitola mista (1,60 m e 1,00 m). Tal padrão difere bastante da bitola standard de 1,435 metros (padrão mundial), existente no Brasil.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

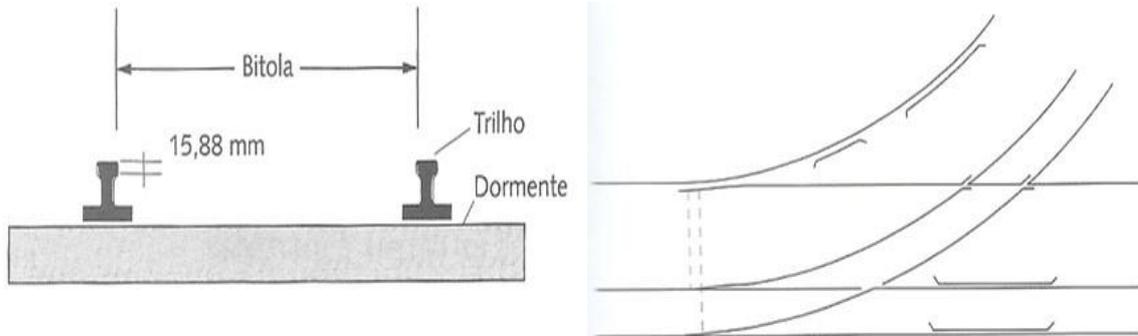


Figura 9 – Bitola ferroviária e detalhe de AMV de bitola mista.

Fonte: Nabais et al. (2014).

A bitola métrica, embora econômica em termos de raios de curva, lastro, dormentes e obras de arte, tem desvantagens como menor capacidade de tráfego e velocidade. Já a bitola larga, apesar do custo mais alto de implementação, proporciona maior estabilidade lateral e longitudinal, sendo conveniente para transporte pesado de cargas e ideal ao transporte de passageiros. Com essa estabilidade conferida, o material rodante de passageiros, que tende a ser mais leve, pode alcançar altas velocidades com segurança (SOUZA, 2018).

2.1.5.1. Geometria de via

Conforme Nabais et al. (2014, p. 228), a eficiência das ferrovias depende da adequação entre as características de tráfego e a geometria da via. A partir da definição do traçado e da bitola, são analisados os aspectos planimétricos e altimétricos em relação ao eixo da via, que é o centro da mesma. Essa análise visa identificar pontos críticos tanto no alinhamento da via (planta) quanto no greide (perfil).

A configuração do eixo é estabelecida por um estudo técnico-econômico que considera a topografia do traçado, o tipo de transporte e suas características (carga moderada com baixa velocidade, carga elevada com baixa velocidade e passageiros com alta velocidade e baixa

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

carga). Embora nem todas as ferrovias atendam exclusivamente a um tipo de transporte, a geometria é ajustada conforme o fluxo predominante de transporte (NABAIS et al., 2014).

De acordo com Porto (2004, p. 10):

As ferrovias têm exigências mais severas quanto às características das curvas que as rodovias. A questão de aderência nas rampas, a solidariedade rodas-eixo e o paralelismo dos eixos de mesmo truque impõem a necessidade de raios mínimos maiores que as rodovias.

As curvas conectam duas tangentes (retas) e podem ser circulares, com raio constante, ou espirais, com raio que varia, facilitando transições suaves. As tangentes, por sua vez, apresentam menor criticidade, já que não possuem raio e não sofrem os efeitos da força centrífuga, permitindo um melhor desempenho dos rodéis ferroviários (PASSOS, 2018).

A criticidade das curvas horizontais exige padrões para raio mínimo e superelevação, afetando a velocidade das composições. O DNIT define um raio mínimo de 400 metros para bitola métrica e a CPTM estabelece raios de 420 metros para traçados novos e 300 metros para existentes na bitola larga (DNIT, 2015; CPTM, 2005).

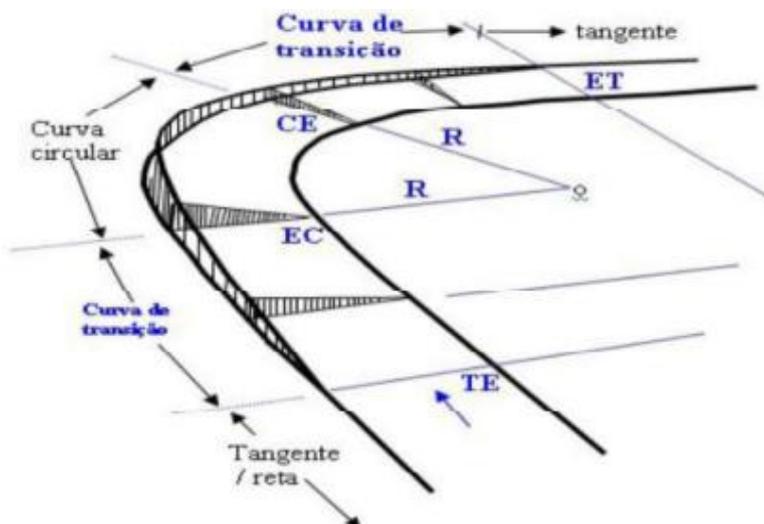


Figura 10 – Curvas horizontais e seus elementos.

Fonte: Ferrovia Centro Atlântica (2009).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A superelevação máxima é definida por cada ferrovia, levando em conta recomendações e o tipo de material rodante. Níveis elevados aumentam o risco de tombamento devido às diferenças de velocidade entre trens. A superelevação é inversamente proporcional ao raio da curva: curvas com maior superelevação têm raios menores e são chamadas de curvas críticas (NABAIS et al., 2014).

Segundo Brina (1988), a norma brasileira permite uma superelevação de até 125 vezes o valor da bitola, resultando em 125 mm para a bitola métrica e 200 mm para a bitola larga de 1,60 m. No entanto, o padrão mais comum era o adotado pela extinta RFFSA, de 1/10 da bitola, com máximos de 100 mm para a bitola métrica e 160 mm para a bitola larga.

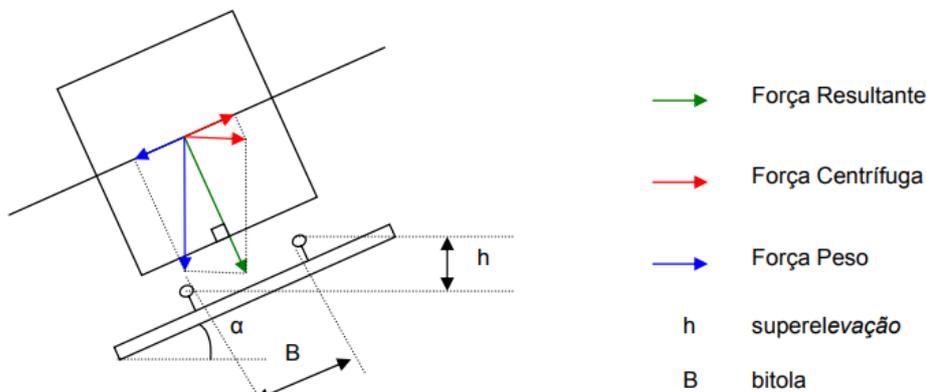


Figura 11 – Superelevação teórica.

Fonte: Porto (2004).

A geometria da via inclui o perfil altimétrico, que analisa a concordância entre curvas verticais e tangentes. No Brasil, curvas verticais com raios de 1500 m são comuns, uma vez que raios maiores melhoram a qualidade, mas aumentam os custos. As retas ou greides de terraplanagem podem ser niveladas ou inclinadas, formando assim as rampas (PASSOS, 2018).

Conforme Passos (2018, p. 25) e Porto (2004, p. 27), rampas influenciam a eficiência ferroviária, afetando a potência dos veículos de tração, a quantidade de veículos rebocados e

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

a velocidade-limite do trecho. Ferrovias de bitola larga, como a Estrada de Ferro Carajás (EFC) de traçado mais novo, têm inclinações máximas de 1%, enquanto as ferrovias de bitola métrica, como a FCA de traçado antigo, têm inclinações de até 3,5%, o que afeta a eficiência.

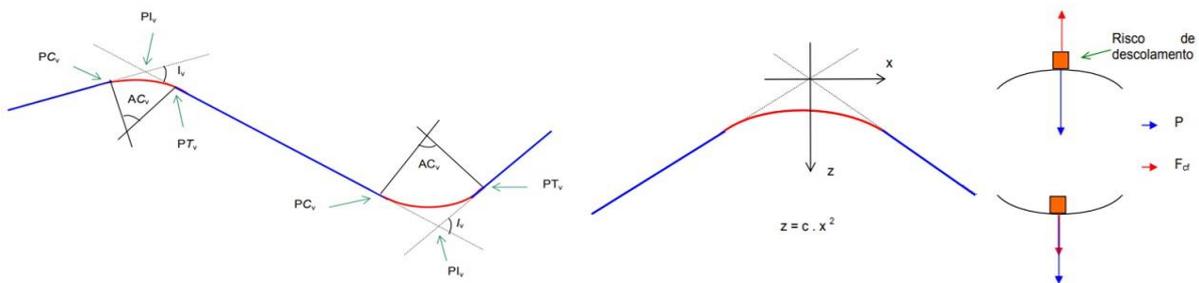


Figura 12 – Concordância vertical e curvas parabólicas.

Fonte: Porto (2004).

A concordância planimétrica e altimétrica das ferrovias, com tangentes e curvas com superelevação, afeta a velocidade-limite, podendo reduzi-la a níveis baixos, como 30 km/h. Conforme definições, são recomendadas curvas horizontais com raios superiores a 300 m e rampas de até 2,7% em regiões montanhosas, o relevo mais desafiador (PORTO, 2004).

2.1.5.2. Operação ferroviária simultânea

O transporte ferroviário de cargas possui características distintas do transporte de passageiros, como comprimento, peso, velocidade e capacidade de frenagem e aceleração, exigindo frequentemente a segregação em vias específicas, especialmente para trens urbanos que seguem padrões rigorosos de regularidade operacional (BRINA, 1988).

No Brasil, algumas ferrovias ainda operam ambos os tipos de composições, predominando o transporte de cargas. Compartilhar vias entre trens de carga e passageiros é complexo, especialmente em ferrovias de via singela e pátios de cruzamento, onde os trens de passageiros circulam com prioridade total sobre os cargueiros (NABAIS et al., 2014).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Para lidar com essa complexidade, o conceito de ultrapassagem dinâmica tem ganhado destaque. Camilo (2022) descreve que esse conceito envolve vias duplicadas ou triplicadas. Os trens de passageiros mais velozes usam a via central para a ultrapassagem dos trens cargueiros mais lentos, permitindo ultrapassagens dinâmicas. Isso promove a eficiência do transporte ferroviário, evitando paradas desnecessárias e facilitando a operação compartilhada.

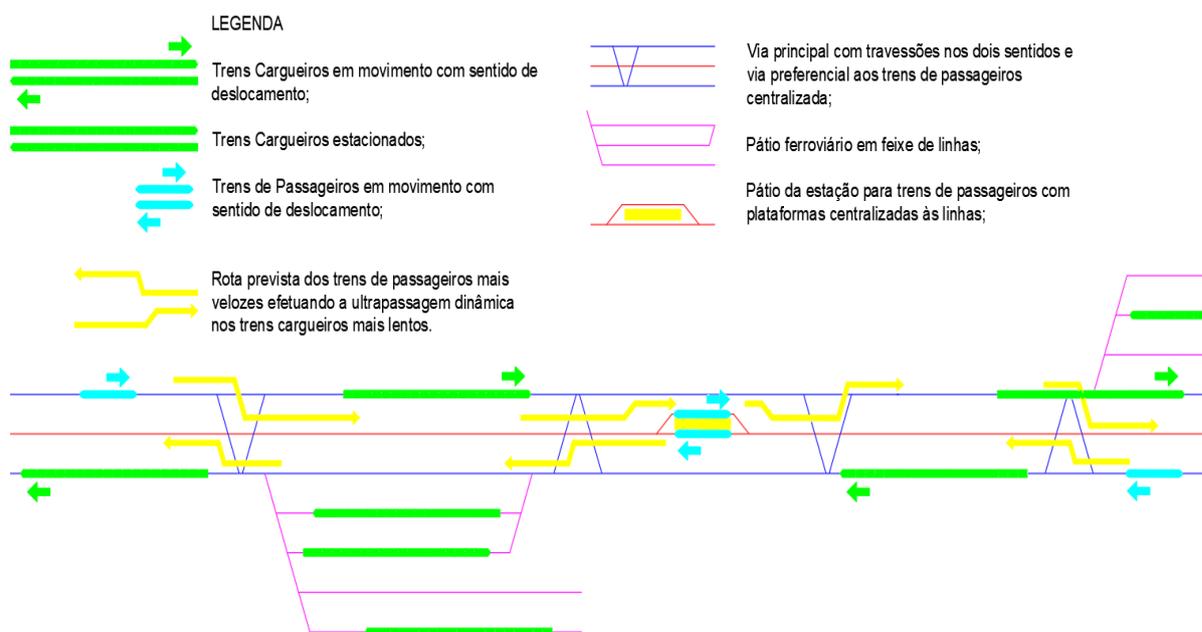


Figura 13 – Esquema de demonstração conceitual de ultrapassagem dinâmica

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

2.1.6. Pátios e estações

Pátios e estações são fundamentais no transporte ferroviário, iniciando e finalizando o transporte de cargas e passageiros. Esses locais devem ter arranjos compatíveis com grandes volumes. Pátios são classificados por suas funcionalidades, e as estações são uma categoria de pátios, geralmente com estruturas semelhantes (NABAIS et al., 2014; BRINA, 1988).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Pátios ferroviários são essenciais para cruzamentos seguros em vias singelas, ultrapassagens e desvios para carregamento e descarga. Também servem para recepção e formação de trens de longa distância, triagem de vagões, transbordo e estocagem, além de estacionamento de composições avariadas ou fora de uso (BRINA, 1988).

O modal ferroviário deve integrar-se a outros modais para alimentar ou distribuir as cargas ou pessoas. Pátios atuam como centrais de recebimento ou distribuição de cargas, com estruturas como armazéns, esteiras e moegas, além de oficinas de manutenção e equipes de via, sinalização e sistemas elétricos (DNIT, 2015; HERMONT, 2013).

De acordo Borges Neto (2012, p. 166), estações, assim como pátios, viabilizam o embarque e desembarque de passageiros. Podem ter pátios com múltiplas linhas para permitirem a parada de vários trens sem comprometer o tráfego na via principal. São usadas ainda, para o estacionamento e cruzamento de composições ou sistemas de reversão em pontos terminais.



Figura 14 – Pátio de estação ferroviária e gare.

Fonte: Férias Tur (2013).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

As estações, diferentemente dos pátios, possuem plataformas longas, adequadas ao comprimento das composições, além de edifícios com sala de espera, áreas para bagagens, bilhetagem, salas para agentes e seguranças, lojas e serviços. Estações em sedes municipais devem ter estrutura para atender ao grande fluxo de usuários e facilitar a integração com outros modais para transporte dos passageiros ao destino final (BORGES NETO, 2012).

2.1.7. Demanda

Conforme conceitua e define Ventura (2012):

Demanda de transportes é a quantidade de pessoas que possuem o desejo de deslocar a si próprio, outras pessoas ou mercadorias de um lugar para outro em um determinado dia e horário através de uma despesa “x” [...]. Ou seja, seria o equivalente a “procura” por sistemas de transportes. [...] a demanda de transportes não seria a quantidade de pessoas que simplesmente desejam utilizar uma determinada rota ou modalidade de transporte, mas sim a quantidade de pessoas que possuem esse desejo apoiados por poder de compra. [...] pode-se dizer que a demanda de transportes geralmente é motivada pela necessidade das pessoas de realizarem outras atividades, tais como: trabalho, estudo, compras, turismo, lazer, etc. [...].

A conexão entre centros urbanos de alta densidade por transporte coletivo expande o alcance dos serviços ofertados à população de cada um deles, ajustando a demanda conforme as necessidades e a oferta. Os sistemas de transporte visam integrar atividades urbanas, facilitando a locomoção de bens e pessoas. Isso promove o desenvolvimento humano, social e econômico das regiões, melhorando a qualidade de vida dos usuários (VENTURA, 2012).

Como estipula Campos (2007, p.6), a demanda por transporte pode ser altamente diferenciada (variando com o tempo e propósito), derivada (para satisfazer necessidades no destino) e concentrada (elevada em horários específicos, como picos). A demanda transferida

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

avalia a atratividade de modais concorrentes, enquanto a demanda induzida refere-se aos novos usuários motivados por novos projetos de transporte.

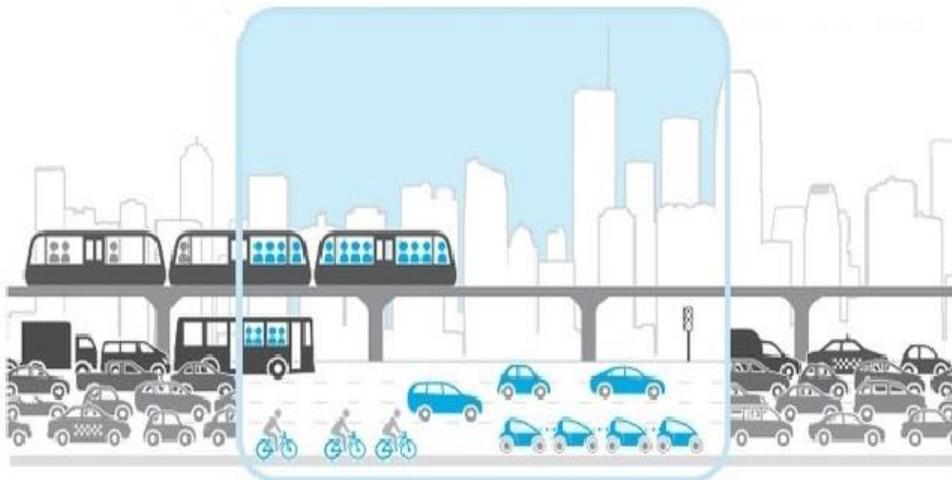


Figura 15 – Mobilidade urbana.

Fonte: Mobilize (2014).

Em áreas com sistemas de transporte estabelecidos, os usuários tendem a se adaptar à oferta existente, gerando demanda reprimida e latente que poderia ser atendida com uma oferta mais adequada. Concomitante a isso, é possível estimar a demanda de uma região considerando-se a quantidade de viagens ofertadas pelo modal já existente através do volume de carga dos veículos, porém essa estimativa não reflete a demanda real, que inclui a demanda reprimida (VENTURA, 2012).

De acordo com Ventura (2012, p.34), erros nas estimativas de demandas podem levar ao desperdício de recursos, quando o volume de usuários transportados não paga o investimento, ou a capacidade dos sistemas implementados é insuficiente para atendimento. O equilíbrio entre oferta e demanda é delicado e difícil de alcançar devido às variações entre previsões e demanda real, exigindo técnicas e pesquisas detalhadas para minimizar erros, sendo uma margem de erro impossível de eliminar.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.2. Base de dados e atividades desenvolvidas

2.2.1. Características físicas e geométricas do trecho da FCA

Tabela 3 – Nomenclatura e abreviações dos pátios ferroviários de Divinópolis a Contagem.

Pátio	Abreviação	Pátio	Abreviação
Divinópolis, km 744,853	EDV	Azurita, km 822,784	EZU
Helio Torres, km 754,203	EHT	Mateus Leme, km 830,456	EML
Carmo do Cajuru, km 763,212	ECJ	Juatuba, km 840,068	EJU
Amoras, km 768,455	EYE	Vianópolis, km 851,862	EVN
Angicos, km 778,615	EAG	Betim, km 862,763	ECN
Engenheiro Gordilho, km 784,550	EGD	Couto e Silva, km 871,410	EYB
Santanense, km 796,044	ESS	Embiruçu, km 876,000	EYU
Padre Eustáquio, km 804,600	EEQ	Bernardo Monteiro, km 880,451	EBO
Silva Oliveira, km 816,000	ESQ	Eldorado, km 887,497	EEL

Fonte: ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres e VLI (2022).

Tabela 4 – Extensão, curvas e rampas de Divinópolis a Contagem (Eldorado).

Pátios		Extensão (km)	Bitola	Rampa Máxima (%)	Raio Mínimo de Curva (m)	Raios de Curvatura (m)							
Pátio A	Pátio B					R > 100	100 a 150	150 a 200	200 a 250	250 a 300	300 a 350	350 a 400	R < 400
EDV	EHT	9,35	Métrica	0,01	150	0	5	11	2	5	1	1	0
EHT	ECJ	9,009	Métrica	0,01	155	0	4	8	5	1	3	1	0
ECJ	EYE	5,243	Métrica	0,02	155	0	1	4	9	2	4	0	0
EYE	EAG	10,16	Métrica	0	157	0	0	10	1	6	2	1	1
EAG	EGD	5,935	Métrica	0	332	0	4	5	7	1	0	1	1
EGD	ESS	11,494	Métrica	0,03	103	0	13	14	5	3	1	3	1
ESS	EEQ	8,556	Métrica	0,01	82	1	3	13	5	7	0	1	1
EEQ	ESQ	11,4	Métrica	0,03	103	0	18	11	4	2	2	1	1
ESQ	EZU	6,784	Métrica	0,03	125	0	2	11	13	2	2	0	1
EZU	EML	7,672	Métrica	0,01	176	0	1	3	11	4	4	0	3
EML	EJU	9,611	Métrica	0,01	219	0	3	7	9	2	2	1	3
EJU	EVN	11,794	Métrica	0	194	0	3	17	17	5	5	0	1
EVN	ECN	10,901	Métrica	0	273	0	0	8	12	2	7	1	1
ECN	EYB	8,647	Métrica	0,01	240	0	0	6	9	5	2	0	0
EYB	EYU	4,59	Mista	0	226	0	0	1	2	2	0	3	0
EYU	EBO	4,451	Mista	0,01	97	1	0	9	3	0	3	0	0
EBO	EEL	7,045	Mista	0,01	185	0	1	5	4	1	0	1	2
Total		142,642	-	-	-	2	58	143	118	50	38	15	16

Fonte: ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres e VLI (2022).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 5 – Pontes e passagens em nível de Divinópolis a Contagem (Eldorado).

Pátios		Pontes	Tipo de Via	Extensão (m)	Passagens em Nível	Tipo de Via	
Pátio A	Pátio B					Não Singela	Singela
EDV	EHT	2	Singela	60 e 30	4	1	3
EHT	ECJ	2	Singela	120 e 15	6	2	4
ECJ	EYE	0	-	0	5	2	3
EYE	EAG	0	-	0	6	2	4
EAG	EGD	0	-	0	2	0	2
EGD	ESS	0	-	0	4	0	4
ESS	EEQ	2	Singela	50 e 40	16	1	15
EEQ	ESQ	1	Singela	40	3	0	3
ESQ	EZU	1	Singela	25	5	3	2
EZU	EML	0	-	0	5	0	5
EML	EJU	1	Singela	40	9	3	6
EJU	EVN	2	Singela	55 e 140	8	1	7
EVN	ECN	2	Singela	35 e 100	6	0	6
ECN	EYB	1	Singela	20	7	1	6
EYB	EYU	0	-	0	1	1	0
EYU	EBO	0	-	0	1	0	1
EBO	EEL	0	-	0	0	0	0
Total		14	-	770	88	17	71

Fonte: ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres e VLI (2022).

Tabela 6 – Transposições e ocupações da faixa de domínio de Divinópolis a Contagem.

Pátios		Transposições		Quantidade de Vias Transpostas		Extensão (m)	Trechos com Ocupação da Faixa de Domínio	Tipo de Via		Extensão (m)
Pátio A	Pátio B	Inferiores	Superiores	Não Singela	Singela			Não Singela (m)	Singela (m)	
EDV	EHT	0	1	4	0	15	1	0	1000	1000
EHT	ECJ	0	0	0	0	-	2	180	480	660
ECJ	EYE	0	1	0	1	15	1	0	458	458
EYE	EAG	0	0	0	0	-	0	0	0	0
EAG	EGD	0	0	0	0	-	0	0	0	0
EGD	ESS	0	0	0	0	-	0	0	0	0
ESS	EEQ	1	1	0	2	15 e 15	2	2490		2490
EEQ	ESQ	0	0	0	0	-	0	0	0	0
ESQ	EZU	0	2	0	2	10 e 35	0	0	0	0
EZU	EML	0	2	0	2	7 e 7	0	0	0	0
EML	EJU	0	2	2	0	25 e 25	0	0	0	0
EJU	EVN	1	1	0	2	31 e 12	0	0	0	0
EVN	ECN	0	0	0	0	-	1	0	1500	1500
ECN	EYB	0	2	2	0	15 e 18	0	0	0	0
EYB	EYU	1	2	4	1	18, 18 e 19	1	1000	0	1000
EYU	EBO	2	2	5	2	*30, 55 e 1	1	405,81	0	405,81
EBO	EEL	0	3	2 e 6	1	30, 10 e 12	1	0	340,05	340,05
Total		5	19	-	-	482	10	4075,81	3778,05	7853,86

Fonte: ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres e VLI (2022).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.2.2. Arrecadação tarifária e volume de usuários do Metrô-BH e do transporte coletivo no trecho abordado

Tabela 7 – Indicadores Anuais da Operação do Metrô-BH.

Indicadores	Ano		
	2017	2018	2019
Volume de Usuários	58.794.482	58.402.870	54.444.130
Custo Total	R\$ 261.016.000,00	R\$ 274.824.000,00	R\$ 265.308.000,00
Tarifa Nominal	R\$ 1,80	R\$ 1,80	R\$ 2,67
Tarifa Efetiva Média	R\$ 1,56	R\$ 1,60	R\$ 2,15
Arrecadação Tarifária	R\$ 91.506.000,00	R\$ 93.480.000,00	R\$ 115.140.000,00
Receita Não Operacional	R\$ 6.559.000,00	R\$ 7.596.000,00	R\$ 8.052.000,00
Receita Total	R\$ 98.065.000,00	R\$ 101.076.000,00	R\$ 123.192.000,00

Fonte: CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos (2022).

Tabela 8 – Volume mensal de viagens entre os municípios metropolitanos abordados.

Deslocamento		Volume de Viagens Mensais	
Origem	Destino	2019	2021
Betim	Belo Horizonte	444.622	271.737
	Betim	6.026.797	4.008.475
	Contagem	830.723	647.253
	Juatuba	48.386	45.367
	Mateus Leme	13.403	14.825
Contagem	Belo Horizonte	2.881.080	2.107.634
	Contagem	7.912.350	6.671.017
	Juatuba	11.420	11.797
	Mateus Leme	5.493	6.876
Juatuba	Belo Horizonte	23.630	16.809
	Juatuba	159.782	299.689
	Mateus Leme	77.055	62.958
Mateus Leme	Belo Horizonte	11.075	12.196
	Mateus Leme	163.009	132.012

Fonte: Ag. de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, Matrizes Origem-Destino (2021).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 9 – Volume de viagens diárias do transporte coletivo no trecho abordado.

Municípios abrangidos pelo sistema proposto		Linhas Urbanas	Número de Viagens Diárias		
			Dias Úteis	Sábado	Domingo e Feriado
Betim	Municipais	20, 30, 34, 40, 50, 53, 54 A, 54 B, 60, 61, 70, 90 A, 90 B, 131, 160 A, 160 B, 180 A, 180 B, 191, 210 A, 210 B, 260 A, 260 B, 261, 270, 313, 314 A, 314 B, 315 A, 315 B, 410, 411, 412, 414, 415, 450, 450 B, 710 A, 710 B, 830 A, 830 B, 830 C, 910 A, 910 B, 920	2888	1472	724
	Metropolitanos	1710, 3200, 3205, 3206, 3210, 3211, 3220, 3245, 3265, 3270, 3275, 3280, 3285, 3291, 3292, 3293, 3299, 3303, 3305, 3306, 3310, 3328, 3329, 3336, 3338, 3340, 3343, 3344, 3347, 3349, 3350, 3353, 3354	670	346	112
		3297 - Betim/Belo Horizonte Via Residencial Lagoa	18	16	8
		3298 - PUC Betim/Belo Horizonte	22	18	14
		3304 - Betim/Belo Horizonte - Via Expressa	4	0	0
Contagem	Municipais	101 A, 101 B, 102, 103 R, 174, 301 A, 301 C, 301 E, 302 A, 302 B, 302 C, 302 D, 302 E, 305 A, 305 B, 305 D, 307 B, 402 A, 402 B, 474, 570	1172	574	292
	Metropolitanos	1600, 1620, 1621, 1630, 1640, 1650, 1661, 1670, 1671, 1700, 1720, 1910, 2550, 2560, 2570, 2571, 2590, 2740, 2760, 2761	756	374	146
		2580 - Eldorado/Belo Horizonte	62	26	0
Itaúna	3805 - Itaúna/Mateus Leme	2	0	0	
	3805-1 - Itaúna/Boas Vista	4	0	0	
	3805-2 - Itaúna/Juatuba	48	2	0	
Juatuba	3950 - Juatuba/Azurita	120	60	42	
	3968 - Juatuba/Estação Eldorado	2	2	0	
Mateus Leme	3956 - Azurita/Mateus Leme/Juatuba/Belo Horizonte	68	36	32	
	3957 - Mateus Leme/Estação Eldorado	102	72	60	
	3960 - Mateus Leme/Estação Eldorado Via Av. Serra Azul	8	4	0	
	3967 - Mateus Leme/Betim	98	74	42	
Linhas Convencionais (Ônibus Rodoviários/Executivos)					
Betim	3212 - Betim/Belo Horizonte (Via Expressa)	80	26	18	
	3214 - Belo Horizonte/Rodoviária Betim/Decamão (Via Expressa)	2	0	0	
Carmo do Cajuru	Carmo do Cajuru/Divinópolis	58	50	36	
Divinópolis	Divinópolis/Belo Horizonte	28	28	26	
	Divinópolis/Itaúna	14	8	8	
Itaúna	Itaúna/Belo Horizonte	44	44	38	
	Itaúna/Carmo do Cajuru	4	2	0	

Fonte: DER/MG – Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais, TRANSBETIM, TRANSCON, Viação Itaúna e Viação Teixeira (2022).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Os dados da **Tabela 8** acima apresentam os números totais de viagens em cada município, obtido pelo rastreamento de conexão do sistema de telefonia móvel da operadora Vivo, sem especificar o meio de transporte utilizado. Já os dados da **Tabela 9**, mostram a contagem diária de viagens das linhas intermunicipais e municipais de transporte coletivo que competem ou podem alimentar o sistema ferroviário proposto.

2.2.3. Dados diagnósticos situacional do trecho ferroviário adotado

As imagens abaixo fornecem amostras pontuais da disposição física do trecho da FCA compreendido entre Divinópolis e Contagem (Eldorado) e, demonstram também, as condições da faixa de domínio, das passagens em nível, de trechos sinuosos e de conflitos em áreas urbanizadas.



Figura 16 – Traçado sinuoso, Bairro das Graças, Itaúna - MG.

Fonte: Google Earth (2022).



Figura 17 – Ocupação da faixa de domínio na área central de Itaúna - MG.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 18 – Trecho sinuoso atravessando região urbanizada em Betim - MG.
Fonte: Google Earth (2022).



Figura 19 – Ocupação da faixa de domínio no Bairro Santa Inês, Betim - MG.
Fonte: Google Earth (2022).

3. ANÁLISE DE DADOS E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

3.1. Análise das características geométricas do trecho abordado

Na **Tabela 10** abaixo observa-se que das 440 curvas entre Divinópolis e Contagem (Eldorado), 35,50% têm raios médios de 150 a 250 metros, e 26,82% têm raios entre 100 e 150 metros. O traçado altimétrico mostra pouca variação, de 0 a 0,03% de inclinação e notam-se também, as 88 passagens em nível e 24 transposições inferiores e superiores.

O trecho inclui 14 pontes totalizando 770 metros, destacando-se as pontes sobre os rios Itapecerica (Divinópolis), Pará (Carmo do Cajuru), São João (Itaúna), Paraopeba (Juatuba), Betim (Betim). Além disso, cerca de 8 km da faixa de domínio estão ocupados por urbanização nos municípios de Divinópolis, Itaúna, Carmo do Cajuru, Betim e Contagem.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 10 – Estratificação das disposições e geometria ferroviária de Divinópolis a Eldorado.

Quantidade de Pátios de Cruzamento	18								
Quantidade de Trechos Entre Pátios	17								
Extensão Total de Dvinópolis a Betim (km)	120,41	Extensão Total de Betim a Eldorado (km)			27,234	Extensão Total de Betim a Belo Horizonte (km)			40,087
Extensão Total de Eldorado à Estação Central (km)	12,853			Extensão Total de Divinópolis à Estação Central (Belo Horizonte) (km)			155,497		
Ocorrência de Bitola Métrica Entre Pátios	14				Ocorrência de Bitola Mista Entre Pátios			3	
Raios de Curva (m)	R > 100	100 a 150	150 a 200	200 a 250	250 a 300	300 a 350	350 a 400	R < 400	
	2	58	143	118	50	38	15	16	
Rampa Máxima Entre Pátios (%)	i=0		i=0,01		i=0,02		i=0,03		
	5		8		1		3		
Quantidade de Pontes em Via Singela	14						Extensão Total (m)	770,00	
Transposições	Passagens em nível	88	Via Singela	17		-			
			Via Não-singela	71					
	Inferiores	5	Via Singela	3					
			Via Não-singela	2					
			Via Singela	11					
Superiores	19	Via Não-singela	8						
		4.075,81						7.853,86	
Trechos com Ocupação da Faixa de Domínio	Via Singela (m)	4.075,81							
	Via Não-singela (m)	3.778,05							

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2. Análise da receita tarifária do Metrô-BH, do volume de usuários transportados pelo transporte coletivo e especulação de demanda

Conforme a **Tabela 11** abaixo, observa-se uma redução de mais de 4 milhões de usuários do Metrô-BH entre 2017 e 2019, sistema que a época, dispunha de uma média mensal de mais de 4,5 milhões de usuários transportados. Ao mesmo tempo, evidencia-se o aumento na arrecadação tarifária, devido ao reajuste tarifário iniciado em janeiro de 2019, que chegou a R\$ 4,50 em março de 2021 e a R\$ 5,50 em julho de 2024.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 11 – Síntese da variação anual dos indicadores do Metrô-BH.

Indicadores Anuais	Ano			Diferença		
	2017	2018	2019	2018-2017	2019-2018	2019-2017
Volume de Usuários	58.794.482	58.402.870	54.444.130	-391.612	-3.958.740	-4.350.352
Tarifa Efetivada	R\$ 1,80	R\$ 1,80	R\$ 1,80; R\$ 2,40; R\$ 2,90; R\$ 3,40 e R\$ 3,70	R\$ 0,00	R\$ 0; R\$ 0,60; R\$ 1,10; R\$ 1,60 e R\$ 1,90	R\$ 0; R\$ 0,60; R\$ 1,10; R\$ 1,60 e R\$ 1,90
Arrecadação Tarifária	R\$ 91.506.000,00	R\$ 93.480.000,00	R\$ 115.140.000,00	R\$ 1.974.000,00	R\$ 21.660.000,00	R\$ 23.634.000,00
Receita Não Operacional	R\$ 6.559.000,00	R\$ 7.596.000,00	R\$ 8.052.000,00	R\$ 1.037.000,00	R\$ 456.000,00	R\$ 1.493.000,00
Receita Total	R\$ 98.065.000,00	R\$ 101.076.000,00	R\$ 123.192.000,00	R\$ 3.011.000,00	R\$ 22.116.000,00	R\$ 25.127.000,00
Custo Total	R\$ 261.016.000,00	R\$ 274.824.000,00	R\$ 265.308.000,00	R\$ 13.808.000,00	-R\$ 9.516.000,00	R\$ 4.292.000,00
Receita Total-Custo Total	-R\$ 162.951.000,00	-R\$ 173.748.000,00	-R\$ 142.116.000,00	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Além disso, a elevação variável do custo total do sistema, junto ao crescimento da receita, não reduz significativamente a diferença entre custo e arrecadação. Essa discrepância não soluciona a condição deficitária do Metrô-BH, compensada por repasses do governo federal, pois a CBTU, estatal pública federal, era operadora do Metrô-BH até meados de 2022.

Tabela 12 – Estratificação de capacidade mensal do transporte coletivo.

Municípios	Linhas Convencionais (Ônibus Rodoviários)	Número de Viagens Diárias			Capacidade Média de Lotação dos Veículos	Média de dias por mês		Capacidade Total Mensal
		Dias Úteis	Sábados	Domingos e Feriados		Dias Úteis/Mês	Sábados e Domingos/Mês	
Betim	2	82	26	18	45	22	4	89.100
Carmo do Cajuru	1	58	50	36	45			72.900
Divinópolis	2	42	36	34	45			54.180
Itaúna	2	48	46	38	45			62.640
Municípios	Linhas Urbanas (Ônibus Urbanos)	Dias Úteis	Sábados	Domingos e Feriados	-	Dias Úteis/Mês	Sábados e Domingos/Mês	-
Betim	Municipais	45	2888	1472	724	22	4	2.892.800
	Metropolitanas	36	714	380	134			1.332.300
Contagem	Municipais	21	1172	574	292			1.462.400
	Metropolitanas	21	818	400	146			1.513.500
Itaúna	3	54	2	0	75			89.700
Juatuba	2	122	62	42	75			232.500
Mateus Leme	4	276	186	134	75			551.400
Capacidade Total	139	6274	3234	1598	-			8.353.420
Total Metropolitana	131	6072	3100	1490	-	8.074.000		

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Já demanda estimada, conforme a **Tabela 12**, baseia-se na capacidade média dos veículos e no volume de viagens nos dias úteis, sábados e domingos. Considerando a média mensal de 4 sábados, 4 domingos e 22 dias úteis, estimou-se a capacidade total mensal de deslocamentos. Embora não considere a demanda reprimida, a análise é confiável, pois se baseia na capacidade de transporte instalada, ajustada para variações sazonais pontuais.

A **Tabela 12** acima revela também, que são necessárias várias linhas de ônibus para o atendimento de mais de 8,3 milhões de usuários por mês. Contagem e Betim concentram mais de 7 milhões desses usuários, enquanto Juatuba e Mateus Leme somam 780 mil, complementando a demanda da RMBH, e Divinópolis, Itaúna e Carmo do Cajuru contribuem com 270 mil usuários mensais.

Tabela 13 – Síntese Matrizes Origem-Destino RMBH.

Deslocamento		Volume de Viagens Mensais		Diferença	Total	
Origem	Destino	2019	2021		2019	2021
Betim	Betim	6.026.797	4.008.475	-2.018.322	7.363.931	4.987.657
	Outros	1.337.134	979.182	-357.952		
Contagem	Contagem	7.912.350	6.671.017	-1.241.333	10.810.343	8.797.324
	Outros	2897993	2126307	-771.686		
Juatuba	Juatuba	159.782	299.689	139.907	260.467	379.456
	Outros	100.685	79.767	-20.918		
Mateus Leme	Belo Horizonte	11.075	12.196	1.121	174.084	144.208
	Mateus Leme	163.009	132.012	-30.997		
Total		-	-	-	18.608.825	14.308.645

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De acordo com os dados apresentados na **Tabela 13** acima, as viagens realizadas em 2019 representam mais de 50% do total de viagens efetuadas nas linhas que abrangem o entorno da via férrea nos municípios metropolitanos. Destaca-se também a maior frequência

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de deslocamentos dentro de um mesmo município em comparação com as viagens intermunicipais. O volume total mensal de viagens intermunicipais e internas em cada município revela a demanda reprimida existente.

3.3. Análise das imagens diagnóstico



Figura 20 – Proposta de retificação de traçado, Bairro das Graças, Itaúna – MG.

Fonte: Google Earth (2022).

A **Figura 20** acima destaca o traçado sinuoso com curvas consecutivas em sentidos opostos, entre Itaúna-MG e Carmo do Cajuru-MG, com possibilidade de retificação, devido à ausência de limitações físicas. Na imagem, o traçado real da FCA é mostrado em amarelo, e o traçado retificado alternativo, em vermelho. Propõe-se assim, mitigar as curvas desnecessárias em trecho similares ao longo da ferrovia, e assim, aumentar a velocidade.

A **Figura 17** (seção 2.2.3) mostra que a duplicação e triplicação da via férrea são limitadas pela urbanização na faixa de domínio, exigindo desapropriações. Em contraste, a **Figura 19** (seção 2.2.3) revela uma desobstrução parcial que permite a implantação de vias paralelas, e facilidades de ajustes como a eliminação da passagens em nível.

Analisando-se a **Figura 21** abaixo, que destaca o traçado sinuoso existente da FCA em Betim (vermelho) e o traçado alternativo que reduz as curvas (amarelo), evidencia-se a viabilidade de melhorar a geometria da via elevando os raios de curvas estreitas e retificando

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

trechos onde as limitações físicas permitem. Pequenas correções de traçado, dada a inserção em regiões urbanizadas, são alternativas viáveis para melhorar o desempenho dos trens, necessitando apenas de cortes, aterros e obras de arte especiais ocasionalmente.



Figura 21 – Traçado alternativo reduzindo a quantidade curvas consecutivas, Betim - MG.
Fonte: Google Earth (2022).

A adequação de vias férreas para o transporte de passageiros requer curvas com raios superiores a 150 m para permitir velocidades médias mais altas e eliminar gargalos operacionais. No entanto, a densa urbanização e características do relevo, como vales e montanhas, limitam as melhorias no traçado, já que desapropriações e obras elevam significativamente os custos dos projetos.

Na **Figura 22** abaixo, da Estação de Azutira, em Mateus Leme – MG, observa-se uma plataforma em ilha, situada entre os trilhos, com vias paralelas às de acesso. Este design é adequado para a ultrapassagem dinâmica, como mostrado na **Figura 13** na seção **2.1.5.2**. A via central, dedicada aos trens de passageiros, permite a parada de várias composições sem interrupção do tráfego dos trens cargueiros nas vias laterais, possibilitando a coexistência das duas modalidades de transporte ferroviário na mesmo trecho.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 22 – Estação de Azurita, Mateus Leme – MG.

Fonte: Estações Ferroviárias do Brasil (2022).

4. CONCLUSÕES

As características geométricas do traçado secular existente entre Divinópolis e Contagem, com passagens em nível e urbanização desordenada, limitam a implementação de velocidades na ordem de 128 km/h. Atualmente, os trens cargueiros que operam nesse trecho desempenham entre 45 e 50 km/h, segundo a declaração de rede da FCA.

A média mensal de usuários do Metrô-BH e a capacidade de arrecadação tarifária, em comparação com a demanda especulada e a capacidade do transporte rodoviário existente, mostram que a extensão até Divinópolis pode dobrar o volume de usuários do Metrô-BH, tornando-o mais abrangente e atrativo.

Logo, a expansão do transporte ferroviário de passageiros é vital para a sustentabilidade do Metrô-BH e o desenvolvimento dos municípios envolvidos, podendo atender a uma população de mais de 3,7 milhões de habitantes, conforme censo do IBGE. No entanto, para competir com o transporte rodoviário, é necessário reduzir o tempo de deslocamento, o que exige o aumento da velocidade operacional das composições.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 14 – Estimativa populacional para 2021.

Municípios	População em 2022	Municípios	População em 2022
Belo Horizonte	2.315.560	Divinópolis	231.091
Betim	411.846	Itaúna	97.669
Carmo do Cajuru	23.479	Juatuba	30.716
Contagem	621.863	Mateus leme	37.841
Total	3.770.065		

Fonte: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024).

Aumentar a velocidade de tráfego exige ações corretivas em todo o traçado, como a eliminação de curvas restritivas, passagens em nível e resolução de conflitos urbanos. Também é necessária a implementação de bitola mista para maior estabilidade dos trens de passageiros, o que envolve obras significativas como pontes, túneis e viadutos, além de cortes e aterros, que acabam elevando o custo do projeto.

Adicionalmente, o transporte ferroviário de cargas existente em bitola métrica, limita a agilidade dos trens de passageiros. Para coexistirem, a solução seria a utilização do sistema de ultrapassagem dinâmica e implementar um Trem Intercidades entre Divinópolis e o edificável Terminal Betim, operando a 128 km/h, num trecho de aproximadamente 115 km de extensão, com menor frequência de trens e estações centrais nas sedes dos municípios.

Para complementação da rota, considerando o espaço disponível na faixa de domínio de Betim a Eldorado e a demanda de mais de 7 milhões de usuários mensais, seria adequada a implementação de um Trem Metropolitano com velocidade máxima de 90 km/h, seguindo o projeto original do Metrô-BH da década de 1980. Isso incluiria a construção da Linha 2 do Metrô-BH, ligando Calafate ao Barreiro que se integraria à Linha 1, para criar um sistema metroviário de Vilarinho ao Barreiro de 32 km, de abrangência restrita a Belo Horizonte.

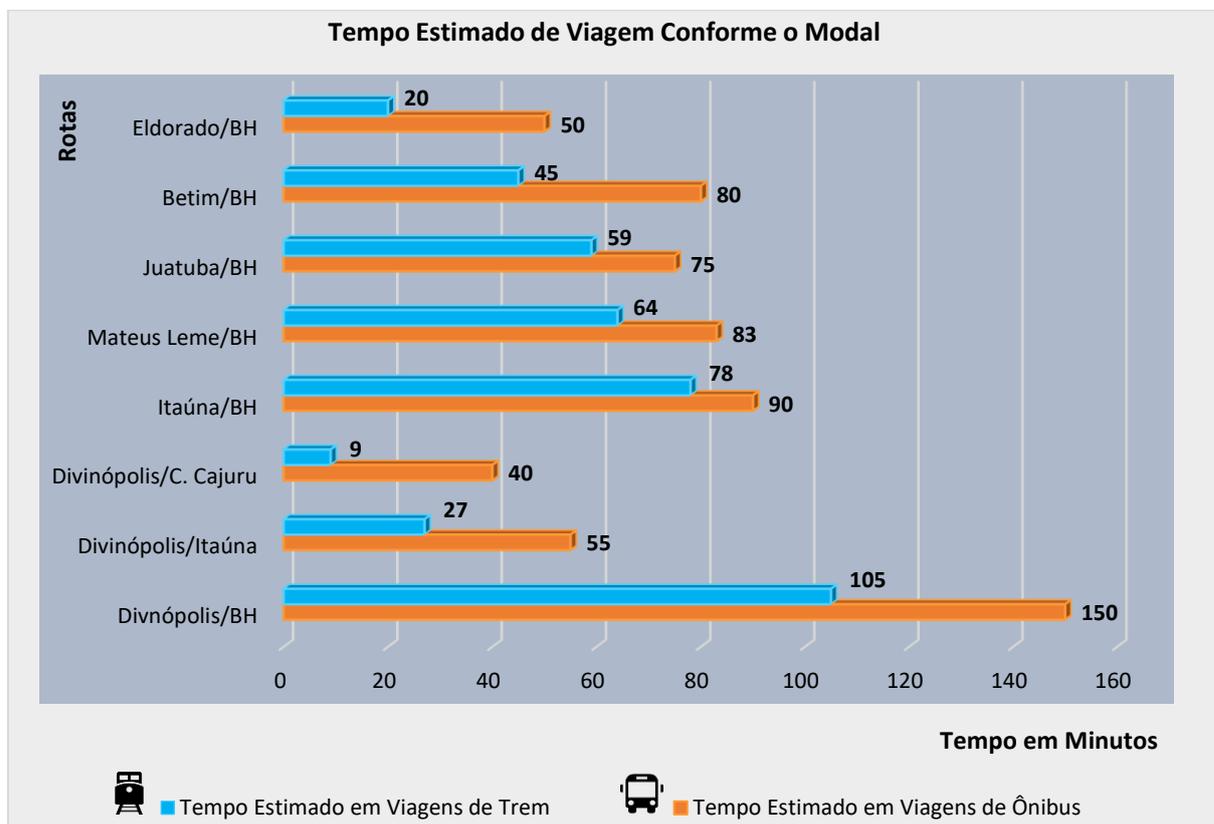
30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O trecho entre as estações Central e Eldorado seria então incorporado ao Trem Metropolitano, com as estações Central, Lagoinha, Carlos Prates, Calafate e Nova Suíça compartilhadas com o sistema Vilarinho - Barreiro. A operação do mesmo iniciaria-se na Estação Central no hipercentro de Belo Horizonte, que dispõe de 4 plataformas e três linhas, e percorreria 40 km até a edificável Estação Terminal Betim no bairro Santa Inês, Betim – MG.

A proposta conecta Betim e Contagem ao hipercentro de Belo Horizonte, criando um sistema metroferroviário eficiente e interligado ao Metrô-BH. Além disso, promove a integração de Juatuba, Mateus Leme, Itaúna, Carmo do Cajuru e Divinópolis ao sistema de trens regionais, reduzindo o tempo de deslocamento e expandindo as opções.

Gráfico 1 – Comparativo de tempo de duração de viagens entre ônibus e trem.



Elaborado pelo autor (2022).

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16387: Via férrea** – Classificação de vias. Rio de Janeiro, 2020. 31 p.

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE. **Matrizes Origem e Destino da Região Metropolitana de Belo Horizonte**: novembro de 2019 e maio de 2021. Institucional Governo de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<http://www.agenciambh.mg.gov.br/bi-matrizes-origem-destino/>>. Acesso em: 30 out. 2022.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Transporte Ferroviário**. Institucional. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://appweb2.antt.gov.br/carga/ferroviario/ferroviario.asp>>. Acesso em: 16 jul. 2022.

APTA, American Public Transit Association. **1992 Transit Fact Book**. Washington, DC, 1992. 66 p. Disponível em: <<https://www.apta.com/wp-content/uploads/Resources/resources/statistics/Documents/FactBook/APTA-1992-Transit-Fact-Book.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2022.

BORGES NETO, Luiz Otávio. **Estudos de Engenharia Ferroviária: Teoria e Prática**. 1 ed. São Paulo: Oficina dos Textos. 2012. 360 p.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Código de Trânsito Brasileiro (CTB)**. Lei Nº 9.503 de 23 de Setembro de 1997. Brasília: 1997. Disponível em: <<https://www.ctbdigital.com.br/artigo/art61>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de Ferro: Via Permanente**. 2 v. Belo Horizonte: UFMG, 1988. 270 p.

CAMILO, Jorge Braz. **Ultrapassagem Dinâmica**. [Vídeo Aula de apoio à disciplina Sinalização e Sistemas Especiais Ferroviários, lecionada no curso de Pós Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária no Centro Universitário Estácio de São Paulo]. Disponível em: <https://sis.posestacio.com.br/AreaAluno/v4/cronograma/assistir.php?ID_Atividade=313031&p=1>. Acesso em 15 ago. 2022.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CAMPOS, Vânia Barcelos Gouvêa. **Apostila de planejamento de Transportes: Conceitos e modelos de análise.** Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.marcusquintella.com.br/sig/lib/uploaded/Planejamento%20de%20Transportes%20-%20V%C3%83%C2%A2nia%20Campos.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

CNT – Confederação Nacional dos Transportes. **Transporte metroferroviário de passageiros.** Brasília, 2016. 149 p. Disponível em: <<https://cnt.org.br/transporte-metroferroviario-de-passageiros>> Acesso em: 10 out. 2022.

CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. **Recapacitação da Linha F: Relatório ambiental preliminar – RAP.** V. 4. São Paulo, 2005. 309 p. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/917651468014401847/pdf/E17550vol040T-EXTO.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

<<https://documents1.worldbank.org/curated/en/917651468014401847/pdf/E17550vol040T-EXTO.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT). Ministério dos Transportes. Diretoria de Infraestrutura Ferroviária (DIF).

_____. **Instrução de Serviço Ferroviário - 209: Projeto de Pátios Ferroviários.** Brasília, 2015. 17 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-218-projeto-de-patios-ferroviarios.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

_____. **Instrução de Serviço Ferroviário - 209: Projeto Geométrico.** Brasília, 2015. 17 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-209-projeto-geometrico.pdf/view>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

Google Earth Website, 2022. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 26 out. 2022.

HERMONT, Liliana Delgado. **Oferta e demanda de transportes integrados: um estudo de caso em Belo Horizonte.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. 180 f. Disponível



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

em: < <https://www.ufmg.br/pos/geotrans/images/stories/diss034.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <http://https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal>. Acesso em 24 jul. 2024.

LENDZION, Eloá; PEREIRA, Márcia de Andrade. **Apostila de Sistemas de Transportes**. Departamento de Transportes – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013. 195 p. Disponível em: <http://www.projeta.com.br/imagens_arquivos/artigos/files/arquivos/EngTransp/Apostila-Sistemas%20De%20Transportes-2013.pdf>. Acesso em 01 ago. 2022.

LUCAS, Felipe Rabay. **Influência do uso de trens de caixa móvel na implantação e operações de novas ferrovias**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. 296 p. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/t>>

MORO JÚNIOR, Ênio. **Trem Intercidades: aposta no transporte de passageiros**. Intermodal Digital, 30 mar. 2022. Disponível em: <<https://digital.intermodal.com.br/nt-expo/trem-intercidades-aposta-no-transporte-de-passageiros>>. Acesso em 03 ago. 2022.

NABAIS, Rui José da Silva et al. **Manual básico de engenharia ferroviária**. Associação Brasileira de Pavimentação. 1 ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2014. 351 p.

ROSA, Rodrigo de Alvarenga; RIBEIRO, Rômulo Castello Henriques. **Estradas de ferro: Projeto, Especificação & Construção**. 2 ed. Vitória: EDUFES, 2016. 352 p. Disponível em: <<https://edufes.ufes.br/items/show/562>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

PASSOS, Washington Luís. **Geometria de Via Permanente: Um fator determinante para a velocidade de uma composição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Centro Universitário do Cerrado Patrocínio. Patrocínio, 2018. 44 p. Disponível em: <https://www.unicerp.edu.br/ensino/cursos/engenhariacivil/monografias/2018/GEOMETRIA_DEVIAPERMANENTE.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

PORTO, Telmo Giolito. **Apostila de Ferrovias** (Departamento de Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004. 81 p. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAFeiMAC/apostila-ferrovias>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

SOUZA, Letícia de. **Transporte ferroviário de passageiros: análise da implantação do modo nas cidades**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018. 109 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/191847/Transporte%20ferrovi%C3%A1rio%20de%20passageiros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

STEFFLER, Fábio. **Via Permanente Aplicada: Guia teórico e Prático**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2013.

VAZ, Luiz Felipe Hupsel et al. **Transporte sobre trilhos no Brasil: uma perspectiva do material rodante**. **BNDES**, Rio de Janeiro, v.1, n. 40, p. 235-282, mar./set. 2014. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2782>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

VENTURA, Thaís dos Santos. **Procedimento metodológico para a estimativa de demanda transferida em sistemas de transporte ferroviário de passageiros com características semiurbana: Estudo de Caso do trecho Florianópolis (SC) – Itajaí (SC)**. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012. 238 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/99225/302343.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

VFCO – VIAÇÃO FÉRREA CENTRO OESTE. **RMV – Rede Mineira De Viação: Linha de Garças de Minas a Belo Horizonte**. 2022. Disponível em: <<http://vfco.brazilia.jor.br/estacoes-ferroviarias/1960-sudeste-RMV/linha-Garcas-Minas-Belo-Horizonte.shtml>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

6. APÊNDICE - LINHAS COM ESTIMATIVAS DOS TEMPOS DE VIAGEM

