

5º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 1

**AVALIAÇÃO DE UMA NOVA LINHA PARA O SISTEMA METROVIÁRIO EM BELO
HORIZONTE SOB A ÓTICA DE CAPACIDADE E DEMANDA**

AUTORES

INTRODUÇÃO

Belo Horizonte é a terceira maior metrópole do Brasil, com uma população de 5.915.536 habitantes na Região Metropolitana e Colar Metropolitano, sendo 2.523.794 apenas no município segundo estimativa do IBGE (2017). Apesar disso, ainda sofre com os efeitos de um sistema de transporte ineficaz. Segundo a pesquisa Origem e Destino (AGENCIA RMBH, 2012) mais recente disponível, diariamente são realizadas mais de 13 milhões de viagens, porém apenas cerca de 2% desse total são realizadas com o metrô. A população depende majoritariamente de ônibus para se locomover pela região metropolitana, enfrentando superlotação, insegurança e congestionamentos. Como consequência, o tempo de viagem

médio dos transportes coletivos tem aumentado, passando de 42 minutos em 2002 para 62 minutos em 2012 (DA COSTA, 2013). Por esses motivos o transporte individual vem apresentando uma participação cada vez maior na matriz modal. Entre 2002 e 2012, a participação do transporte coletivo caiu de 60% do total de viagens realizadas por transportes motorizados em Belo Horizonte, para apenas 36%, o que representa uma queda de 24 pontos percentuais em apenas 10 anos (DA COSTA, 2013). Em uma tentativa de modernização e otimização do transporte público foram implantados dois corredores de Transporte Rápido por Ônibus (BRT) em 2014, porém a capacidade e integração limitadas tornam esse modo uma solução inadequada a longo prazo.

Quando comparada a outras cidades de porte semelhante em países desenvolvidos e em desenvolvimento, constata-se que Belo Horizonte está defasada no transporte ferroviário. Cidades como Boston e Washington D.C. nos Estados Unidos; Sydney e Melbourne na Austrália; Ankara na Turquia; Montréal no Canadá; Barcelona na Espanha; São Petersburgo na Rússia; Berlim na Alemanha, guardadas as devidas proporções, possuem sistemas de transporte ferroviário de maior abrangência e significância que Belo Horizonte.

O Metrô-BH começou a ser implantado em 1981, em faixa de domínio da antiga RFFSA. Por este motivo a linha é, em sua maior parte, em nível e não atende as regiões de maior demanda nos bairros por onde passa. A linha atual, com 28,2 km e 19 estações, teve a sua última estação entregue no ano de 2002 e os planos de expansão encontram-se paralisados desde então. Há um projeto com estudos iniciados e aguardando liberação de verbas e decisões políticas para a implantação de duas novas linhas e a extensão da atual linha 1 em Contagem (METROMINAS, 2012). Espera-se que nos próximos anos este projeto seja

concretizado, o que possibilitará que o metrô se torne a espinha dorsal do transporte público em BH e não mais um modo isolado como atualmente. Ainda assim, a área contemplada pelo projeto de expansão deixa de fora importantes centros geradores de demanda e regiões inteiras da cidade, notadamente as regiões Noroeste e Oeste (figura 1). Há necessidade, portanto, de se projetar eixos prioritários de expansão do metrô para as próximas décadas, para adequar a oferta do transporte público ao crescimento da população e da demanda por transporte.

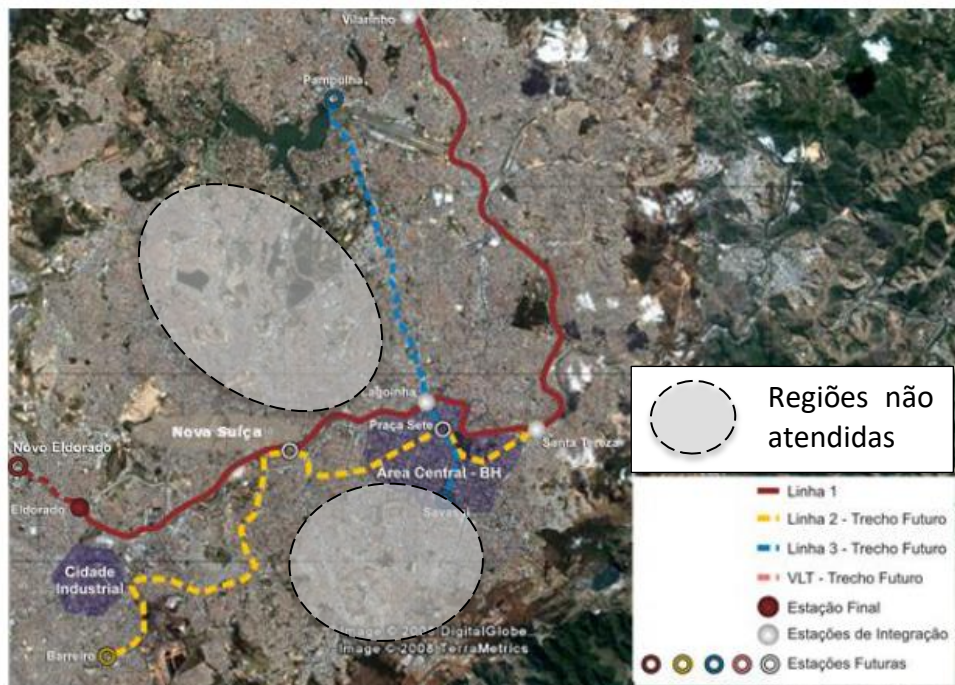


Figura 1 – Configuração futura prevista para o Metrô-BH e regiões não atendidas. (METROMINAS, 2012).

Currie e Delbosc (2013) analisam 101 rotas de BRT, Veículos Leves sobre Trilhos (VLT) e bondes na Austrália, Europa e América do Norte, com o objetivo de determinar se os diferentes modos influenciam o número de viagens realizadas. Após teste envolvendo diversas variáveis, eles chegam à conclusão que o modo em si não influencia

significativamente a escolha dos usuários, que é mais afetada pelo nível de serviço. Porém, é importante ressaltar que a capacidade dos veículos apresenta significativa influência no número de passageiros das rotas, e que em quase todos os casos os veículos dos BRTs tem capacidades inferiores aos menores VLTs. Isso representa um importante limitador para a ampliação da capacidade em sistemas de BRTs. Como consequência deste e outros fatores, como a localização das rotas, BRTs em geral apresentam movimentações consideravelmente menores que os modos ferroviários. O estudo corrobora estudos prévios ao afirmar que a densidade de habitantes e de empregos, bem como a integração tarifária plena, são importantes fatores que influenciam positivamente a quantidade de passageiros que utilizam o transporte público.

É essencial para a melhoria dos transportes na RMBH que haja integração tarifária e maior nível de conforto e confiabilidade nos modos de transporte público. Para que isso ocorra deve-se buscar a otimização de rotas e a troncalização, preferencialmente através de modos de alta capacidade nos principais eixos. Do ponto de vista institucional, é imprescindível para o bom funcionamento do sistema que haja uma autoridade metropolitana única para gerir toda a rede, ao contrário do modelo separado entre as esferas municipal, estadual e federal que vigora atualmente. Esta centralização permitirá a unificação das políticas de transporte, beneficiando os usuários e minimizando os custos de operação e suas externalidades. As vantagens deste modelo integrado advêm, dentre outros pontos, de: racionalização dos custos de transporte, reorganização espacial da cidade, redução da interferência com o trânsito, redução dos índices de poluição ambiental, redução do número de acidentes de trânsito, melhoria do conforto para o usuário e ampliação da acessibilidade (ANTP, 2007).

Ao analisar o sistema de metrô de Toronto, Derrible (2012) conclui que o sucesso do sistema está diretamente relacionado a políticas públicas de uso do solo mais eficazes, que a tornam uma das regiões urbanas mais densas da América do Norte, e também a uma ótima integração tarifária com os ônibus, que servem como alimentadores. Com 69 km de trilhos, o metrô de Toronto está na média de comprimento dos sistemas do continente, porém é seis vezes menor que o maior sistema (New York City Subway, com 397 km), três vezes menor que o imediatamente acima (Chicago metro, com 167 km), e apenas o dobro do tamanho da menor rede considerada (Cleveland metro, com 31 km). Apesar de sua extensão consideravelmente pequena para a população da região metropolitana de 5,5 milhões de habitantes, o metrô de Toronto apresenta um desempenho visivelmente superior à média da América do Norte em número de passageiros por km-receita e hora-receita de veículos, e também por km de linha, demonstrando a importância do planejamento urbano integrado.

Frente aos problemas observados e a necessidade crescente por mobilidade na RMBH, propõe-se uma nova linha de metrô conectando as zonas Noroeste e Pampulha com as zonas Oeste e Sul de Belo Horizonte, integrada com a linha 1, existente e as linhas 2 e 3, projetadas.

DIAGNÓSTICO

1. Locais de Interesse.

A linha proposta busca atender regiões da cidade que não são atendidas pelo plano de expansão do metrô em Belo Horizonte nas regionais Pampulha, Noroeste, Centro-Sul e

Oeste. A intenção é criar novas possibilidades de viagem, e atender grandes polos geradores de demanda como a futura estação BhBus São José, os arredores da Lagoa da Pampulha, os corredores das avenidas Dom Pedro II e Carlos Luz, bairros do hipercentro, e bairros com alta densidade populacional das regiões Centro-Sul e Oeste como Anchieta e Buritis. Propõe-se a criação de uma linha com dois ramos em cada extremidade, os quais se unem em uma só via no trecho central, permitindo um *headway* menor e consequente maior capacidade no trecho que atende o hipercentro. Este modelo de operação é comum em linhas de metrô em vários sistemas nacionais e internacionais. Exemplos incluem Brasília, Recife, Estocolmo, Londres, dentre outros. Esta sugestão é compatível com a demanda observada no transporte coletivo, como pode ser visto na Figura 2, que mostra o carregamento no transporte coletivo municipal para o pico da manhã, com as áreas a serem atendidas circuladas.

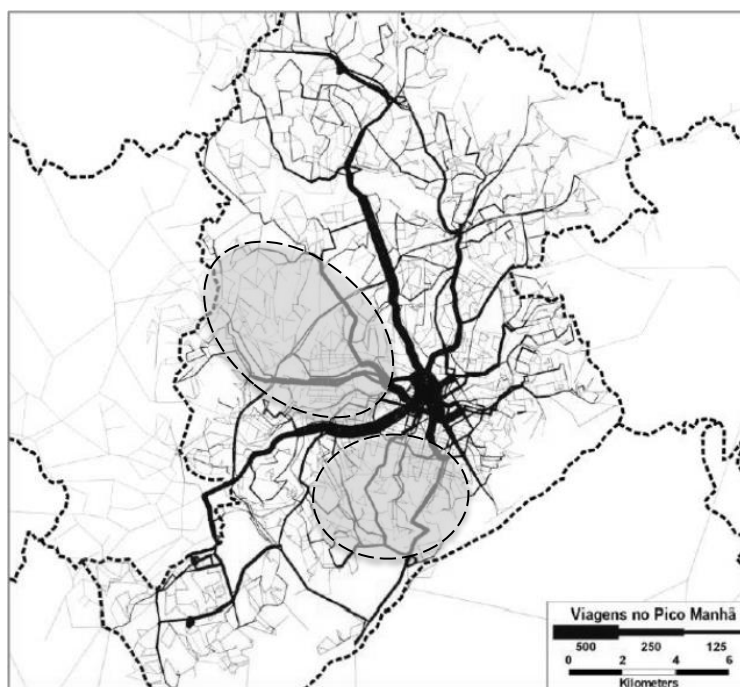


Figura 2 – Quantidade de viagens no transporte coletivo municipal no pico da manhã. (DA COSTA, 2013)

Foram analisados pontos geradores de demanda e pontos de referência importantes para a localização proposta para as estações, buscando mantê-las o mais equidistantes possível.

Depois de identificados os principais locais de interesse, foram propostas 22 estações para a Linha 4, apresentadas na figura 3.

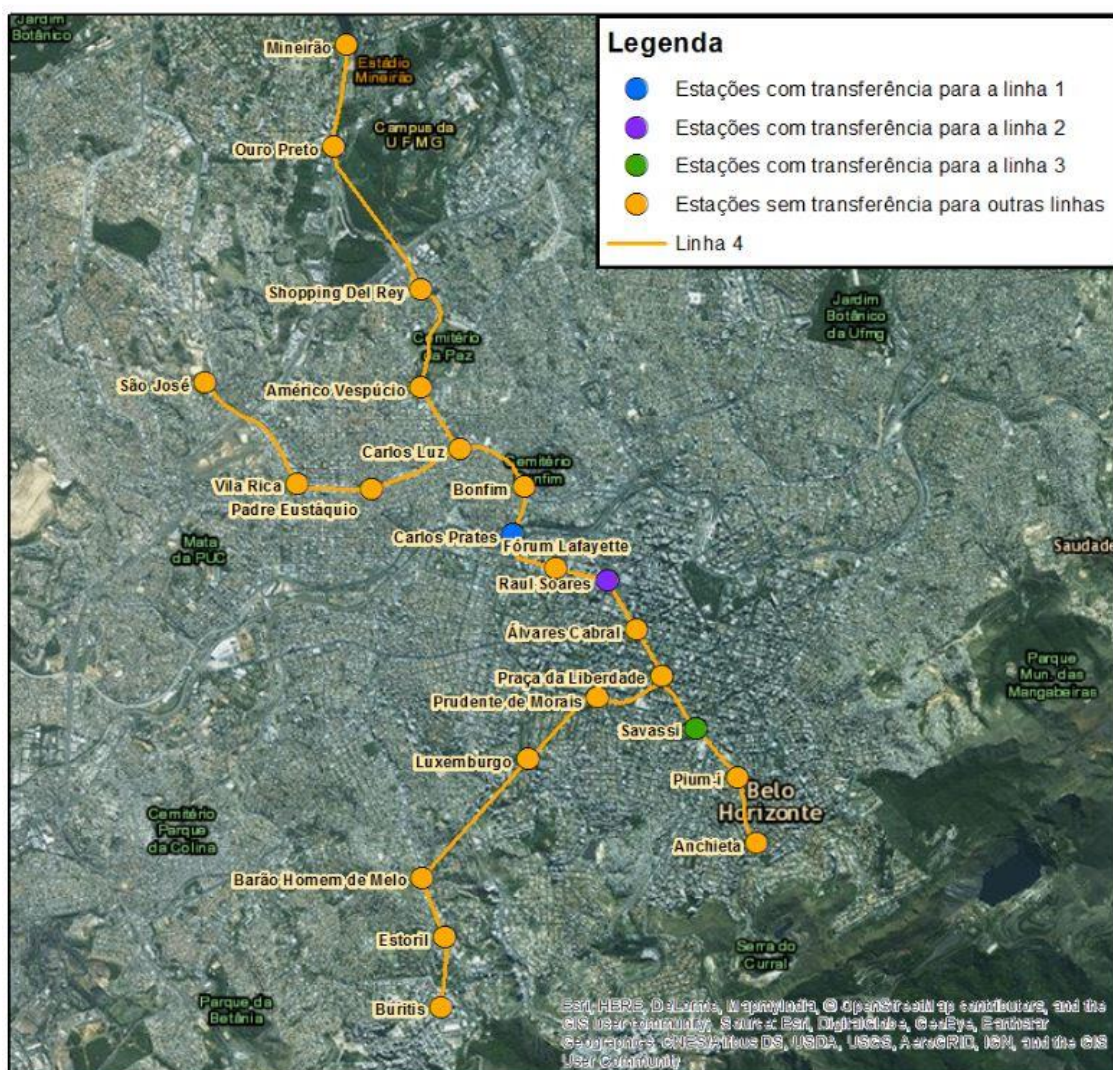


Figura 3 – Localização das estações propostas para a Linha 4 sobre imagem de satélite.

As estações propostas são: Mineirão, Ouro Preto, Shopping Del Rey, São José, Vila Rica, Padre Eustáquio, Carlos Luz, Bonfim, Carlos Prates (Integração com a Linha 1), Fórum Lafayette, Raul Soares (Integração com a Linha 2), Álvares Cabral, Praça da Liberdade,

Savassi (Integração com a Linha 3), Pium-í, Anchieta, Prudente de Moraes, Luxemburgo, Barão Homem de Melo, Estoril e Buritis.

2. Análise de Declividades.

Com os locais das estações definidos, considerou-se a cota do terreno para análise das declividades nos trechos, assumindo-se uma profundidade média constante das estações. Observou-se que em três trechos a declividade entre estações superou 4%, que é o máximo recomendado para linhas metroviárias (DJOKO, 2014), necessitando de mudanças na profundidade das estações. A tabela 1 apresenta os resultados desta análise.

Tabela 1: Declividades dos trechos entre estações da Linha 4

	Estação de origem	Dist. até a seguinte (m)	Cota Terreno (m)	Declividade Trecho (%)	Correção de Profundidade (m)	Declividade corrigida (%)
Ramal Buritis	Buritis	851,6	939	1,76		1,76
	Estoril	774,8	924	3,10		3,10
	Barão Homem de Melo	1937,0	900	-2,63		-1,34
	Luxemburgo	1170,1	951	6,07	-25	3,93
	Prudente de Moraes	917,1	880	-1,09		-0,55
	Praça da Liberdade	-	890	-		-
Ramal Anchieta	Anchieta	856,9	962	4,90	-10	3,73
	Pium-í	780,9	920	2,05		2,05
	Savassi	801,8	904	1,75		2,37
	Praça da Liberdade	636,9	890	4,40	-5	3,61
Trecho Central	Álvares Cabral	693,0	862	0,58		0,58
	Raul Soares	637,7	858	0,47		0,47
	Fórum Lafayette	795,0	855	1,26		1,26
	Carlos Prates	612,0	845	-1,80		-1,80
	Bonfim	1004,4	856	-1,59		-1,59
Ramal São José	Carlos Luz	1179,2	872	-0,42		-0,42
	Padre Eustáquio	921,5	877	-1,19		-1,19
	Vila Rica	1720,5	888	0,64		0,64
	São José	-	877	-		-
Ramal Mineirão	Carlos Luz	895,9	872	-2,01		-2,01
	Américo Vespúcio	1348,8	890	2,22		2,22
	Shopping Del Rey	2062,3	860	0,97		0,97
	Ouro Preto	1253,3	840	2,87		2,87
	Mineirão	-	804	-		-

a) Estação Luxemburgo - estação Prudente de Moraes:

Para que o trecho se enquadre no limite máximo de declividade, é necessário que a estação Luxemburgo tenha 25 m a mais de profundidade que a média das demais estações, o que é compatível com o desnível observado entre a Avenida Raja Gabaglia e ruas próximas. Dessa maneira a declividade do trecho passa a ser 3,93%.

b) Estação Anchieta – estação Pium-í:

É necessário que a estação Anchieta tenha 10 m a mais de profundidade que a média, de forma que a declividade passe a ser 3,73%.

c) Estação Praça da Liberdade – estação Álvares Cabral:

A estação Praça da Liberdade precisa ser construída com 5 m a mais de profundidade que a média das outras estações, para que a declividade do trecho seja 3,61%.

3. Tempo de Viagem Entre Estações.

Os trens do Metrô-BH possuem uma velocidade máxima de 90 km/h, limitada atualmente a 80 km/h segundo a CBTU. No entanto, esta velocidade só é alcançada em trechos mais longos, pois há um tempo de aceleração e desaceleração, que pode ser calculado por:

$$t_{acc} = \frac{v_{max}}{a} \quad \text{(equação 1)}$$

Onde:

t_{acc} = tempo de aceleração ou desaceleração em [s];

v_{max} = velocidade máxima em [m/s];

a = valor da aceleração / desaceleração (igual a 1m/s²).

Para estações próximas entre si nem sempre é possível atingir a velocidade máxima desejada. De fato, v_{max} só será atingida para distâncias entre estações maiores que 378 m para 70 km/h, 494 m para 80 km/h e 625 m para 90 km/h. Dessa forma, na área central, onde as estações estão mais próximas entre si (entre 600 e 800 m), mesmo com uma sinalização mais moderna que permita maiores velocidades, pode se considerar uma velocidade máxima de serviço de 80 km/h como na linha 1, que necessita de curvas de raio menor, o que torna a construção mais econômica.

Para estimar o tempo de viagem total entre estações é necessário calcular o tempo de viagem à velocidade máxima, que pode ser obtido através das fórmulas:

$$t_{vmax} = d_{vmax}/v_{max} \quad (\text{equação 2})$$

em que

$$d_{vmax} = d_{inter} - 2 * d_{acc} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

t_{vmax} = tempo percorrido na velocidade máxima, em [s];

d_{vmax} = distância percorrida na velocidade máxima, em [m];

d_{inter} = distância entre estações, em [m];

d_{acc} = distância de aceleração, em [m].

O tempo de viagem total entre as estações (t_{inter}) será:

$$t_{inter} = t_{vmax} + 2 * t_{acc} \quad (\text{equação 4}).$$

As distâncias entre as estações foram calculadas utilizando o software ArcGIS versão 10.4, considerando a distância entre os centros das plataformas. Em seguida, calculou-se o tempo de viagem entre estações utilizando as equações 1 a 4. Para trechos ≤ 800 m considerou-se $v_{\max} = 80$ km/h, e para trechos >800 m $v_{\max} = 90$ km/h. A tabela 2 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 2: Tempo de viagem entre estações (Tinter) da Linha 4

	Estação de origem	Distância até a seguinte (m)	$V_{\max}$ (km/h)	T_{inter} (mm:ss)
Ramal Buritis	Buritis	851,6	90	00:59
	Estoril	774,8	80	00:57
	Barão Homem de Melo	1937,0	90	01:42
	Luxemburgo	1170,1	90	01:12
	Prudente de Moraes	917,1	90	01:02
	Praça da Liberdade	-	-	-
Ramal Anchieta	Anchieta	856,9	90	00:59
	Pium-í	780,9	80	00:57
	Savassi	801,8	90	00:57
	Praça da Liberdade	636,9	80	00:51
Trecho Central	Álvares Cabral	693,0	80	00:53
	Raul Soares	637,7	80	00:51
	Fórum Lafayette	795,0	80	00:58
	Carlos Prates	612,0	80	00:50
	Bonfim	1004,4	90	01:05
Ramal São José	Carlos Luz	1179,2	90	01:12
	Padre Eustáquio	921,5	90	01:02
	Vila Rica	1720,5	90	01:34
	São José	-	-	-
Ramal Mineirão	Carlos Luz	895,9	90	01:01
	Américo Vespúcio	1348,8	90	01:19
	Shopping Del Rey	2062,3	90	01:47
	Ouro Preto	1253,3	90	01:15
	Mineirão	-	-	-

Considerando-se que há dois ramais em cada extremidade da linha, há duas opções a serem consideradas:

1) Linha 4A: Mineirão – Anchieta e Linha 4B: São José – Buritis

2) Linha 4A: Mineirão – Buritis e Linha 4B: São José – Anchieta

Os tempos totais em movimento (não considerando o tempo de embarque e desembarque nas estações) para cada trecho são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Tempo total em movimento para os trechos da Linha 4

Trecho	Opção 1		Opção 2	
	Linha 4A	Linha 4B	Linha 4A	Linha 4B
	Mineirão – Anchieta	São José – Buritis	Mineirão – Buritis	São José – Anchieta
Tempo total em movimento (mm:ss)	13:44	15:08	16:43	12:10

4. Áreas de Serviço.

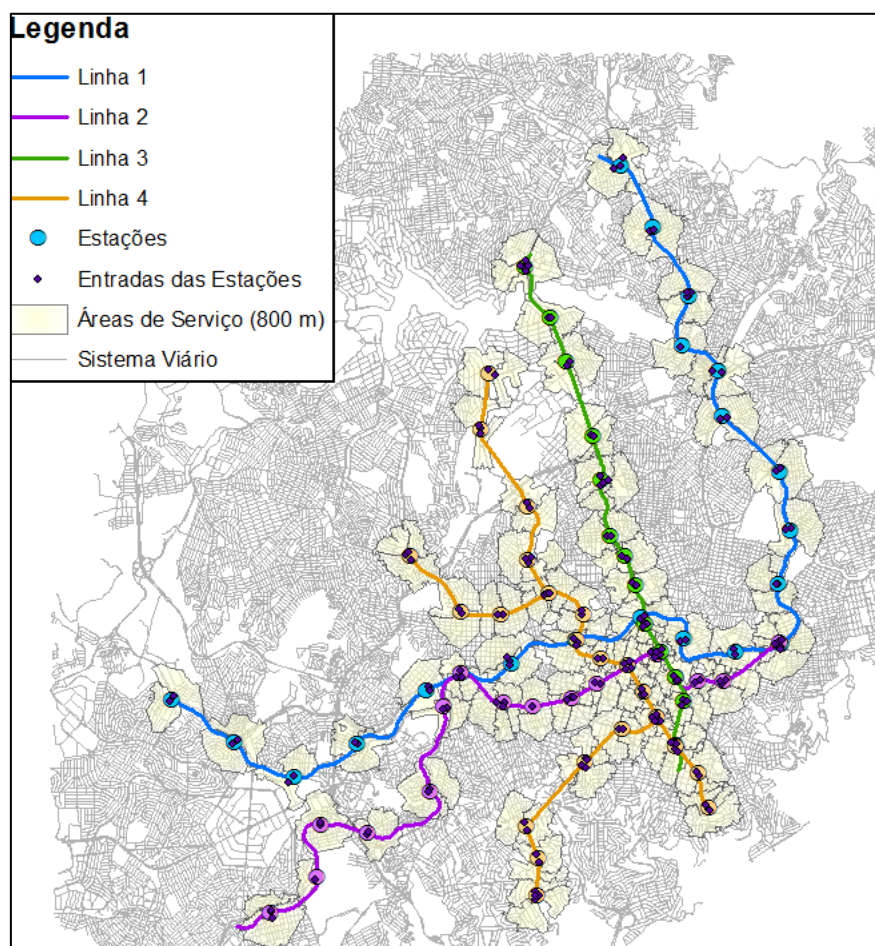


Figura 4: Áreas de serviço das estações a uma distância de caminhada de 800 m.

Calcular corretamente a área de serviço de uma estação com foco na acessibilidade para pedestres é muito importante, uma vez que, apesar de ser o modo que permite percorrer as menores distâncias, é o principal meio de acesso às estações para a maior parte dos usuários. Para a definição da área de serviço de cada estação, escolheu-se os locais mais apropriados para a construção das saídas, e a partir destes pontos considerou-se a área acessível a pé em uma distância de 800 m, utilizando a rede viária existente (figura 4). Para isto foi utilizada a função *Service Area* da extensão *Network Analyst* do ArcGIS.

Wang et al. (2016) desenvolveram uma abordagem para a determinação das distâncias de acesso e áreas de serviço de estações de metrô para diferentes modos alimentadores usando dados de SIG, e aplicaram o modelo ao sistema de metrô de Pequim (China). Para cada modo de acesso estudado (a pé, bicicleta, ônibus e automóvel próprio) foi determinado uma distância de acesso, com base em pesquisa realizada com 4500 usuários do metrô de Pequim. As distâncias consideradas para a delimitação dos limites das áreas de serviço foram as dos percentis 75 para cada modo, as quais foram: 613 m a pé, 1,579 m de bicicleta, 6,515 m de ônibus e 9,214 m para carros. As distâncias estão dentro dos intervalos comumente encontrados na literatura. Para a geração das áreas de acesso foi utilizado o método de polígono, inserindo as estações no mapa do sistema viário e marcando os pontos em que as distâncias máximas são alcançadas ao longo de cada caminho possível na malha viária. Ligando os pontos, que se tornam vértices do polígono, obtém-se o limite da área de acesso. Dentre os resultados alcançados, pode se destacar que a área de serviço para acesso a pé representa apenas 8% da área de serviço total multimodal encontrada em Pequim, porém atrai mais de 65% da demanda total. Por outro lado, a área de acesso por carro cobre 68%

da população total de Pequim e a quase totalidade da área urbana, porém contribui com apenas 5% do total de passageiros. Cabe ressaltar que se o método de buffer aéreo (circular) fosse utilizado, a área de acesso a pé seria sobrestimada em quase 74%. Estes resultados corroboram a utilização do método do polígono para a determinação das áreas de serviço para a Linha 4.

Para se obter a população das áreas de serviço de cada estação, inicialmente filtrou-se um *shapefile* contendo todos os setores censitários que se sobrepõem espacialmente com os polígonos das áreas de serviço encontradas. Os setores censitários são a menor divisão espacial para a qual existem dados de população disponíveis, fornecendo, portanto maior precisão que dados por bairro. Em muitos casos os setores censitários são constituídos de um ou poucos quarteirões, o que permite que se encontre o melhor ajuste à área de serviço encontrada. Portanto, cada setor censitário foi designado a uma estação, e para setores que se encontram divididos entre duas estações utilizou-se o critério tudo ou nada. Nesses casos a estação cuja área de serviço ocupa a maior parte do setor censitário tem este setor designado à ela.

Sohn e Shim (2010) analisaram os fatores associados aos embarques no metrô da região metropolitana de Seul (Coreia do Sul), uma das áreas mais densamente povoadas do mundo. Através de análise de regressão, o estudo descobriu sete variáveis que são significativamente associadas com embarques nas estações. São elas: emprego, área construída de imóveis comerciais, área construída de escritórios, densidade populacional, número de transferências, número de linhas alimentadoras de ônibus e uma variável *dummy* indicando estações de transferência, sendo “número de transferências” a única com sinal

negativo. As variáveis encontradas são similares às aquelas comumente utilizadas em análises de regressão para previsão de demanda na etapa de geração de viagens do modelo sequencial.

Para se estimar atração de viagens no metrô BH, utilizou-se dados sobre o número de estabelecimentos comerciais por bairro, disponibilizados pela prefeitura de Belo Horizonte. No entanto, estes dados consideram o total de unidades comerciais sem diferenciar entre pequenos e grandes negócios. Dessa forma é possível que haja distorções, por exemplo, em locais onde há muitas pequenas empresas e em outros onde há concentração de empresas de grande porte. Contudo, considerou-se que as distorções não são muito significativas, e optou-se pela utilização deste dado, pois é o único dado disponível sobre a atividade comercial dos bairros no município de Belo Horizonte.

Para se estimar a população em 2030 comparou-se três modelos de crescimento populacional: crescimento logístico, projeção aritmética e projeção geométrica. Com dados dos censos de 1991, 2000 e 2010 e a estimativa populacional de 2017, foram traçadas curvas para cada uma das três projeções, apresentadas na figura 5. A projeção aritmética foi a que mais se aproximou da população estimada em 2017, e a que apresentou o valor mediano entre as três para 2030, portanto ela foi utilizada no horizonte de projeto considerado.

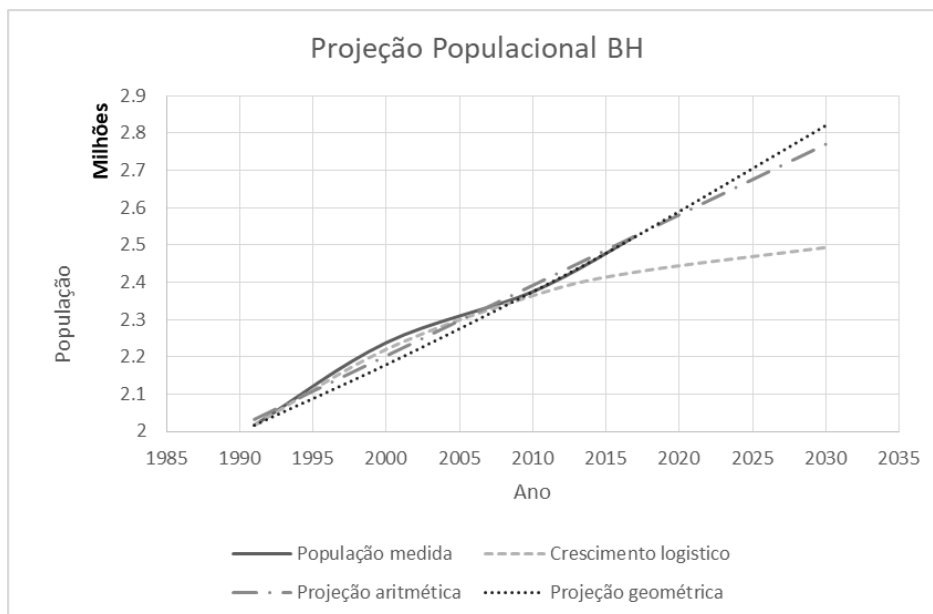


Figura 5: Curvas das projeções populacionais para Belo Horizonte.

Segundo Campos (2013), para se adequar a oferta de transporte com a demanda é necessário que se faça um planejamento de transportes para adotar as medidas e estratégias mais adequadas. O montante de recursos empregado e o tempo de execução varia conforme a medida adotada e por isso é necessário que se faça uma estimativa de demanda de transporte. Essa estimativa pode ser feita através de métodos de projeção ou modelos de planejamento de transporte, e através destes procura-se modelar o comportamento da demanda. O Modelo Sequencial, ou Modelo Quatro Etapas, é o mais amplamente utilizado no planejamento de transporte de médio e longo prazo. Ele relaciona o transporte com as características socioeconômicas da área de estudo. Este modelo recebe seu nome do fato de ser dividido em quatro etapas sequenciais que obedecem uma ordem onde o fim de uma etapa é o ponto de partida da etapa posterior. São estas etapas: Geração, Distribuição, Divisão Modal e Alocação de Viagens, apresentadas a seguir.

5. Geração de Viagens.

Para a previsão da taxa de geração de viagens, foi utilizado o método de análise de regressão linear múltipla. Foram feitas duas regressões, uma para estimar a produção e outra para a atração de viagens. Os dados fornecidos pela CBTU são do dia 16 de maio de 2017, uma terça-feira típica sem acontecimentos incomuns. Esses dados, apresentados na figura 6, são de embarques por estação, agrupados em faixas de 1 hora (das 6:00 as 7:00, das 7:00 as 8:00, etc.). Utilizou-se o pico da manhã (de 7:00 as 8:00) para estimar a produção, pois este é o horário em que as pessoas viajam dos lares para o trabalho ou outras atividades. Como não há dados de desembarque, o pico da tarde (de 17:00 as 18:00) fornece uma estimativa aproximada da atração de viagens, pois é o horário em que as pessoas estão saindo dos seus trabalhos em direção aos lares.

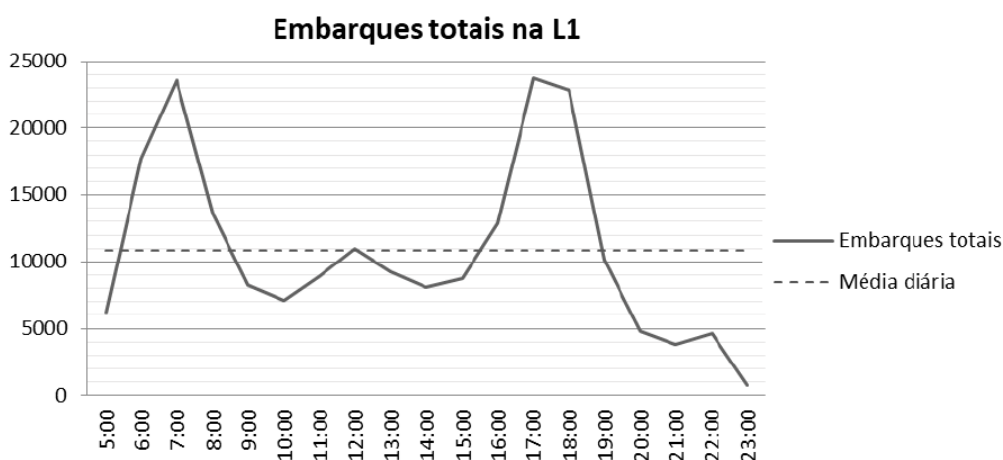


Figura 6: Embarques por horário na Linha 1 em um dia de semana típico. (CBTU)

Para o modelo de produção de viagens, a equação foi calibrada usando os dados de 2017 relativos ao uso do solo e embarques nas estações. Todas as informações utilizadas são agregadas para a área de captação das estações, que neste estudo se equivalem às zonas de

tráfego. As variáveis independentes que foram incluídas no modelo são: população, densidade demográfica, linhas de ônibus com integração tarifária ao metrô em quaisquer estações e/ou que atendem estações intermodais Eldorado, Vilarinho, São Gabriel, José Cândido da Silveira e Aarão Reis (Central). Também foi incluída uma variável *dummy* (binária) para as estações terminais, a qual se mostrou altamente explicativa e melhorou consideravelmente o coeficiente de determinação do modelo.

O modelo encontrado foi:

$$V_{prod} = -2225 - 6.87 * \sqrt{D_{pop}} + 367.63 * \ln(Pop) + 34.20 * L_{bus} + 1525 * T_{dummy}$$

(equação 5).

Onde:

V_{prod} = Número de viagens produzidas, ou embarques no pico da manhã (7:00-8:00);

D_{pop} = Densidade populacional da zona [pop/km²];

Pop = população da zona;

L_{bus} = Número de linhas de ônibus que atendem a estação;

T_{dummy} = 1 para estações terminais e 0 para as demais estações.

O coeficiente de determinação encontrado foi: $R^2 = 0.9885$. O nível de confiança é 95%. A Tabela 4 apresenta os valores de “t” e “p” para os coeficientes de regressão de cada variável independente.

Tabela 4: Valores "t" e "p" dos coeficientes do modelo de produção de viagens.

Variáveis	Dpop	Pop	Lbus	Tdummy
Stat t	-1.75815	3.0687	13.1460	5.9369
valor-P	0.102226	0.008972	6.95E-09	4.93E-05

Pode-se observar na equação que a densidade populacional apresentou um impacto negativo na produção de viagens, enquanto a população na zona tem impacto positivo. A provável razão para isso está no fato que as estações que apresentam o maior número de embarques no pico da manhã são aquelas onde estão localizados os terminais intermodais, que são enormes estruturas nas proximidades de grandes rodovias. Naturalmente, há menos espaço nas proximidades dessas estações, que já se encontram em bairros mais afastados do centro e menos densos. A maioria dos passageiros embarcando nesses locais acessa a estação por meio dos ônibus. Isso fica ainda mais evidente pelo coeficiente positivo da variável “Linhas de ônibus”. Por outro lado, o alto coeficiente positivo da variável “População” confirma a relação direta entre proximidade da população à estação e o número de pessoas que utilizam o sistema metroviário. Quanto maior a quantidade de pessoas que têm acesso a pé à estação, maior sua utilização. Por fim, a variável *dummy* “Terminal” demonstra o alto poder de atração de estações terminais, que além de apresentarem maiores áreas de captação, atuam como receptores de demanda dos bairros ou cidades ainda mais afastados (i.e. todo o vetor norte na estação Vilarinho; Contagem, Betim e Esmeraldas na estação Eldorado).

De forma similar, obteve-se a equação de atração de viagens. Como os dados disponibilizados pela CBTU incluem apenas embarques, assumiu-se que a atração de viagens das estações é igual à produção no pico da tarde, quando as viagens são originadas no trabalho/estudo em direção aos lares. Após diversos testes, o modelo que apresentou melhores resultados foi:

$$V_{atr} = 2971 + 134.65 * \sqrt{D_{com}} - 1.486 * N_{com} - 301.33 * \ln(C_{pop}) + 1922 * T_{dummy}$$

(equação 6).

Onde:

V_{atr} = Número de viagens atraídas, ou embarques no pico da tarde (17:00-18:00);

D_{com} = Densidade de estabelecimentos comerciais na zona [N_{com}/km^2];

N_{com} = Número de estabelecimentos comerciais na zona;

C_{pop} = Distância à estação central × população da zona [$km \times pop$];

T_{dummy} = 1 para estações terminais, 0 para as demais estações.

O coeficiente de determinação encontrado foi: $R^2 = 0.9110$. O nível de confiança é 95%. A Tabela 5 apresenta os valores de “t” e “p” para os coeficientes de regressão de cada variável independente.

Tabela 5: Valores "t" e "p" dos coeficientes do modelo de atração de viagens.

Variáveis	Dcom	Ncom	Cpop	Tdummy
Stat t	5.3311	-4.6248	-8.2554	6.6530
valor-P	0.000136	0.000476	1.58E-06	1.58E-05

A densidade de estabelecimentos comerciais teve um alto impacto positivo no número de viagens, enquanto o número de estabelecimentos apresentou um baixo coeficiente negativo. Alguns fatos contribuem para este resultado. Primeiramente, deve-se atentar ao fato que número de estabelecimentos comerciais é apenas um indicador do total de empregos, uma vez que uma grande empresa pode ter mais empregados que dezenas de pequenas empresas. Levando isso em consideração, nota-se que a área de captação das estações centrais é menor, pois elas estão mais próximas umas das outras, e a quantidade

de estabelecimentos comerciais é maior no centro, o que eleva a densidade e condiz com os embarques observados. Já o número de estabelecimentos por si só omite algumas características, como a presença de shoppings nas proximidades das estações, os quais tem um grande número de lojas, mas horários de funcionamento diferentes do padrão. Além disso, observa-se um resultado inesperado na estação Lagoinha, no centro de BH. Ela é a apenas a quinta estação mais movimentada no horário de pico da tarde, com 1903 embarques, porém é a segunda com o maior número de estabelecimentos comerciais por uma larga margem. Essa grande discrepância na quantidade de observações tem um peso importante para que seu coeficiente seja negativo, pois ela apresenta menos embarques do que estações com muito menos estabelecimentos comerciais (Santa Efigênia, Vilarinho e Eldorado). Algumas características da localização da estação ajudam a explicar esses resultados. Para acessar a estação Lagoinha é necessário percorrer uma longa passarela e atravessar a praça Rio Branco, em frente à estação rodoviária, que é uma região perigosa. Além disso, no centro há um grande número de opções de ônibus a poucos minutos de caminhada, incluindo-se as estações centrais do Move, que atualmente não são integrados e, portanto fazem concorrência ao metrô.

A variável *dummy* para estações terminais mais uma vez foi muito explicativa, o que faz sentido devido a grandes polos geradores de emprego relativamente próximos das estações Vilarinho e Eldorado (Cidade Administrativa, Shoppings) e da presença dos terminais intermodais nessas estações. Por último, buscou-se uma variável para melhorar o resultado do modelo baseada no grau de urbanização. De acordo com Bruton (1979), uma maneira muito utilizada de se avaliar o grau de urbanização é a distância da zona ao centro. Ao

mesmo tempo buscou-se verificar se os embarques no horário de pico da tarde estavam também relacionados com a população residente em cada zona. Vários testes foram feitos e não apontaram relevância significativa dessas variáveis para o modelo, portanto buscou-se agregar as duas variáveis em uma só " C_{pop} ", que atribui um peso maior para a população das zonas quanto mais distantes estas forem da estação mais "central" da linha. No caso belorizontino, considera-se a praça Sete como marco zero, dessa forma, estação Central é a estação mais central na Linha 1, a estação Praça Sete nas linhas 2 e 3, e a estação Raul Soares na Linha 4. Observou-se que esta nova variável apresentou um valor t bastante alto, de -8,26.

6. Distribuição de Viagens.

Primeiramente calculou-se o custo generalizado da viagem em unidades de tempo, neste caso expresso por:

$$C_{i-j} = T_{i-j} + \alpha * E_{i-j} + \beta * X_{i-j} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

C_{i-j} = custo generalizado da viagem da zona i para a zona j;

T_{i-j} = tempo de viagem (dentro do veículo) entre a zona i e a zona j;

E_{i-j} = tempo de espera inicial;

X_{i-j} = quantidade de transferências entre a zona i e a zona j;

α , β = valores associados ao tempo de espera e penalidade por transferência, relativo ao tempo de viagem dentro do veículo.

Considerações:

- a) Serão adotados os valores de $\alpha = 2$ e $\beta = 5$, em linha com os diversos estudos analisados por Iseki et al. (2006).
- b) O tempo de caminhada até a estação foi omitido, uma vez que é igual para todas e o metrô é o único modo sendo avaliado.
- c) O tempo de espera assumido foi igual a 1 minuto para todas as estações para simplificação, à exceção das estações nos quatro ramais da linha 4, em que esse tempo é o dobro do trecho central, portanto, assumido como 2 minutos.
- d) Para o cálculo do tempo de viagem dentro do veículo, foram utilizados os tempos em movimento entre estações calculados anteriormente, somados ao tempo total parado (embarque e desembarque), igual a 56 segundos por parada em estação (média atual¹).

Em seguida, incorporou-se o custo generalizado à formulação do modelo gravitacional, que tem a seguinte forma:

$$T_{ij} = A_i * O_i * B_j * D_j * e^{-C_{ij}} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

T_{ij} = viagens da zona i para a zona j;

O_i = viagens geradas na zona i;

D_j = viagens atraídas à zona j;

C_{ij} = custo generalizado de viagens entre i e j;

¹ O tempo total de viagem na Linha 1 é 44:06, segundo a CBTU. Subtraiu-se o tempo total em movimento entre Eldorado e Vilarinho, e dividiu-se a diferença pelo número de paradas entre elas, que é de 17 estações.

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j * D_j * e^{-c_{ij}}} = \text{fator de equilíbrio de saída/geração};$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i * O_i * e^{-c_{ij}}} = \text{fator de equilíbrio de entrada/atração}.$$

A etapa de distribuição foi calculada utilizando o software Matlab. Primeiramente se modelou a rede através de uma matriz de adjacência. Nesta matriz, $A_{ij} = 1$ se há uma ligação (linha de metrô) entre os nós (estações ou centroides), e $A_{ij} = 0$ em caso contrário. Em estações comuns, o centroide e a estação são considerados como um só, para simplificação. Já nas estações de transferência, o centroide (i.e. a Praça Sete) conecta as estações de cada linha (Estação Praça Sete L2, Estação Praça Sete L3) e estas também estão ligadas entre si (pode-se compreender como os corredores de transferência). Isso permite adicionar um custo de transferência entre linhas, que é a penalidade da fórmula do custo generalizado.

Em seguida atribuiu-se a cada um dos trechos o tempo entre estações e criou-se uma matriz com os tempos de espera inicial em cada estação. Com isso foi possível calcular o custo generalizado para cada par O-D. De posse da matriz C_{i-j} e dos vetores O_i e D_j calculados na fase de geração, prosseguiu-se para o cálculo do modelo gravitacional e a distribuição das viagens entre cada par de estações.

7. Divisão Modal

Em modelos de transporte tradicionais, esta fase é muito relevante, pois define, por exemplo, quantos passageiros irão utilizar o transporte público. No caso deste estudo, porém, apenas o metrô é considerado, logo esta etapa do modelo sequencial não é aplicável.

8. Alocação de Viagens.

Foi utilizado o algoritmo de caminho mais curto no Matlab baseado no tempo de viagem. Este é um tipo de atribuição “tudo ou nada”, que é aplicável a uma rede de metrô, onde há poucas opções para se fazer o caminho entre um par de O-D (em muitos casos, apenas uma opção), e a diferença de tempo entre elas é significativa, enquanto que a diferença de serviço é em geral desprezível ou inexistente. Assume-se, portanto que os usuários usarão sempre o mesmo caminho entre duas estações.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Modelos de produção e atração de viagens na maioria dos casos produzem resultados diferentes. Costuma-se adotar o modelo de produção como sendo o mais correto, pois os dados disponíveis são geralmente melhores, e os resultados obtidos idem (ORTUZAR E WILLUMSEN, 2011). Desta forma, multiplica-se todos os destinos (D_j) por um fator assegura que sua soma seja igual a soma das origens (O_i). No caso específico deste estudo, tanto o modelo de produção quanto o de atração foram baseados em números de embarques (pico da manhã vs. pico da tarde) e em ambos as variáveis consideradas foram iguais na maior parte. Não é possível, portanto afirmar que um seja intrinsecamente melhor que outro. Adotou-se então a média das somas de todas as origens e destinos e obteve-se dois fatores de correção, um que multiplica O_i e outro que multiplica D_j . A Tabela 6 resume os resultados encontrados e os fatores de correção adotados.

Tabela 6: Resultados cumulativos dos modelos de geração de viagens e fatores de correção.

	$\sum_i o_i$	$\sum_j d_j$
Total	60731	114227
Média	87479	
Fator de multiplicação	$f_o = 1.440$	$f_D = 0.766$

A Figura 7 apresenta os resultados para a linha 4. Nota-se que a produção está majoritariamente concentrada nas estações periféricas, em especial as estações terminais, o que é um reflexo do modelo e da atual configuração do metrô BH. As atrações por outro lado são um pouco mais bem distribuídas, mas apresentam um pico também muito acentuado nas estações centrais.

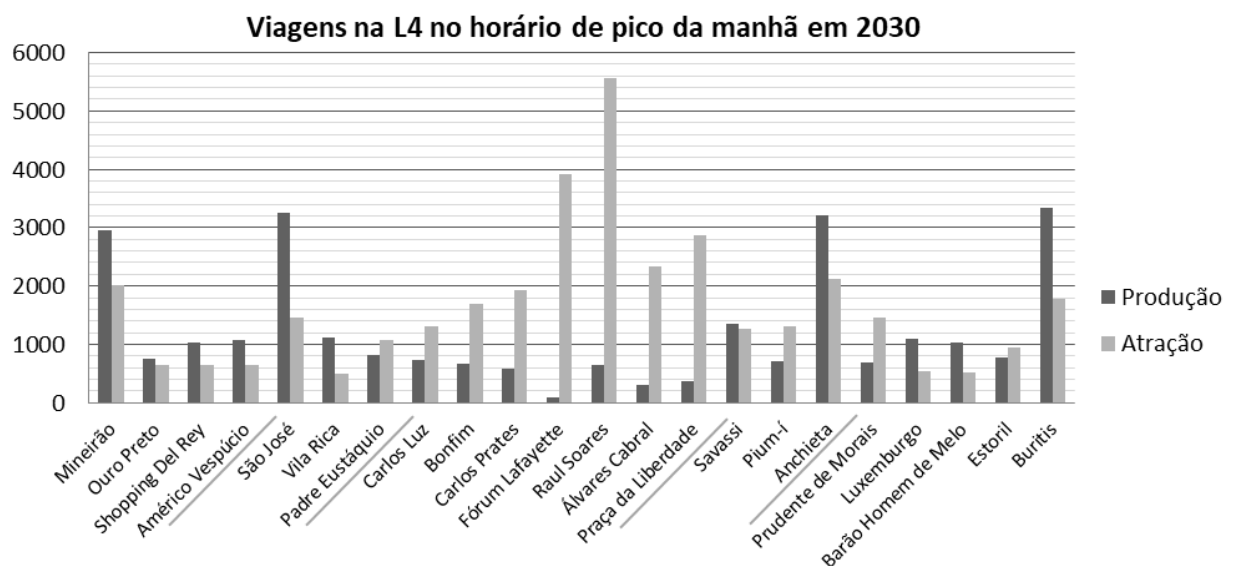


Figura 7: Viagens na Linha 4 no horário de pico da manhã em 2030

Na etapa da distribuição, a dupla restrição impôs uma dificuldade computacional, pois as fórmulas não convergiram. Optou-se então por restringir apenas as origens. Deste modo, a soma das viagens saindo de uma origem i é igual ao número de viagens produzidas por ela,

mas o número de viagens chegando a um destino j apresenta pequenas diferenças. Após 7 iterações, porém, essa diferença é mínima ($< 2\%$). Manteve-se $T_j=0$ onde $D_j=0$. A Figura 8 apresenta os trechos com maior carregamento na rede.

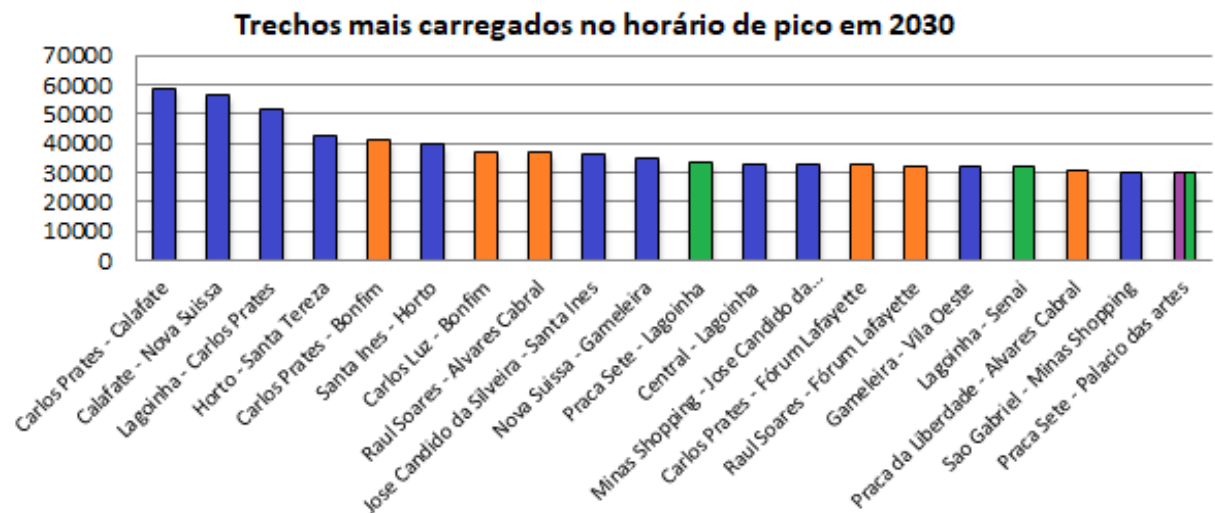


Figura 8: Trechos mais carregados em 2030.

Pelo resultado obtido, a Linha 1 mantém-se como principal corredor de transporte, contendo sete dentre os 10 trechos mais movimentados, apresentando trechos com carregamento próximo de 60 mil pass./h. Inesperadamente, a Linha 4 é a segunda com maior quantia de trechos dentre os mais movimentados, com o trecho Carlos Prates-Bonfim ultrapassando os 40 mil pass./h. a Figura 9 apresenta graficamente os resultados encontrados.

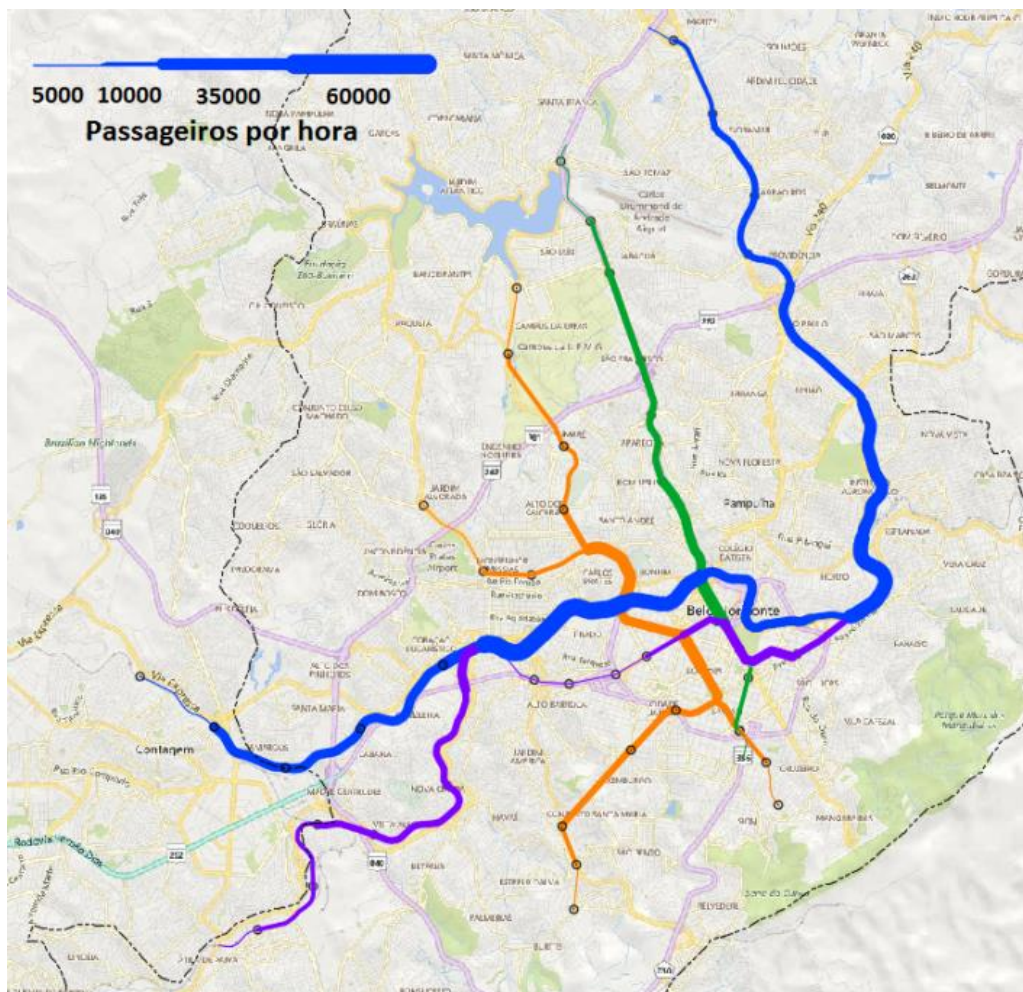


Figura 9: Mapa de carregamentos na rede em 2030.

Este resultado demonstra a importância de se atender as regionais Pampulha, Noroeste e Oeste com transporte confiável e de alta capacidade, e de se criar essa nova conexão entre as outras linhas no hipercentro. A Figura 10 apresenta os carregamentos estimados para a Linha 4 em 2030.

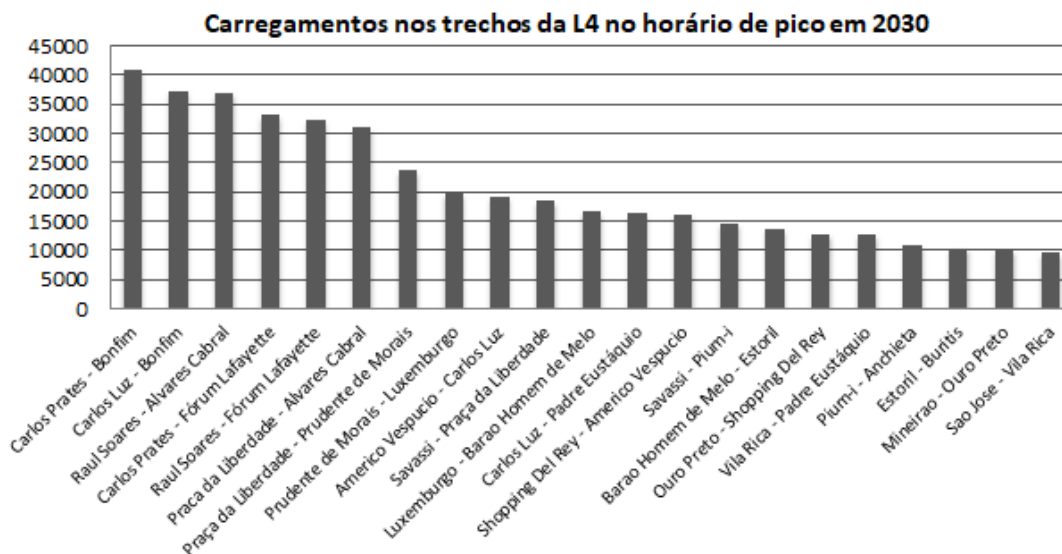


Figura 10: Carregamentos na linha 4 em 2030.

A rede proposta contém 65 estações e 81,47 km de trilhos no total, dos quais 21,85 km e 22 estações estão na Linha 4. A Figura 11 apresenta um mapa esquemático deste sistema.



Figura 11: Mapa esquemático da rede de metrô proposta em 2030.

CONCLUSÕES

Os carregamentos obtidos refletem a necessidade por um transporte de maior capacidade que ônibus comuns ou mesmo BRT. O *headway* necessário para atender a linha 4, considerando a capacidade máxima dos trens de 1200 lugares, seria de aproximadamente 3,5 minutos. Este é menor que o *headway* mínimo adotado na linha 1 atualmente, que é de 4 minutos.

Outro ponto que demonstra a importância desta ligação é o resultado dos números de transferências entre linhas. A Estação Carlos Prates, no encontro entre as linhas 1 e 4, é a estação com maior número de transferências observado. Chama a atenção o fato que o trecho central da linha 4 apresenta altos carregamentos de passageiros com destino as áreas do hipercentro por onde a linha passa, em maior quantidade até mesmo que as linhas 2 e 3 projetadas.

Por fim, ressalta-se o impacto positivo na qualidade de vida da população, no trânsito, com a diminuição dos congestionamentos e na menor emissão de poluentes e decréscimo de outras externalidades negativas, bem como o grande ganho coletivo de tempo que a construção deste sistema de metrô traria para Belo Horizonte, impulsionando a economia local. São quase 88 mil passageiros utilizando o sistema na hora de pico, considerando-se apenas aqueles que acessam o metrô a pé ou via terminais intermodais. Hoje esse número é de apenas 23 mil passageiros, o que representa um aumento estimado de 3,8 vezes. Além disso, o modelo usou como base a linha 1, que atualmente opera de maneira independente

e pouco ou até mesmo não integrada ao sistema de ônibus na maioria das estações, o que pode subestimar a demanda ao se extrapolar os dados.

Com uma gestão integrada do transporte metropolitano, espera-se que o número de passageiros transportados seja expressivamente maior que o encontrado, transformando o metrô na espinha dorsal de uma rede completamente integrada de transportes sobre trilhos e pneus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA RMBH - GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Pesquisa Origem e Destino 2011 - 2012. Disponível em: <<http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2016/06/Relatorio-Completo-Pesquisa-OD-2012-1.pdf>> Acesso em 20 junho 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS - ANTP. Cadernos Técnicos: Integração nos Transportes Públicos. São Paulo: [S.N.], V. 5, 2007.

BRUTON, Michael J. Introdução ao Planejamento dos Transportes. 2a. ed. Rio de Janeiro: Interciência; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1979.

CAMPOS, Vania Barcellos Gouvea. Planejamento de Transportes: conceitos e modelos. 1a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

COMPANHIA BRASILEIRA DE TRENS URBANOS - CBTU. Dados operacionais. Disponível em: <<https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/operacao-bh/dados-operacionais-bh>> Acesso em 20 junho 2018.

- CURRIE, Graham; DELBOSC, Alexa. Exploring Comparative Ridership Drivers of Bus Rapid Transit and Light Rail Transit Routes. *Journal of Public Transportation*, Vol. 16, No 2, 2013. 47-65.
- DA COSTA, Thiago Esteves Gonçalves. Comparação dos resultados das pesquisas Origem-Destino de 2002 e 2012. Belo Horizonte, p. 1-17. 2013.
- DERRIBLE, Sybil. Reviewing and Assessing the Toronto Metro System. *Canadian Journal of Civil Engineering* 39, 2012. 154-162.
- DJOKO, Emerick. Evaluation of the feasibility of a new North-South Metro line in Stockholm from an infrastructure and capacity perspective. Master Thesis. KTH - Instituto Real de Tecnologia. Estocolmo, 96 p. 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Estimativa populacional dos municípios 2017. Agência IBGE Notícias, 2017. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/16131-ibge-divulga-as-estimativas-populacionais-dos-municipios-para-2017.html>>. Acesso em: 5 setembro 2017.
- METROMINAS. Prestação de Serviço de Consultoria Técnica Para a Elaboração dos Projetos de Engenharia Para a Linha 3 do Metrô da RMBH. Trem Metropolitano de Belo Horizonte - METROMINAS. Belo Horizonte, p. 6. 2012.
- ORTÚZAR, Juan de Dios; WILLUMSEN, Luis G. *Modelling Transport*. 4a. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- SOHN, Keemin; SHIM, Hyunjin. Factors generating boardings at Metro stations in the Seoul metropolitan area. *Cities* 27, 2010. 358–368.

WANG, Zi-jia; CHEN, Feng; XU, Tian-kun. Interchange between Metro and Other Modes:
Access Distance and Catchment Area. *Journal of Urban Planning and Development*
142(4), 2016. 1-9.