

Contrato OCS 132/2020

Contratação de serviços necessários à realização de estudos para a outorga de concessão dos serviços públicos de transporte ferroviário de passageiros na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS, operado pela Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre S.A. - TRENSURB, e nas Regiões Metropolitanas de Belo Horizonte/MG, Maceió/AL, Recife/PE, João Pessoa/PB e Natal/RN, operados pela Companhia Brasileira de Trens Urbanos - CBTU.

- Estudo de Outorga de Concessão do Transporte Ferroviário -

Porto Alegre/RS, Belo Horizonte/MG, Maceió/AL, Recife/PE, João Pessoa/PB e Natal/RN

RT05: ESTUDO DE DEMANDA

RECIFE/PE

Revisão Ø

São Paulo, 29 de outubro de 2024

Consórcio:

TYLin

SYSTRA

**RHEIN
SCHIRATO
MEIRELES**

SUMÁRIO

Sumário	2
Lista de figuras	5
Lista de tabelas.....	7
Apresentação	10
1. Introdução	11
2. Área de influência.....	12
3. Modelo 4 etapas.....	16
3.1 Geração de viagens	16
3.1.1 Análise de regressão para geração de viagens de transporte	17
3.1.2 Projeção das variáveis socioeconômicas.....	18
3.1.3 Previsão de geração de viagens	18
3.2 Distribuição de viagens	19
3.3 Divisão modal.....	19
3.4 Alocação de viagens	21
3.5 Aplicação das etapas.....	21
4. Dados de entrada do modelo	23
5. Elaboração da matriz O-D.....	26
5.1 Caracterização dos dados de entrada	26
5.2 Metodologia de geração da matriz O-D a partir de dados do SBE.....	27
5.3 Resultados obtidos	29
6. Montagem da rede de simulação.....	37
6.1 Zoneamento adotado.....	37
6.1.1 Centroides e conectores	38
6.2 Base viária	39
6.2.1 Tempos de viagem	40
6.2.2 Tempos de caminhada	40
6.3 Linhas de transporte coletivo.....	40
6.3.1 Sistema tarifário	42
7. Configuração do modelo de alocação	47
7.1 Método de alocação.....	47
7.2 Valor do tempo	48
7.3 Restrição de capacidade.....	48
7.4 Configuração de parâmetros de alocação.....	50
7.5 Saídas do modelo	51

8.	Calibração do modelo de alocação.....	54
8.1	Objetos de calibração e dados de referência.....	54
8.2	Resultados de calibração.....	54
8.2.1	Total de embarques	55
8.2.2	Embarques totais	56
8.2.3	Embarques diretos	57
8.2.4	Embarques transferidos	59
9.	Projeção da demanda.....	62
9.1	Análises de regressão para geração de viagens.....	62
9.1.1	Tratamento de dados socioeconômicos e demográficos	62
9.1.2	Definição do macrozoneamento.....	62
9.1.3	Regressão linear	64
9.2	Projeção das variáveis explicativas	67
9.3	Projeção das viagens geradas por zona de tráfego.....	68
9.4	Matrizes futuras de transporte coletivo	69
10.	Migração modal.....	71
10.1	Fonte de informações das escolhas	71
10.2	Definição das variáveis explicativas	73
10.2.1	Variáveis explicativas modo individual	73
10.2.2	Variáveis explicativas modo coletivo	74
10.3	Calibração da ferramenta Logit Multinomial	74
10.4	Aplicação do modelo de migração modal	75
11.	Cenários iniciais	76
11.1	Atualização tarifária – Extinção do anel B.....	77
11.2	Resultados por cenário.....	79
11.2.1	Evolução da demanda ao longo dos anos horizontes – Cenário Base	79
11.2.2	Análise de sensibilidade da redução de intervalos das linhas de metrô.....	81
11.2.3	Análise de sensibilidade da eletrificação do VLT.....	82
11.2.4	Análise de sensibilidade do seccionamento das linhas de alimentação do metrô	83
11.3	Conhecimentos assimilados	86
12.	Processo Iterativo com Estado PE e União	88
12.1	Sensibilidade de intervalos do Metrô	88
12.2	Sensibilidade de intervalos do VLT.....	91
12.2.1	Racionalização das linhas de ônibus concorrentes	92

12.2.2	Resultados Gerais	94
12.2.3	Resultados por linha de VLT	96
12.3	Sensibilidade tarifária.....	97
13.	Cenário Principal (2025 – 2060)	103
13.1	Impactos da migração modal	103
13.2	Fatores de expansão	104
13.2.1	Dia útil e mês.....	104
13.2.2	Ano	105
13.3	Resultados Cenário Principal x Cenário Base	106
13.3.1	Evolução da demanda total (Metrô e VLT) – anos horizontes (Dia Útil).....	106
13.3.2	Evolução da demanda por linha – anos horizontes (Dia Útil)	107
13.3.3	Embarques Diretos x Transferidos – 2025 (Dia Útil)	109
13.3.4	Embarques por linha e por estação – 2025 (Dia Útil)	110
13.3.5	Ocupação máxima no período de pico da manhã – 2025 (pax/m ²).....	111
13.3.6	Indicadores por linha e por cenário - anos horizontes.....	112
13.3.7	Embarques por linha e por cenário – Diretos e Transferidos - anos horizontes 114	
14.	Considerações finais	116
15.	Anexos	117
15.1	Terminais de integração distribuídos poranel.....	117
15.2	Mode Table	118
15.3	Mode Transfer Table	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Localização do sistema sobre trilhos – Linhas e estações.....	12
Figura 2-2 Área de Influência Direta do Metrô do Recife	13
Figura 2-3 Área de Influência Indireta do Metrô do Recife	14
Figura 2-4 Sistema de linhas de Transporte Coletivo da RMR	15
Figura 3-1 Atributos considerados no modelo.....	21
Figura 5-1 Exemplo de cruzamento de dados de utilização do bilhete eletrônico.....	28
Figura 5-2 Distribuição dos fatores de expansão	30
Figura 5-3 Volumes entre pares O-D (pico da manhã).....	31
Figura 5-4 Primeiro embarque das viagens (pico da manhã)	32
Figura 5-5 Último desembarque das viagens (pico da manhã).....	33
Figura 5-6 Embarques das pernas desagregadas (pico da manhã).....	34
Figura 5-7 Desembarques das pernas desagregadas (pico da manhã).....	35
Figura 5-8 Atração e Produção por zona no pico manhã - Zoneamento 530	36
Figura 6-1 Zoneamento adotado.....	38
Figura 6-2 Centroides do zoneamento proposto	39
Figura 7-1 Gráfico da função f de atraso (BPR function) com os valores $\alpha = 0,15$ e $\beta = 4$	49
Figura 8-1 Calibração – Total de embarques	55
Figura 8-2 Calibração – Embarques totais.....	57
Figura 8-3 Calibração – Embarques diretos	59
Figura 8-4 Calibração – Embarques transferidos	61
Figura 9-1 Zoneamento Pesquisa OD e CBTU-PE	63
Figura 9-2 Macrozoneamento adotado para modelagem	64
Figura 9-3 Fatores de projeção da população em Recife, Olinda e RMR.....	67
Figura 9-4 Projeção da variável “População com mais de 15 anos” – RMR.....	68
Figura 9-5 Ajuste final da geração de viagens projetada para o horizonte de estudo - RMR.....	69
Figura 10-1 Registros de viagens por faixa de renda e por modo – Pesquisa O-D 2018	71
Figura 11-1 Distribuição de linhas por anel tarifário (2023)	78
Figura 11-2 - Embarques no período pico da manhã – Sistema de trilhos (3h).....	79
Figura 11-3 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59) - Metrô	82
Figura 11-4 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59) - VLT.....	83
Figura 11-5 Linhas a serem alteradas no Cenário C	84
Figura 11-6 Linhas a serem alteradas no Cenário C separadas por estação	84
Figura 11-7 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59) - Metrô	86
Figura 12-1 - Análises graduais do processo iterativo.....	88

Figura 12-2 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59)	89
Figura 12-3 Carregamento e ocupação (PM, 5h00-7h59) – Metrô Centro 1	90
Figura 12-4 Carregamento e ocupação (PM, 5h00-7h59) – Metrô Centro 2	90
Figura 12-5 Carregamento e ocupação (PM, 5h00-7h59) – Metrô Sul	90
Figura 12-6 Ocupação máxima (PM, 5h00-7h59).....	91
Figura 12-7 – VLT Sul – Racionalização	93
Figura 12-8 – VLT Oeste – Racionalização	94
Figura 12-9 – Total de embarques por linha (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT	94
Figura 12-10 – Total de embarques por estação do VLT Sul (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT	96
Figura 12-11 – Total de embarques por estação do VLT Oeste (PM, 5h00-7h59) – intervenção no VLT	96
Figura 12-12 – Perfil de carregamento por linha e sentido (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT	97
Figura 12-13 – Regras de integração – Cenário Tarifário Base	98
Figura 12-14 – Linhas de ônibus sem integração com trilhos – Cenário Tarifário Base	98
Figura 12-15 – Total de embarques nos trilhos (PM, 5h00-7h59) – Integração das linhas SEM_INT	99
Figura 12-16 – Variação nos embarques do Metrô e VLT (PM, 5h00-7h59) – Cenários tarifários	100
Figura 12-17 – Arrecadação Teórica Preliminar por Cenário (Dia Útil) – Trilhos	101
Figura 12-18 – Arrecadação Teórica Preliminar por Cenário (Dia Útil) – Metrô	101
Figura 12-19 – Arrecadação Teórica Preliminar por Cenário (Dia Útil) – VLT	102
Figura 13-1 – Evolução anual do total de passageiros DU: Base x Principal	106
Figura 13-2 – Metrô Centro 1 - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal	107
Figura 13-3 – Metrô Centro 2 - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal	107
Figura 13-4 – Metrô Sul - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal	108
Figura 13-5 – VLT Oeste - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal	108
Figura 13-6 – VLT Sul - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal	109
Figura 13-7 – Metrô - Diretos x Transferidos – 2025 (dia útil) – Base x Principal	109
Figura 13-8 – VLT - Diretos x Transferidos – 2025 (dia útil) – Base x Principal	109
Figura 13-9 – Metrô Centro 1 - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal	110
Figura 13-10 – Metrô Centro 2 - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal	110
Figura 13-11 – Metrô Sul - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal	110
Figura 13-12 – VLT Oeste - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal	111
Figura 13-13 – VLT Sul - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal	111
Figura 13-14 – Ocupação máxima (PM, 5h00-7h59) – 2025 – Base x Principal	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 Dados utilizados para construção do modelo	23
Tabela 5-1 Caracterização dos dados usados para estimar a matriz O-D de cada sistema	27
Tabela 5-2 Requisitos dos campos do SBE	27
Tabela 5-3 Atributos principais para a construção do modelo	29
Tabela 6-1 Dados dos tempos de viagem a bordo das linhas de transporte coletivo	40
Tabela 6-2 Síntese dos sistemas modelados	41
Tabela 6-3 Rotas e Stops da rede de simulação após importação dos GTFS	41
Tabela 6-4 Capacidade dos veículos	42
Tabela 6-5 Tarifas nominais do Transporte Coletivo do RMR	43
Tabela 6-6 Tratamento da Matriz de Integração fornecida pelo CTM	44
Tabela 6-7 Tarifa nominal dos <i>modes</i> do Transporte Coletivo da RMR	45
Tabela 6-8 Tarifa integrada da integração do Transporte Coletivo da RMR	45
Tabela 6-9 Tarifa complementar da integração do Transporte Coletivo da RMR	46
Tabela 7-1 Distribuição de renda dos passageiros de transporte coletivo na Pesquisa O-D 2018 da RMR	48
Tabela 7-2 Parâmetros da Transit Network	50
Tabela 7-3 Dados das saídas do modelo (Alocação do <i>Equilibrium Pathfinder</i>)	52
Tabela 8-1 Calibração – Total de embarques	55
Tabela 8-2 Calibração – Embarques totais	56
Tabela 8-3 Calibração – Embarques diretos	58
Tabela 8-4 Calibração – Embarques transferidos	60
Tabela 9-1 Bancos de dados oficiais trabalhados	62
Tabela 9-2 Resultados da função de regressão para a produção de viagens	66
Tabela 9-3 Resultados da função de regressão para a atração de viagens	67
Tabela 9-4 Totais das matrizes do horizonte de estudo no Pico Período-Manhã (5h-7h59)	70
Tabela 10-1 Modos calibração migração modal	72
Tabela 10-2 Coeficiente custo individual	74
Tabela 10-3 Calibração modelo migração modal	75
Tabela 11-1 Resumo de cenários	76
Tabela 11-2 Quilometragem média e n.º de linhas por anel	77
Tabela 11-3: Parâmetros dos Cenários - Avaliação da extinção do Anel B	79
Tabela 11-4 Resultados do cenário Base – Centro 1	80
Tabela 11-5 Resultados do cenário Base – Centro 2	80
Tabela 11-6 Resultados do cenário Base – Sul	80

Tabela 11-7 Resultados do cenário Base – VLT Oeste	81
Tabela 11-8 Resultados do cenário Base – VLT Sul	81
Tabela 11-9 Intervalos (minutos) metrô – Análise de sensibilidade	81
Tabela 11-10 Lista de linhas a serem alteradas no cenário C	85
Tabela 12-1 Sensibilidade intervalos Metrô – Configuração dos cenários	89
Tabela 12-2 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59).....	89
Tabela 12-3 Sensibilidade intervalos VLT – Configuração dos cenários	92
Tabela 12-4 – Recapitulativo das configurações operacionais adotadas	99
Tabela 12-5 Sensibilidade tarifária – Configuração dos cenários	99
Tabela 13-1 Configurações operacionais dos cenários Base e Escolhido	103
Tabela 13-2 Migração modal por cenário (PM, 5h00-7h59)	104
Tabela 13-3 Fatores de expansão do período de pico da manhã (PM) para o dia útil	104
Tabela 13-4 Indicadores de demanda por linha e por ano: Base x Principal	112
Tabela 13-5: Embarques diretos e transferidos (PM, 5h00-7h59) – Nos anos horizonte.....	114
Tabela 15-1 Linhas por Terminal de Integração.....	117
Tabela 15-2 Mode Table do modelo de alocação	118
Tabela 15-3 Mode Transfer Table do modelo de alocação.....	119

São Paulo, 29 de outubro de 2024.

Ao

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES

Av. República do Chile, n.º 100, Rio de Janeiro-RJ

A/C

Anie Amicci

Gerente ASC/DEMOB/GEMOB2

Apresentamos, neste documento, o trabalho desenvolvido para cumprir com os compromissos acordados no Contrato OCS n.º 132/2020 - SRM 4400004281, e refere-se à entrega do Produto **Estudo de Demanda - PE**, Item 3.3.3 e subitens do Termo de Referência, Anexo I do Edital do Pregão Eletrônico n.º 02/2020-BNDES, referente à **Região Metropolitana do Recife em Pernambuco**.

O profissional **GABRIEL FERIANCIC**, Responsável Técnico pelo Estudo de Demanda - PE, foi o responsável pela coordenação técnica e supervisão deste Produto.

Atenciosamente,

GABRIEL FERIANCIC

Consórcio GPO-SYSTRAS-CESCON-RHEIN

APRESENTAÇÃO

Este Produto **RT05 – Estudo de Demanda** foi desenvolvido para cumprir com os compromissos acordados no contrato OCS 132/2020 SRM 4400004281, no âmbito da Fase 2, que engloba o escopo dos serviços técnicos contemplados no Serviço C, e tem por objetivo a projeção de demanda no sistema ferroviário de passageiros em um horizonte de 35 anos para diferentes cenários.

O Produto entregue refere-se ao **Estudo de Demanda da Região Metropolitana do Recife**, contendo a descrição metodológica das etapas do modelo de previsão de demanda, sua aplicação, o levantamento de informações, construção do modelo de alocação com cenários definidos, resultados de calibração e resultados das simulações dos cenários.

A versão inicial do presente Estudo de Demanda foi finalizada em março de 2021. Após período de paralisação das atividades de modelagem da Concessão, houve a retomada dos trabalhos em setembro de 2023. Considerando as mudanças ocorridas no sistema de mobilidade urbana da região metropolitana de Recife (alterações nas linhas, política de integração e tarifária dos ônibus metropolitanos) entre a data-base anterior (2019) e a nova data-base (2023), mostrou-se necessário elaborar uma versão atualizada do estudo. Assim, o presente documento é a nova versão do Estudo de Demanda do sistema de transporte público da RMR.

As informações, argumentos e conclusões apontados neste documento foram realizados a partir dos subsídios fornecidos pela CBTU, Estado de Pernambuco e Consórcio Grande Recife e levantamentos realizados pelo Consórcio. Informações complementares foram devidamente referenciadas quanto à fonte pesquisada.

1. INTRODUÇÃO

O Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN apresenta o Relatório de Estudo de Demanda da Região Metropolitana de Recife/PE. O documento compõe o conjunto de estudos da fase 2 dos serviços técnicos contratados pelo BNDES para outorga de concessão dos serviços públicos de transporte ferroviário de passageiros na Região Metropolitana do Recife/PE (RMR), atualmente operado pela Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), e tem como objetivo a projeção da demanda futura do sistema ferroviário segundo cenários futuros de modificação de oferta, com vistas à formatação final do modelo de concessão do serviço público de transporte de passageiros.

O documento está estruturado de forma a apresentar as áreas de influência direta e indireta do sistema metroviário em seu capítulo 2, seguida da contextualização do modelo clássico 4 etapas, com descrição das fases e de sua aplicação para a região em estudo (capítulo 3). O capítulo 4 segue com a descrição dos dados utilizados para a elaboração do modelo de simulação, enquanto o capítulo 5 trata da metodologia para a geração da matriz de origem e destino do transporte coletivo e resultados obtidos.

Na sequência, são descritos os itens que configuram o modelo, com sua definição e representação em *software* de simulação (capítulo 6), além dos itens de parametrização (capítulo 7). O processo de calibração do modelo de simulação, com apresentação dos dados de referência e resultados obtidos, consta no capítulo 8. Em seguida, a descrição da metodologia de projeção de demanda para os anos do horizonte de análise está mostrada no capítulo 9.

O capítulo 10 apresenta a metodologia de análise da migração modal. O capítulo 11 apresenta a definição dos cenários iniciais no Estudo de Demanda, com as premissas de configuração de oferta, tarifa e horizontes. Já o capítulo 12 aborda o processo iterativo com o Estado de Pernambuco e a União, enquanto o capítulo 13 apresenta os resultados dos cenários “Principal” e “Base” por ano horizonte do estudo.

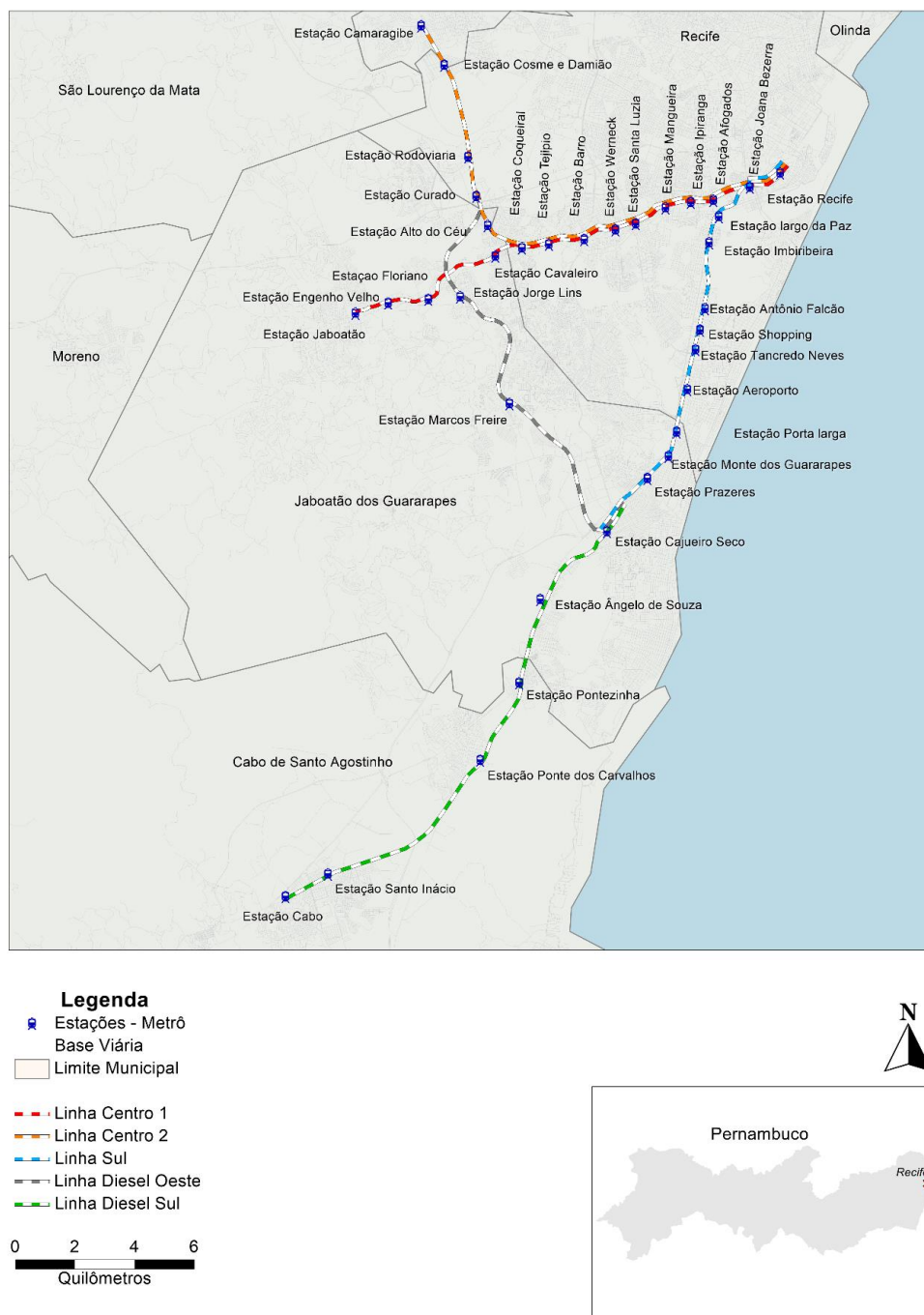
Por fim, o capítulo 14 apresenta os comentários conclusivos em relação aos resultados obtidos e no capítulo 15 os anexos citados ao longo do documento para complementação das análises.

2. ÁREA DE INFLUÊNCIA

A Área de Influência Direta (AID) do sistema de transporte público coletivo ferroviário é formada pela parcela territorial abrangida pelo raio de 1 km das estações do metrô, onde é possível acessar o sistema por modos motorizados ou modos ativos em uma curta distância.

Como pode ser visto na Figura 2-1, consideram-se as três linhas de metrô: Centro 1, Centro 2 e Sul, e no caso do VLT as duas linhas: Oeste e Sul, conectadas ao metrô pelas estações Cajueiro Seco e Curado.

Figura 2-1 Localização do sistema sobre trilhos – Linhas e estações



Fonte: Portal da CBTU. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRAC-ESCON-RHEIN, 2024

A Figura 2-2 ilustra a Área de Influência Direta (AID).

Figura 2-2 Área de Influência Direta do Metrô do Recife

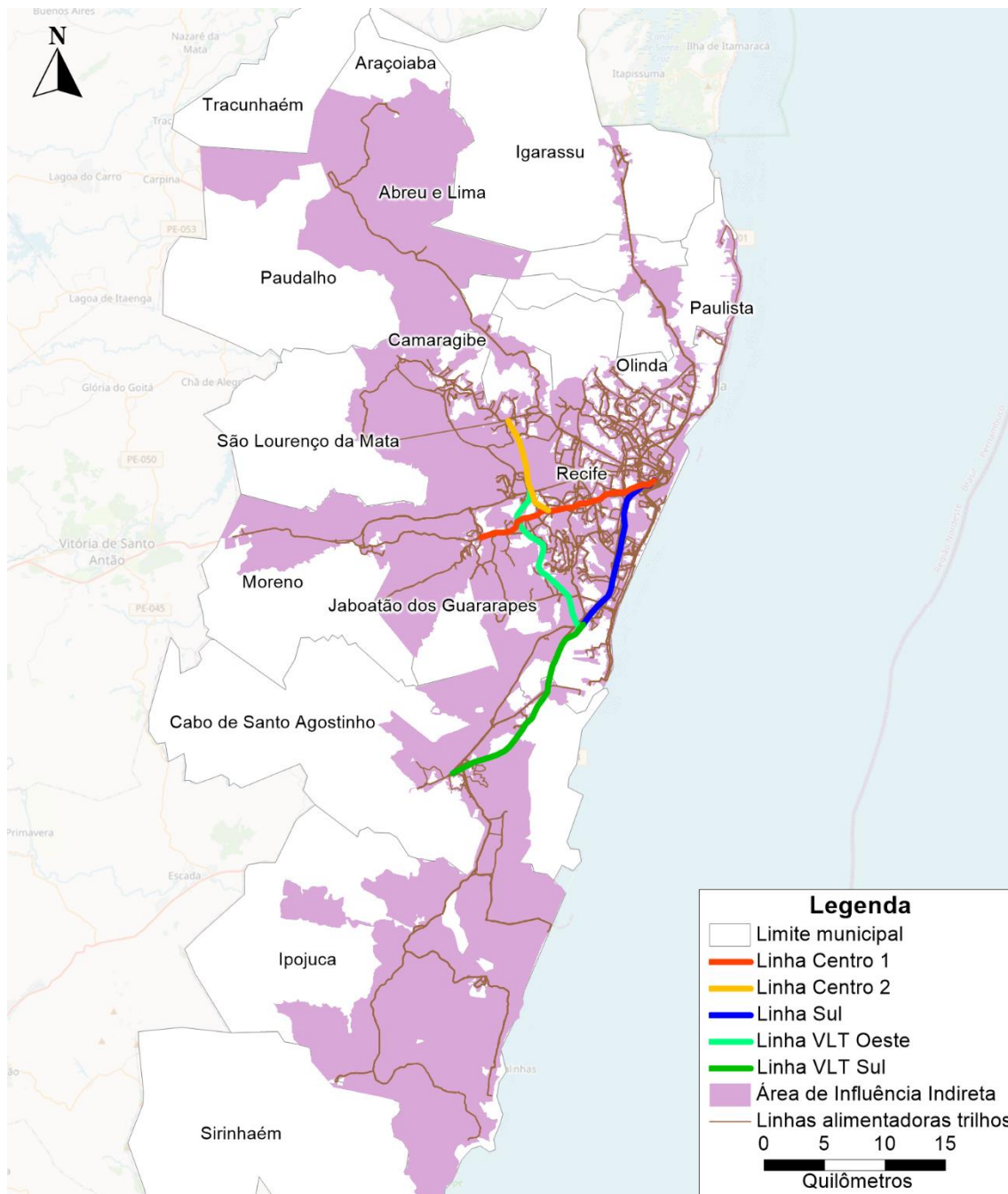


Fonte: Itinerários de trilhos, CBTU, 2023. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Ressalta-se que a Área de Influência Direta (AID) foi ajustada a partir da definição do Termo de Referência, considerando o raio de 1 km ao redor das estações metroviárias, por se entender que estas são as grandes polarizadoras dos usuários deste modo de transporte.

Quanto à Área de Influência Indireta (AII), ilustrada a seguir (Figura 2-3), esta diz respeito à parcela do território composta pelos setores censitários atendidos pelas linhas de ônibus que se integram ou alimentam o sistema ferroviário. Para isso, considerou-se todas as zonas censitárias num raio de 200 metros de cada linha alimentadora/integrada.

Figura 2-3 Área de Influência Indireta do Metrô do Recife



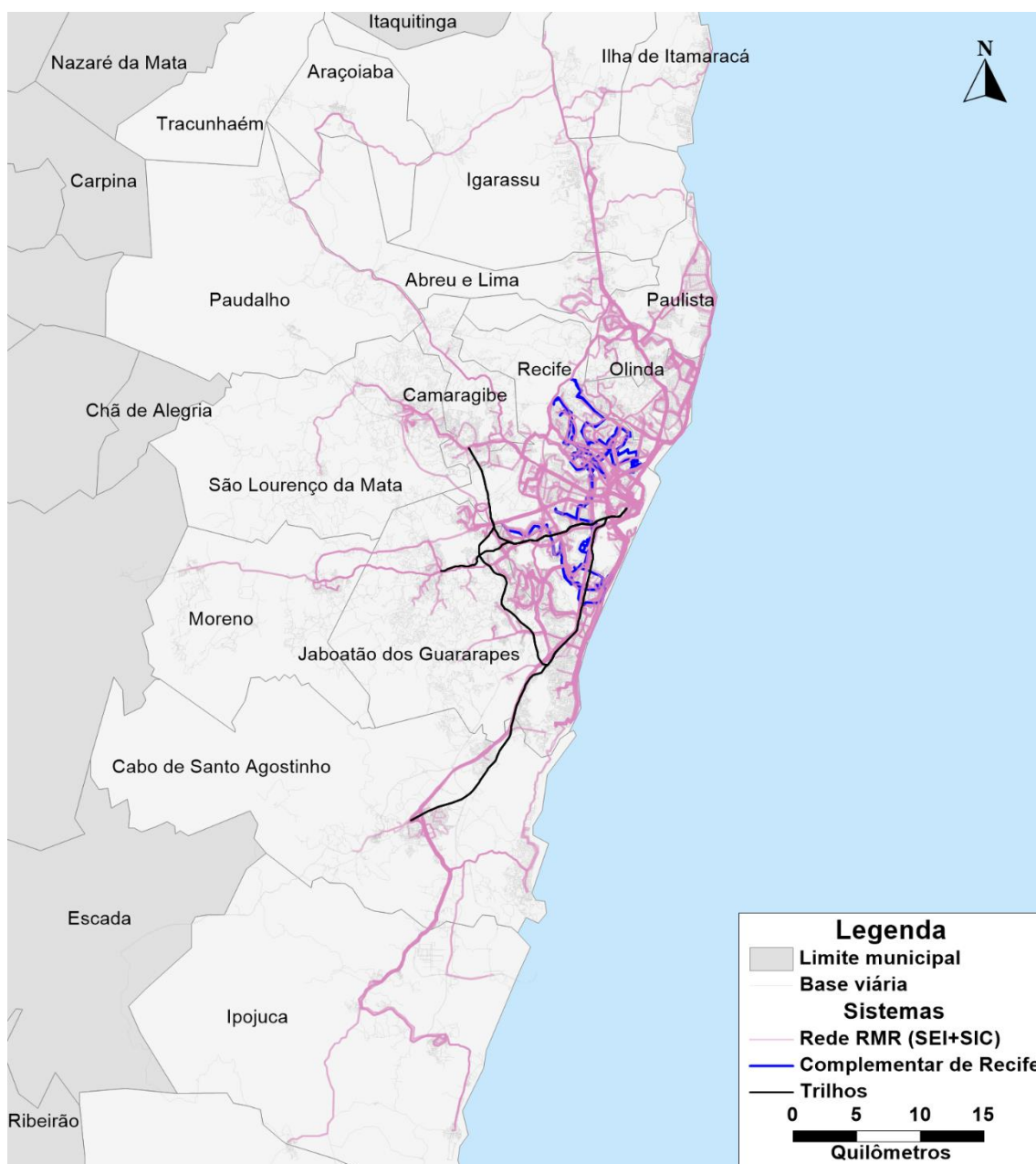
Fonte: GTFS Grande Recife, maio de 2023. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Apesar de atualmente a linha ferroviária atender somente os municípios do Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Cabo de Santo Agostinho, é possível constatar que a parcela territorial indiretamente impactada alcança vários outros municípios da Região Metropolitana do Recife. Isso se deve ao fato de que o sistema metropolitano de ônibus, que conta com

diversas linhas e estações de integração, também possui uma função alimentadora, se integrando com o sistema ferroviário.

O presente estudo de demanda contempla os sistemas de linhas de transporte coletivo por ônibus metropolitano e complementar de Recife, sendo o último pertencente ao STCP (Serviço de Transporte Complementar de Passageiros - permissionários, gerido pela CTTU, autarquia de trânsito e transporte urbano do Recife). A visualização desses sistemas pode ser observada no mapa a seguir (Figura 2-4). Cabe ressaltar que a oferta de transporte representada no modelo não inclui os sistemas municipais de ônibus de Jaboatão dos Guararapes e Cabo de Santo Agostinho, uma vez que tais municípios não disponibilizam as informações publicamente.

Figura 2-4 Sistema de linhas de Transporte Coletivo da RMR



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

3. MODELO 4 ETAPAS

Os métodos apresentados neste capítulo seguem o processo sequencial convencional para estimar a demanda de transporte. É frequentemente chamado de modelo de "quatro etapas", onde se encontram as principais etapas:

- **Etapla 1 — Geração de viagens** — Estimar o número de viagens de passageiros que são produzidas e atraídas pelas zonas de origem e zonas de destino respectivamente;
- **Etapla 2 — Distribuição de viagens** — Estimar o número de viagens de passageiros que são feitas entre as origens e os destinos;
- **Etapla 3 — Divisão modal** — Estimar o modo a ser usado para viagens de passageiros entre as origens e os destinos;
- **Etapla 4 — Alocação** — Estimar os caminhos que cada par O-D utiliza na rede de modelagem, determinando o volume em cada link entre as origens e os destinos.

3.1 GERAÇÃO DE VIAGENS

Esta primeira etapa do processo de modelagem em quatro etapas tem como objetivo estimar a quantidade de viagens produzidas ou atraídas por cada zona de tráfego. A produção e atração de viagens, no período do pico manhã, podem ser explicadas por variáveis socioeconômicas. As viagens são, tipicamente, iniciadas a partir das residências das pessoas e motivadas por atividades de trabalho, estudo, entre outras.

Diante do exposto, as variáveis apresentadas a seguir são aquelas usualmente empregadas nas análises de geração de viagens. Tal fato se deve, sobretudo, à sua importante correlação com a produção e atração de viagens, à disponibilidade dos dados em escalas que podem ser agregadas em zonas de tráfego e à possibilidade de projeção das variáveis para os anos do horizonte de estudo, quando aplicável. São elas:

- População: número total de habitantes que residem em cada zona de tráfego, com eventual segmentação segundo à faixa etária;
- Trabalho: número total de postos de trabalho que estão localizados em cada zona de tráfego;
- Estudo: número total de estabelecimentos de ensino ou número total de vagas em estabelecimento de ensino situados em cada zona de tráfego.

Para cada uma das variáveis, é necessário que os dados sejam:

- Coletados para a situação atual (dados históricos podem ser necessários para preparar a previsão);
- Distribuídos na escala do zoneamento (alguns dados podem estar disponíveis apenas em uma escala mais agregada);
- Projetados no horizonte do estudo (quando aplicável).

Os modelos de atração e de produção de viagens são calibrados separadamente, já que as variáveis que explicam cada uma tendem a ser diferentes. Desta maneira, o total de viagens produzidas será diferente do total de viagens atraídas, sendo necessária a adoção de um método de equilíbrio. O mais usual é fixar o total de viagens produzidas, já que o local de residência é mais estável em relação ao tempo que o local de realização de atividades. Neste caso, o modelo de atração indica apenas a proporção de viagens em cada zona, sendo o valor absoluto ajustado baseando-se na produção.

3.1.1 Análise de regressão para geração de viagens de transporte

A regressão linear múltipla é uma análise estatística que explica a relação entre uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes (ou explicativas). Esta ferramenta é comumente aplicada para a estimativa da geração de viagens futuras.

O objetivo desta análise é definir uma equação que permita medir separadamente a influência de cada variável agindo associadamente a outras variáveis. A forma da equação é apresentada a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

Onde:

- y = variável dependente;
- $x_1 \dots x_n$ = variáveis explicativas relacionadas, por exemplo, ao uso do solo ou características socioeconômicas;
- β_0 = coeficiente de intersecção de regressão linear (quando presente);
- $\beta_1 \dots \beta_n$ = coeficientes de regressão das respectivas variáveis.

Para alcançar um modelo representativo de regressão linear múltipla é necessário, a princípio, estabelecer variáveis explicativas que estão relacionadas ao comportamento de geração de viagens. Assim, as variáveis devem apresentar também um certo nível de significância.

Uma vez definido o modelo estatístico, esse deve ser validado. Para este fim, um teste estatístico padrão comumente utilizado é o coeficiente de correlação múltipla (R), que indica o grau de associação entre a variável dependente (y) e as variáveis independentes. Seu valor varia em um intervalo de -1 a 1. Quanto mais próximo o coeficiente for de 1 (ou -1), melhor será a relação linear entre as variáveis. Por sua vez, a segunda potência de R (R^2) representa, aproximadamente, o percentual de variação do "y" que pode ser explicado pelas variáveis explicativas.

Os testes do p-valor (P) e t-valor (T) orientam a determinação de que o resultado da regressão é estatisticamente relevante e não uma obra do acaso. T igual a zero indica que o resultado da amostra é idêntico à hipótese nula. À medida que a diferença aumenta entre a amostra e a hipótese nula, o valor absoluto de T também aumenta. Assim, quanto maior a magnitude de T , maior a evidência de recusarmos a hipótese nula. A relação entre T e P é inversa, de modo que, quanto maior T , menor P . Se P é menor que um nível de significância escolhido, isso sugere que os dados observados são inconsistentes com a hipótese nula e ela deve ser rejeitada.

Outro teste importante é o de Durbin-Watson, utilizado para detectar a presença de autocorrelação (dependência) nos resíduos de uma análise de regressão. Este teste é baseado na suposição de que os erros no modelo de regressão são gerados por um processo autorregressivo de primeira ordem. Se os erros estiverem correlacionados, a regressão de mínimos quadrados pode subestimar o erro padrão dos coeficientes. Os erros padrão subestimados podem fazer com que seus preditores pareçam significativos quando eles não são. Com uma escala que varia de 0 a 4, quanto mais próximo de 2, o teste indica que não há dependência nos resíduos, sendo a regressão válida.

Portanto, a regressão linear múltipla foi usada para determinar dois modelos de regressão: um para estabelecer o número de viagens produzidas por zona e outro para estabelecer o número de viagens atraídas por zona. Os modelos calibrados estão descritos no **capítulo 8**.

3.1.2 Projeção das variáveis socioeconômicas

A depender das variáveis retidas durante a análise de regressão, a estimativa das viagens em horizontes futuros pode demandar a projeção de diferentes indicadores socioeconômicos, notadamente população, número de empregos e PIB. Dado que o modelo do presente estudo teve a demanda total fixada em relação à produção, apenas indicadores ligados à origem dos deslocamentos precisarão ser projetados. Neste caso, trata-se da evolução da população total.

Todas as projeções populacionais preveem uma estagnação progressiva da população brasileira, que poderá começar a diminuir por volta de 2045. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) realiza projeções populacionais para o Brasil e para as Unidades da Federação. As projeções são estimadas por métodos demográficos, com horizonte atual definido até 2060. As populações projetadas são disponibilizadas por sexo e grupos etários, possibilitando análises acerca da evolução do tamanho e idade da população.

O histórico de evolução populacional, em escala municipal, pode ser analisado pelas fontes complementares dos censos nacionais e das estimativas populacionais produzidas pelo IBGE. O Censo Demográfico é realizado em todos os municípios brasileiros a cada 10 anos. Dessa forma, dados oficiais da população municipal estão disponíveis apenas para 2000, 2010 e 2022. Por sua vez, as estimativas das populações municipais e estaduais são divulgadas pelo IBGE, anualmente, desde 1975. Tais estimativas correspondem ao principal insumo utilizado pelo Tribunal de Contas da União (TCU) para distribuição do Fundo de Participação dos Estados e do Distrito Federal (FPE) e do Fundo de Participação dos Municípios (FPM). As estimativas são calculadas por meio do método matemático denominado AiBi, que utiliza, como insumos básicos, projeções recentes para Brasil e Unidades da Federação, bem como crescimento populacional de cada município na última década, delineada pelas populações recenseadas nos últimos dois Censos Demográficos.

As populações recenseadas servem, assim, de base para cálculo da tendência de crescimento populacional dos municípios, que é confrontada com a tendência observada para a Unidade Federativa. Desta maneira, obtém-se uma elasticidade município/UF que permitirá uma desagregação das projeções populacionais divulgadas em escala estadual. Assume-se, assim, que a elasticidade municipal se mantém também na escala das zonas de tráfego.

As análises de projeção populacional que se seguiram utilizaram-se, assim, de projeções demográficas do IBGE na escala estadual, bem como das estimativas populacionais de municípios divulgadas entre os horizontes 2010 e 2022. As projeções utilizadas são descritas na **seção 9.2**.

3.1.3 Previsão de geração de viagens

Uma vez definidos os modelos de regressão e a projeção da população total, são executados os seguintes passos. Para cada horizonte, projetam-se as variáveis ligadas ao modelo de produção na escala zonal e aplica-se a função de regressão. Este processo tem por resultado a projeção do total de viagens produzidas por zona de tráfego até o último ano do horizonte de estudo.

Em seguida, o modelo de atração é aplicado com as variáveis no ano de referência, sem necessidade de projeção. Isso é possível porque, para cada ano da previsão, o número de viagens atraídas em cada zona é ajustado para que seu total seja igual ao número total de viagens produzidas, já que há maior inércia do crescimento populacional em comparação com o crescimento econômico. Em outras palavras, os modelos de produção são considerados como preditores mais precisos da realidade. Assim, para cada ano futuro, a proporção de viagens atraídas por cada zona em relação ao total é mantida e aplicada ao total de viagens produzidas, garantindo a compatibilidade entre os dois modelos.

No presente estudo, os impactos duradouros da pandemia da Covid-19 (decretada pela Organização Mundial de Saúde – OMS – em março de 2020) nos deslocamentos realizados por transporte coletivo são abordados de forma direta nas análises de projeção de demanda ao se considerar que eles estão embutidos na coleta de dados da situação atual.

3.2 DISTRIBUIÇÃO DE VIAGENS

A segunda etapa do processo de modelagem possui a função de quantificar e distribuir os fluxos de viagens por pares de zonas (origem e destino) a partir do balanceamento dos resultados de Produção e Atração, determinados na etapa anterior (Geração de Viagens). A distribuição das viagens requer variáveis explicativas que estão relacionadas à impedância (geralmente uma função do tempo e/ou custo da viagem) da viagem entre zonas, assim como a relação de viagens produzidas e atraídas por zonas de origem e zonas de destino, respectivamente.

As entradas para os modelos de distribuição de viagens incluem as saídas de geração de viagens - produções e atrações para cada zona - e medidas de impedância de viagem entre cada par de zonas, obtidas a partir das redes de transporte. As saídas são tabelas de viagem, zona de produção para zona de atração.

A metodologia escolhida para a distribuição das viagens foi o modelo Fratar, que trata a impedância entre pares não por características da rede, e sim a partir de uma matriz semente. O modelo tem como premissa que a distribuição de viagens futuras de uma dada zona de origem é proporcional à distribuição de viagens existentes na zona e que a distribuição destas viagens futuras é modificada pelo fator de crescimento da zona para a qual as viagens são atraídas.

Assim, o método considera a localização de uma zona em relação às demais, estimando o número total de viagens que originam e terminam em cada zona no ano projetado e a distribuição das viagens futuras, segundo proporção da distribuição atual de viagens modificada pelo fator de crescimento da zona para qual as viagens são atraídas. Dessa maneira, são produzidos dois valores distintos para cada sentido do movimento entre zonas ($A > B$ para $B > A$), sendo utilizada a média entre os dois volumes.

O processo de cálculo é iterativo até que haja um equilíbrio entre as viagens calculadas e desejadas. Na primeira iteração, as estimativas de viagens interzonas são distribuídas na proporção dos volumes interzonas existentes. A partir do novo valor, obtém-se um novo fator de crescimento que é aplicado para o cálculo da segunda aproximação, e assim sucessivamente.

A formulação matemática do método de distribuição Fratar é apresentada a seguir:

$$T_{i-j} = \frac{T_{i(G)} * T_{i-j} * E_j}{t_{i-j} * E_j + t_{i-k} * E_k + \dots + t_{i-n} * E_n}$$

Onde:

- T_{i-j} = número de viagens previstas da zona i para a zona j ;
- $T_{i(G)}$ = número de viagens esperadas, geradas na zona i ;
- $T_{i-j \dots i-n}$ = número existente de viagens entre as zonas i e todas as outras zonas $i \dots n$;
- $E_j \dots E_n$ = fatores de crescimento de cada zona $i \dots n$.

3.3 DIVISÃO MODAL

O modelo de divisão modal tem como objetivo determinar a probabilidade de escolha dos usuários diante das alternativas de transportes disponíveis na área em estudo. A abordagem do modelo é baseada no conceito de utilidade da teoria do comportamento do consumidor. O

processo de decisão considera três fatores: 1) as características dos sistemas de transportes (tempo de viagem, custo, conforto, etc.); 2) as características das viagens (motivo, período de realização da viagem, etc.); e 3) o nível socioeconômico do consumidor (renda, estrutura domiciliar, propriedade de veículos, etc.). Logo, as pessoas, diante da necessidade de deslocar-se no espaço e no tempo, escolhem dentre as alternativas possíveis aquela cujos atributos lhe proporcionem o maior nível de satisfação, ou seja, a alternativa com maior utilidade. Torna-se importante avaliar as variáveis que influenciam na escolha do modo de transporte, como o tempo de viagem, o tempo de acesso ao modo, o custo do modo, dentre outras. Além disso, é preciso avaliar quais são os efeitos esperados para cada variável: utilidade ou “desutilidade”. O conceito de “desutilidade” vem do fato de uma variável, como tempo de viagem, afetar negativamente a utilidade de uma alternativa de transporte.

Para a etapa de divisão modal foi utilizado o *software* TransCAD® que utiliza ferramentas de escolha modal baseadas nos modelos *Logit*. O modelo *Logit* relaciona a probabilidade de decisão de um indivíduo em escolher uma alternativa dentro de um conjunto de alternativas disponíveis, dada a utilidade dessa alternativa para o mesmo indivíduo. Este modelo determina a proporção de viagens que caberá a cada modo específico k de acordo com a seguinte expressão:

$$P(k) = \frac{e^{U_k}}{\sum_x e^{U_x}}$$

Onde:

- $P(k)$ = probabilidade de escolha do modo k ;
- k = um modo de transporte;
- x = são todos os modos concorrentes;
- U_x = utilidade do modo x .

A utilidade é dada pelo valor alocado por um indivíduo a um serviço (ou atributo) ou a um produto, e só se torna significativa quando comparada com valores de outras opções. Esta medida quantitativa se formaliza através de uma função matemática chamada de função utilidade. A função utilidade é vinculada a uma série de atributos que são os elementos que fazem parte de todo desenvolvimento do processo estudado, no caso o transporte. A configuração mais comum para a função utilidade é uma função linear, em que os atributos se combinam de forma aditiva:

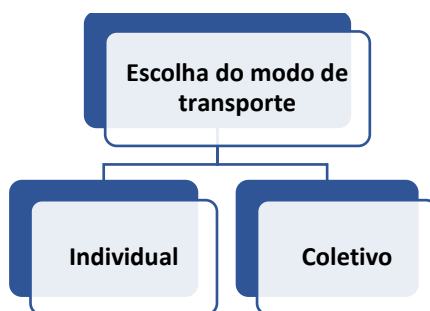
$$U = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n$$

Onde:

- U_i = utilidade da opção “ i ”;
- X_1, X_2, \dots, X_n = são as variáveis de serviço (atributos);
- a_1, a_2, \dots, a_n = são os coeficientes do modelo;
- a_0 = componente (constante) aleatória;

O modelo de divisão modal utilizado no trabalho se refere ao “*Nested Logit Model*”, no qual as escolhas feitas pelos usuários são realizadas de forma sequencial e, assim, a decisão de qual modo de transporte utilizar em dado par de origem e destino é racionalizada através de uma árvore de decisão (Figura 3-1). Na primeira fase do modelo, denominada de calibração, considerou-se duas alternativas de transporte disponíveis atualmente na área de estudo: individual ou coletivo. Volta-se então ao caso particular do *Nested Logit* denominado *Logit Multinomial*, onde não são feitas agregações em nichos para os modos de transporte.

Figura 3-1 Atributos considerados no modelo



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

A estimativa de divisão modal elaborada pelo TransCAD® gera um relatório estatístico que busca validar o modelo. A verificação estatística é realizada a partir do teste “t” de Student: se o valor absoluto “t” for menor que 2, é provável (95% de intervalo de confiança) que a variável não apresente significância para o modelo, podendo ser desconsiderada. Testa-se, então, diferentes configurações de variáveis. Se alguma variável é inserida e apresenta um coeficiente em sinal oposto ao esperado (não segue a lógica esperada de utilidade ou “desutilidade”) ou apresenta o valor absoluto do teste “t” de Student abaixo de 2, descarta-se ou ajusta-se a alternativa

As especificações do modelo utilizado são apresentadas no **capítulo 10**.

3.4 ALOCAÇÃO DE VIAGENS

A alocação de viagens de transporte coletivo trata do encaminhamento de viagens de passageiros interligadas (incluindo acesso e saída a pé) através da rede de transporte público disponível. É um elemento chave no processo de previsão da demanda de viagens urbanas. O modelo de alocação de transporte coletivo prevê os fluxos da rede que estão associados com os cenários de planejamento futuro. Esta etapa é conduzida através do *software* TransCAD®. Os detalhes do modelo e alocação estão descritos no **capítulo 7**.

3.5 APLICAÇÃO DAS ETAPAS

Conforme apresentado anteriormente, as quatro etapas do modelo tradicional para estudos de demanda de transporte podem ser resumidas pelos seguintes tópicos:

- **Etapa 1 — Geração de viagens** — Estimar o número de viagens de passageiros que são produzidas e atraídas, pelas zonas de origem e zonas de destino, respectivamente;
- **Etapa 2 — Distribuição de viagens** — Estimar o número de viagens de passageiros que são feitas entre as origens e os destinos;
- **Etapa 3 — Divisão modal** — Estimar o modo a ser usado para viagens de passageiros entre as origens e os destinos;
- **Etapa 4 — Alocação** — Estimar os caminhos que cada par O-D utiliza na rede de modelagem, determinando o volume em cada link entre as origens e os destinos.

Devido ao avanço tecnológico e possibilidade de utilizar a bilhetagem eletrônica dos sistemas de transporte, é possível determinar os fluxos de passageiros entre zonas de tráfego com precisão, de modo a dispensar as etapas **de geração, distribuição e divisão modal de viagens** para a criação de uma matriz de transporte coletivo com um processo inovador e mais preciso. O detalhamento da metodologia utilizada para a obtenção da matriz de origem e destino do transporte coletivo é descrito no **capítulo 5**.

Entretanto, as **Etapas 1 e 2** se fazem necessárias no embasamento da projeção da matriz de transporte coletivo. É necessário definir, pela **Etapa 1**, os aspectos socioeconômicos e demográficos que explicam a produção e atração de viagens por zona de tráfego, para, então, projetá-los ao longo do horizonte de estudos. Em seguida, na **Etapa 2**, as projeções de produção e atração de viagens por zona são distribuídas para obtenção das matrizes O-D futuras. O processo de levantamento de dados para a geração de viagens e sua distribuição entre os pares O-D estão descritos no **capítulo 9**.

A **Etapa 3**, de **divisão modal**, consiste numa sequência dos trabalhos, na estimativa do aumento da matriz de transporte coletivo, advinda da migração de usuários do transporte individual (**capítulo 10**).

Finalmente, na **Etapa 4**, de **alocação**, utiliza-se o *software* TransCAD® para a simulação em que, por meio de processos heurísticos, é possível estimar como os fluxos de viagens entre os pares O-D carregam a rede de transporte simulada dentro dos cenários propostos. A configuração do modelo com todos os parâmetros utilizados está descrita no **capítulo 7**. Após a configuração, o modelo passa por um processo de calibração, no qual são aferidos os resultados obtidos em simulação de um cenário base, que mimetiza a configuração atual do sistema, de maneira a apresentar resultados semelhantes aos carregamentos e embarques reais observados. O processo de calibração e seus resultados são apresentados no **capítulo 8**.

Uma vez calibrado o modelo, realizam-se os ajustes de rede e/ou regras tarifárias definidas nos cenários iniciais descritos no **capítulo 11** que se deseja estudar. Após a análise dos resultados iniciais, descreve-se o processo iterativo com Estado PE e União no **capítulo 12**, em que são apresentadas simulações e análises de sensibilidade para subsidiar a tomada de decisão quanto à configuração a ser escolhida para os trilhos. Os resultados das simulações para todos os anos do horizonte (Cenário Principal) são apresentados no **capítulo 13**.

4. DADOS DE ENTRADA DO MODELO

O edital deste estudo previa, como parte do produto a ser entregue, atividades de revisão e atualização da rede de transporte, que incluíam: pesquisas Origem-Destino veicular; pesquisas de características operacionais do transporte coletivo, bem como pesquisa de embarque/desembarque e pesquisa de ocupação visual; pesquisas de fluxo viário e contagens de tráfego; além de outros trabalhos a serem realizados em campo.

No entanto, em função de vantagens metodológicas em relação à amostragem, atualidade e confiabilidade da calibração, foi utilizada, na presente modelagem, matriz origem-destino proveniente de dados de bilhetagem eletrônica e de rastreamento de veículos por GPS. Essas vantagens são detalhadas na metodologia de elaboração da matriz O-D no **Capítulo 5**.

Os demais dados de *input* do modelo, como as características operacionais das rotas de ônibus modeladas tais como número de viagens e capacidade, seus itinerários georreferenciados e todo o modelo tarifário que compõe o sistema analisado com suas regras específicas de integração e valores foram levantados junto aos órgãos responsáveis, análise da bilhetagem eletrônica, sítios na internet como *GoogleMaps* e *Moovit* e outras fontes alternativas.

Esses dados foram atualizados para a data base de maio de 2023, em atendimento ao escopo de atualização do aditivo de Contrato.

Para calibrar o modelo foram usados os dados conforme a Tabela 4-1:

Tabela 4-1 Dados utilizados para construção do modelo

Dados	Descrição
Base viária	Atualizada no âmbito deste projeto com base em fontes externas (<i>Google Maps, Open Street Map</i>)
Linhas e estações / Pontos de Embarque e Desembarque (PEDs)	Linhas de metrô e VLT Arquivos recebidos da CBTU
	Consórcio Grande Recife (linhas de ônibus metropolitanos) KMZ (arquivo de coordenadas geográficas) entregue pelo Grande Recife Arquivos recebidos do Grande Recife com informações operacionais de maio/2023
	Sistema Complementar de ônibus Informação retirada do estudo anterior e atualizada com dados do portal da Prefeitura do Recife
	A localização geográfica das estações de metrô, dos terminais de integração e das estações intermediárias do BRT foi conferida manualmente
Horários	Linhas de metrô e VLT Arquivos recebidos da CBTU
	Consórcio Grande Recife (linhas de ônibus metropolitanos) Planilha do Quadro de Horários recebida do Grande Recife
	Sistema Complementar de ônibus Informações coletadas pelo MOOVIT
Tarifas	Metrô/VLT e integrações tarifárias metrô-ônibus Arquivos recebidos do Grande Recife
	Consórcio Grande Recife (linhas de ônibus metropolitanos) Arquivos recebidos do Grande Recife

Dados	Descrição
	<i>Sistema Complementar de ônibus</i> Arquivos recebidos do Grande Recife
Demanda do Transporte Coletivo (Matriz Origem-Destino)	Consórcio Grande Recife (linhas de ônibus metropolitanos) Referência baseada nos dados de bilhetagem
	<i>Sistema Complementar de ônibus</i> Referência baseada nos dados de bilhetagem
	<i>Metrô/VLT</i> Referência baseada nos dados de bilhetagem

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRA-CESCON-RHEIN, 2024

Os dados recebidos de demanda do transporte coletivo foram tratados para sua devida compatibilização e sistematização, tendo sido adotado o dia 09/05/2023 como data de referência, pois é o dia com quantidade de validações diárias mais próximo à média dos dias úteis do mês de maio. Quanto à demanda metroviária, tais dados correspondem ao Sistema de Bilhetagem Eletrônica (SBE) e ao relatório PTE/PTD, que são relatórios de contabilização dos passageiros do sistema, por dia, linha e tipo de entrada (direta ou integrada com o SEI). Quanto à demanda de ônibus, foi utilizado o SBE dos operadores do sistema de ônibus. Considera-se que a estimativa da demanda modelada representa a operação regular no ano de 2023, ou seja, considerando o contexto posterior à pandemia de COVID-19.

O processo de levantamento dos dados de demanda e oferta dos sistemas de ônibus foi, de maneira geral, o mais extenso, dado que são necessários não somente os registros de entradas individuais (advindos do SBE) quanto informações de viagens, traçado e registros GPS para permitir reconstituir o trajeto dos usuários. Desta forma, fizeram-se necessárias várias trocas e validações, intermediadas pelo Grande Recife, notadamente em relação aos dados de demanda, oferta e política tarifária. Destaca-se a visita presencial à sede do consórcio, realizada entre os dias 3 e 8 de janeiro de 2024, onde foi possível tratar das seguintes demandas, dentre outras:

- Conferência exaustiva das linhas ativas e inoperantes, permitindo retificar inconsistências entre o SBE e o consolidado inicialmente enviado pelo Grande Recife;
- Conferência sob demanda do traçado de certas linhas, bem como definição do traçado principal de linhas com múltiplas variantes de atendimento;
- Listagem exaustiva dos validadores externos (que representam tanto a bilheteira de terminais sem integração temporal quanto validadores móveis utilizados na porta traseira de certos veículos durante o período de maior fluxo dos terminais com integração temporal);
- Obtenção das coordenadas geográficas dos terminais integrados e estações BRT;
- Intermediação na obtenção dos registros GPS junto às empresas operadoras, bem como na identificação de inconsistências em certos veículos.

Quanto ao sistema de trilhos, notou-se uma diferença significativa (de cerca de 20 mil passageiros no dia) entre os relatórios PTE/PTD e os dados de bilhetagem, ambos fornecidos pela CBTU, especificamente na estação Barro, cuja integração temporal foi implementada apenas em junho/2023. Foi esclarecido pela empresa que, em maio/2023, a linha de bloqueio entre a estação de metrô e o terminal integrado de ônibus ainda não estava instalada, o que impossibilitou o controle das entradas dos usuários pelo SBE. Os valores apresentados no relatório PTE tratam-se de uma estimativa baseada em dados históricos. Discrepâncias menores foram observadas entre as duas fontes nas demais estações, de maneira que os dados de

bilhetagem eletrônica (efetivamente utilizados para produção da matriz Origem-Destino) foram elencados como fonte prioritária. Essa abordagem está coerente com a adotada no estudo anterior, que foi definida após reuniões com as partes envolvidas.

5. ELABORAÇÃO DA MATRIZ O-D

A matriz origem-destino (O-D) é um dos dados de entrada (*input*) mais importantes para o modelo de demanda, pois representa os fluxos de pessoas entre as diferentes zonas consideradas na área de estudo, fluxos esses que são alocados nos diferentes serviços de transporte que integram a rede de simulação na fase inicial da modelagem de demanda - alocação de viagens.

Com o intuito de levantar os deslocamentos da região metropolitana de maneira atualizada e fidedigna, foi desenvolvida uma metodologia para a geração de matriz de origem e destino com base no processamento dos dados do Sistema de Bilhetagem Eletrônica (SBE) e do Sistema de Rastreamento por GPS (quando disponíveis). Essa metodologia apresenta vantagens em relação ao uso da matriz O-D tradicional proveniente de Pesquisa O-D Domiciliar, quando utilizada para finalidades de planejamento operacional ou em análises relacionadas que exigem maior precisão de resultado. A seguir estão resumidas algumas dessas vantagens relacionadas à matriz O-D gerada dos sistemas SBE e GPS:

- Amostra de dados superior (maior precisão): amostra de dados superior às amostras das pesquisas tradicionais de origem destino, uma vez que os dados de bilhetagem contemplam a totalidade dos registros de usos de cartões nos sistemas de transporte da RMR e em dias diversos;
- Coleta passiva: não é necessário fazer entrevistas espaçadas em vários dias, ou confiar na veracidade da resposta de cada um dos entrevistados/possibilidade de erro na transcrição dos dados;
- Qualidade da calibração: melhoria do processo e precisão da calibração, já que a matriz O-D a ser alocada é montada a partir da mesma fonte (dados SBE) que gera os dados de referência de demanda com os quais o resultado da alocação será comparado;
- Atualidade: os dados de SBE são mais recentes, sendo escolhida uma data de demanda média do transporte, representando um dia típico real, de modo a representar melhor os padrões de deslocamentos atuais.

Além dos pontos apresentados, os dados SBE correspondem a dados de viagens efetivamente realizadas pelos usuários, enquanto nas matrizes O-D tradicionais corresponderem a respostas/relatos sobre viagens informadas como reais ao longo de todos os dias de coleta.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

O estudo de demanda da região metropolitana contemplou os seguintes sistemas descritos na Tabela 5-1:

Tabela 5-1 Caracterização dos dados usados para estimar a matriz O-D de cada sistema

Sistema	Tipo de entrada	SBE	GPS
Consórcio Grande Recife	Embarques no ônibus	Sim	Sim ¹
	Embarques em estações ou terminais	Sim	Não se aplica
Metrô/VLT	Embarques em estações	Sim	Não se aplica

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

5.2 METODOLOGIA DE GERAÇÃO DA MATRIZ O-D A PARTIR DE DADOS DO SBE

A elaboração da matriz O-D começa pela determinação de uma matriz semente, que contém todos os registros de bilhetagem de usuários para os quais foi possível determinar tanto a zona de embarque quanto de desembarque. Isso se dá através da identificação dos usos e do rastreamento, ao longo do dia útil 09/05/2023, dos passageiros portadores de bilhetes eletrônicos pessoais e de uso múltiplo. Usuários que pagaram em dinheiro ou que não puderam ser rastreados por algum outro motivo não integram a matriz semente, sendo considerados apenas no momento da expansão para obtenção da matriz O-D definitiva.

A localização das diferentes entradas realizadas ao longo do dia foi possível por um dos seguintes métodos:

- GPS: Correspondência entre a hora de validação da entrada e a dos eventos GPS, quando há georreferenciamento;
- Percentual: Relação proporcional entre o momento de validação da entrada e a duração total da viagem, baseando-se na abertura e fechamento de viagem do SBE, quando não há georreferenciamento;
- Direta: Utilização da posição georreferenciada das estações e terminais, no caso das entradas via bilheteiras ou linhas de bloqueio.

As seguintes informações foram usadas a partir dos dados do SBE (Tabela 5-2):

Tabela 5-2 Requisitos dos campos do SBE

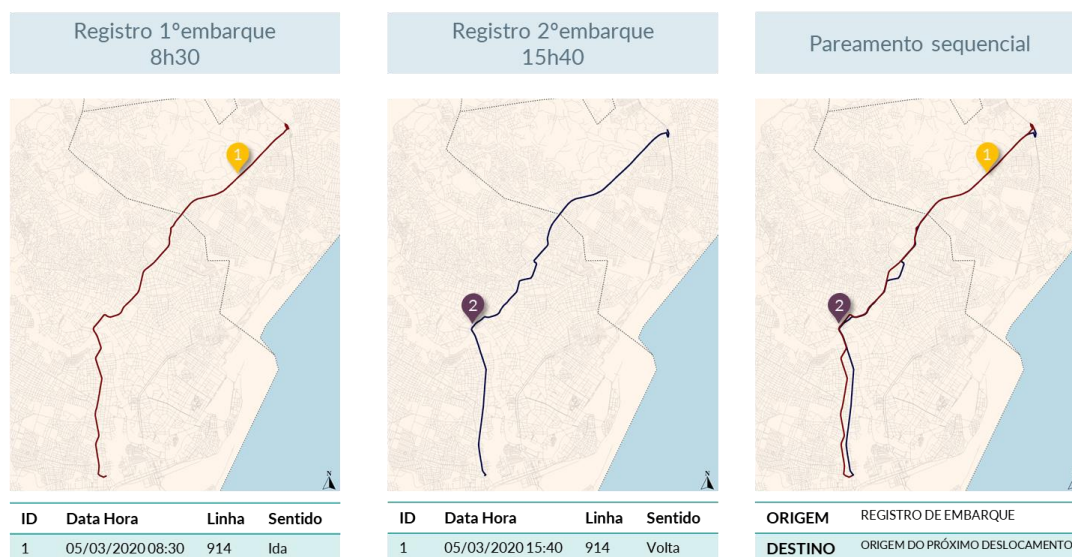
Descrição do Campo	Código
Identificação da linha ou estação em que se deu o uso do cartão	ID_LINHA
Sentido da viagem (apenas linhas)	SENTIDO
ID da viagem (apenas linhas)	ID_VIAGEM
ID do veículo (apenas linhas)	ID_VEÍCULO
Data e hora inicial e final da viagem registrado pelo operador (apenas linhas)	H_INI e H_FIM
ID único do cartão (código único para o caso de pagamento em dinheiro)	ID_USUARIO
Data e hora do uso	H_USO
Identificação da origem do dado (sistema de transporte)	FONTE

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

¹ Apesar de todas as empresas operadoras terem fornecido registros GPS, há viagens ou linhas específicas cujo veículo utilizado não consta na base consolidada. Uma análise realizada durante a produção da matriz OD revelou que cerca de 3% das viagens do SBE não possuem GPS e outros 2% possuem registros inconsistentes que não representam corretamente a viagem. A maior parte destas viagens correspondem à região norte da RMR, possuindo um impacto limitado na demanda do Metrô/VLT.

Para a obtenção da matriz O-D, aplicou-se uma metodologia de rastreamento reverso do uso do cartão atrelado à característica de sua utilização e ao horário de partida. Dessa maneira, assumiu-se que o primeiro uso do cartão no dia corresponde à origem da viagem e o registro final, ao destino. Cruzando essas informações tem-se o par O-D daquele passageiro para aquela viagem. A Figura 5-1 apresenta um exemplo de como é realizado esse cruzamento de informações.

Figura 5-1 Exemplo de cruzamento de dados de utilização do bilhete eletrônico



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Para tratar os casos em que o passageiro usa mais de uma linha para chegar ao destino, utilizou-se a informação da integração tarifária. Houve ainda um tratamento para identificar múltiplos usos do cartão em um curto intervalo de tempo, para os casos de pessoas que viajam juntas usando o mesmo cartão, ou que fazem escalas ao longo do trajeto. Esse processo resultou na geração da matriz semente, que contém apenas trajetos rastreáveis.

Em seguida, iniciou-se o processo de crescimento da matriz, que visa determinar os totais reais de atração e produção por zona. Esse processo considera que o total real de usuários inclui entradas não rastreáveis ao longo do dia, por exemplo:

- Entradas sem uso de bilhete próprio, incluindo pagamentos em dinheiro ou gratuidades liberadas pelo agente de bordo;
- Usuários com apenas uma entrada registrada ao longo do dia, impedindo o pareamento do par origem-destino;
- Entradas associadas a uma viagem de ônibus invalidada, como quando há falhas nos registros GPS e na abertura/fechamento das viagens.

Neste estudo, a expansão dos usuários considerou os seguintes períodos de modelagem: período 1, entre 0h e 4h59; período 2, entre 5h e 8h59; período 3, entre 9h e 14h59; período 4, entre 15h e 19h59; e período 5, entre 20h e 23h59. Estes períodos se referem ao horário em que o usuário iniciou o trajeto, e foram utilizados somente no contexto da expansão da matriz semente. A matriz final, por sua vez, é segmentada nas 24 horas do dia analisado.

Para cada um dos períodos de modelagem, o fator de expansão aplicado a cada par O-D é determinado a partir da seguinte fórmula:

$$f = \frac{\sum_d T}{\sum_d S}$$

Sendo:

- f = fator de expansão
- d = dimensões de expansão
- T = total de usuários
- S = matriz semente

A utilização da bilhetagem eletrônica como base do estudo permitiu que a expansão fosse agregada em várias dimensões, o que reduz o erro intrínseco a qualquer metodologia de crescimento de matriz. Desta maneira, são feitas várias expansões cumulativas até que a demanda expandida corresponda ao total de usuários registrados na bilhetagem. As dimensões escolhidas para a realização da primeira expansão neste estudo foram:

- A linha de embarque do usuário;
- O sentido da viagem; e
- Período da viagem.

Há casos em que não há nenhum usuário rastreável em determinada linha e sentido para um período específico, de forma que a primeira expansão não representa todos os usuários. Por consequência, a demanda resultante da primeira expansão ainda não atinge a demanda total, de maneira que expansões menos específicas se fazem necessárias. De maneira geral, a primeira expansão tende a não conseguir representar linhas de menor demanda, especialmente em períodos mais ociosos.

A segunda expansão considera a zona de origem e o período, para viagens com zonas de origem conhecida. Para os raros casos em que não foi possível estimar a zona de origem, a terceira expansão considera apenas o período. Por fim, há poucos casos, especialmente em períodos fora do pico, em que o fator de expansão obtido após aplicação cumulativa das três expansões é considerado muito elevado (acima de 10). Isso indica que não há correspondentes rastreáveis o suficiente para realizar a expansão destas viagens específicas, de maneira que todas as expansões realizadas até então são revertidas (o fator de expansão destas viagens volta a 1). Em seguida, é realizada uma última expansão para distribuir os usuários faltantes entre todas as viagens de cada sistema (ônibus ou trilhos) e período de modelagem, com simples intuito de alcançar o total de passageiros registrados.

5.3 RESULTADOS OBTIDOS

A matriz gerada baseou-se no zoneamento definido para esse estudo, e alguns resultados chave são apresentados na Tabela 5-3 e imagens a seguir. Nota-se que o período de pico da manhã estudado (5h às 7h59) não corresponde exatamente ao período 2 (5h às 8h59), considerado na expansão da matriz, já que a matriz final foi gerada por faixa horária.

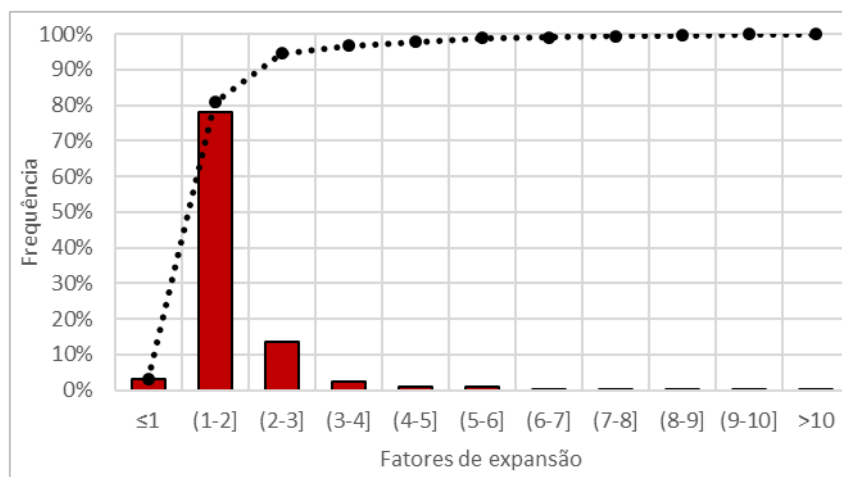
Tabela 5-3 Atributos principais para a construção do modelo

Atributo	Dado
Período estudado	5h e 7h59
Zonas de tráfego	530
Pares com demanda	35.380
Volume de viagens	230.618

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAC-ESCON-RHEIN, 2024

Um dos efeitos diretos de utilizar os dados de bilhetagem eletrônica é a abundância de dados na matriz semente, o que torna os fatores de expansão pequenos. Como resultado do tratamento metodológico, obtém-se uma matriz do pico manhã com uma distribuição de fatores menor ou igual a 2 em cerca de 80% dos trajetos da matriz semente, como demonstrado pela linha de Pareto do histograma apresentado na Figura 5-2. Apenas 2,2% destes trajetos apresentam um fator superior a 5, enquanto apenas 0,02% ultrapassam ligeiramente o limite inicial de 10, devido à aplicação da quarta expansão no conjunto da matriz.

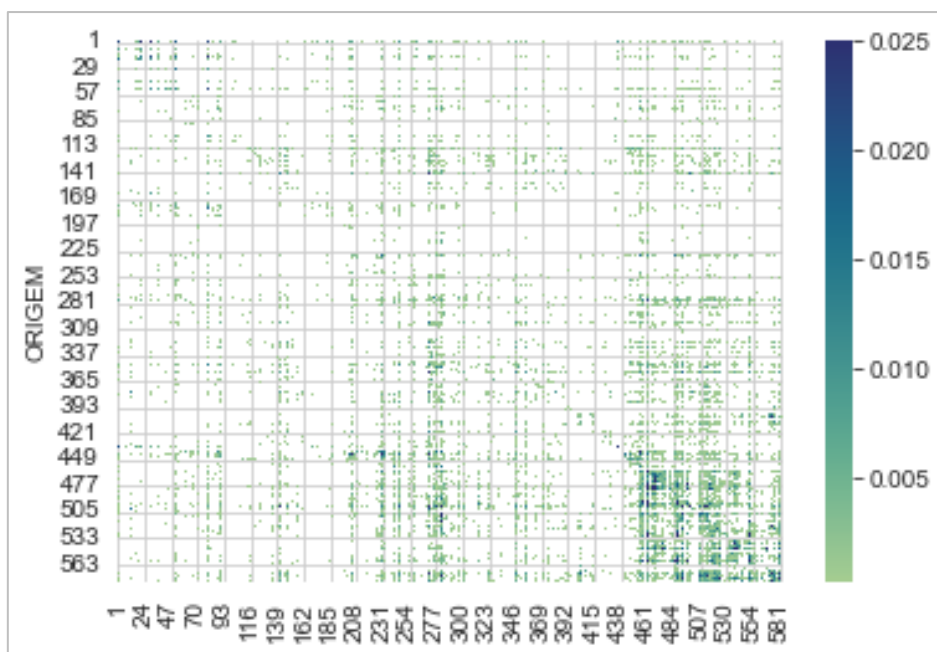
Figura 5-2 Distribuição dos fatores de expansão



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Uma análise interessante da distribuição de viagens é a visualização dos volumes entre os pares O-D usando um esquema de calor como o da Figura 5-3. Os pares em que não foi identificada nenhuma viagem durante o período estudado são representados em branco. Para cada par, foi definido sua representação percentual frente ao total de viagens, e a escala de cores demonstra que, por ser um zoneamento detalhado com muitos pares, o valor máximo de um par é de 0,03% da demanda. Deve-se sempre ponderar que as zonas de origem e destino são, respectivamente, as zonas do primeiro embarque e último desembarque, e não o ponto de partida e chegada real, que inclui caminhada. Isso explica a existência de zonas sem demanda contabilizada. Ressalta-se ainda que a numeração das 530 zonas, herdadas do estudo anterior, não é contígua, de maneira que a 530ª zona tem o ID 581.

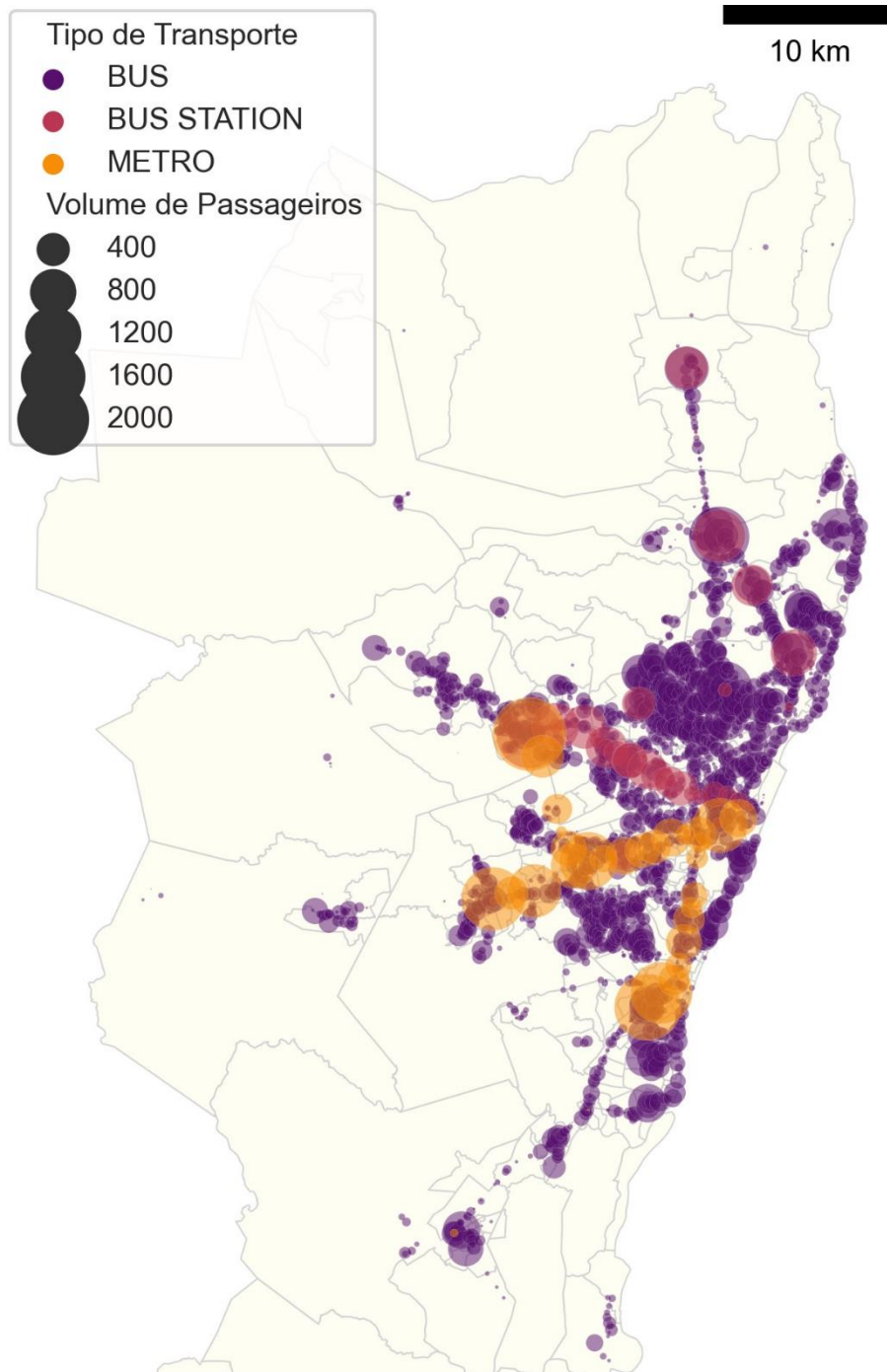
Figura 5-3 Volumes entre pares O-D (pico da manhã)



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

O objetivo da imagem é demonstrar que alguns pares interagem nitidamente entre si, com forte tendência de movimentos no interior da região central (Recife e Olinda). Esse comportamento é realçado ao se observar a distribuição do início e fim dos deslocamentos, conforme Figura 5-4 abaixo. Em viagens de mais de uma perna, são considerados apenas o primeiro embarque e o último desembarque (Figura 5-5).

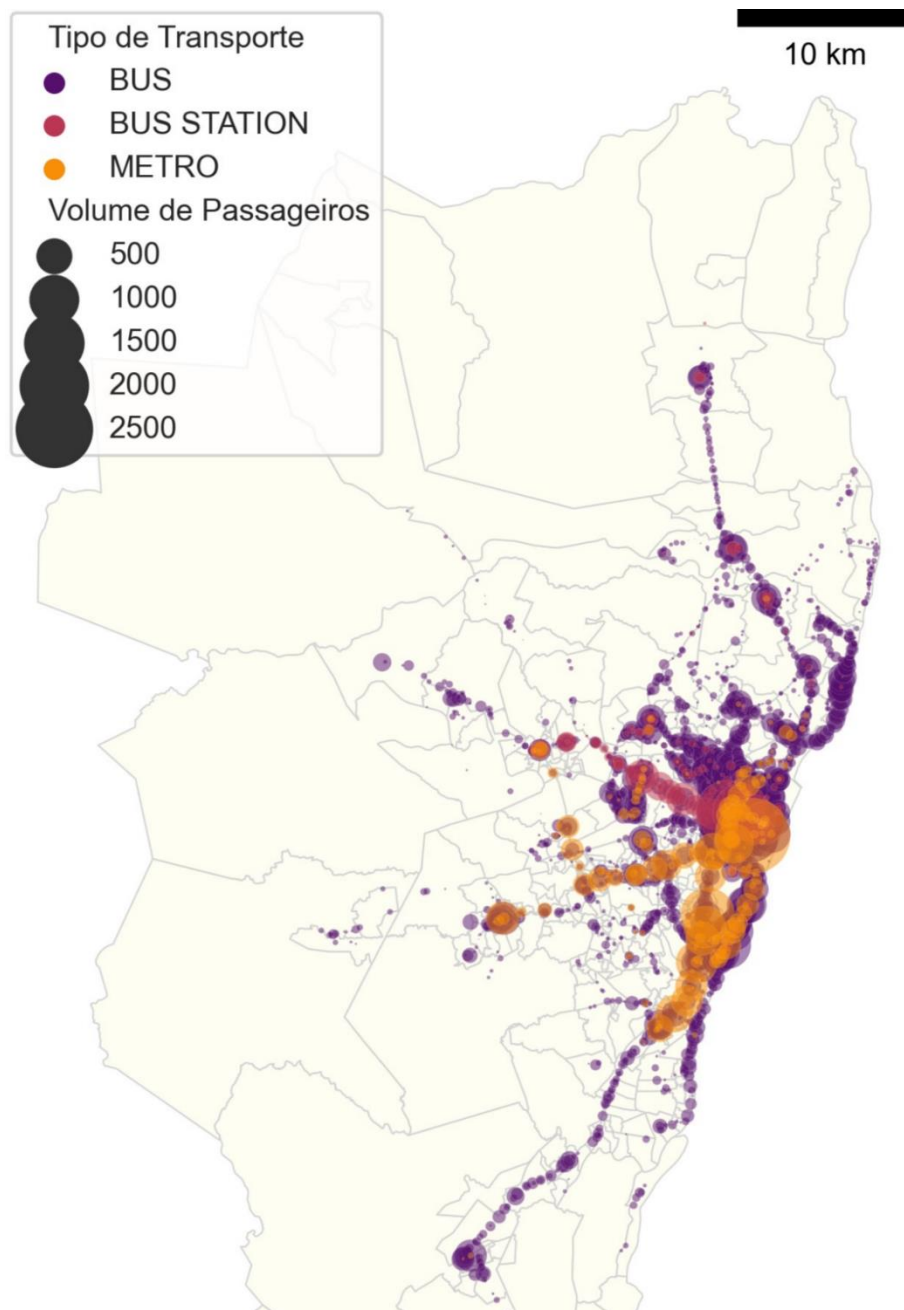
Figura 5-4 Primeiro embarque das viagens (pico da manhã)



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Percebe-se que o primeiro embarque está razoavelmente bem distribuído, com quantidades significativas de embarques nas paradas de ônibus (em roxo) em relação às entradas diretas nas estações da CBTU (em amarelo) e nos terminais e estações de ônibus (em bordô). As entradas das duas linhas VLT parecem pouco significativas em relação às linhas de ônibus do mesmo eixo.

Figura 5-5 Último desembarque das viagens (pico da manhã)

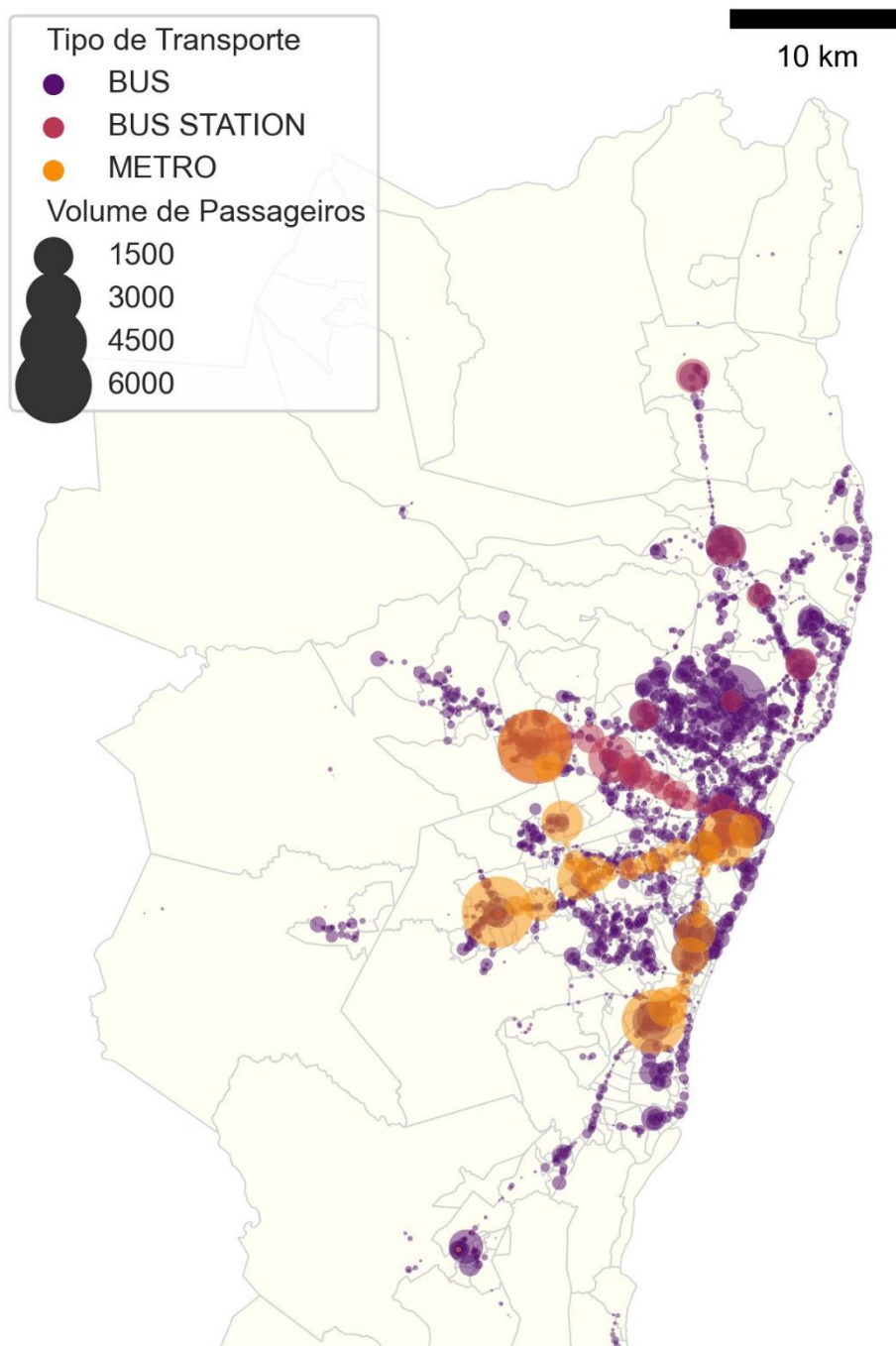


Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Como esperado, os últimos desembarques se concentram na região central, tendo destaque as estações de metrô dentro do município de Recife. As paradas de ônibus de regiões majoritariamente residenciais têm pouco destaque no mapa.

Para complementar esta análise, é interessante desagregar as viagens em pernas, permitindo destacar os pontos de transbordo do sistema de transporte público (Figura 5-6).

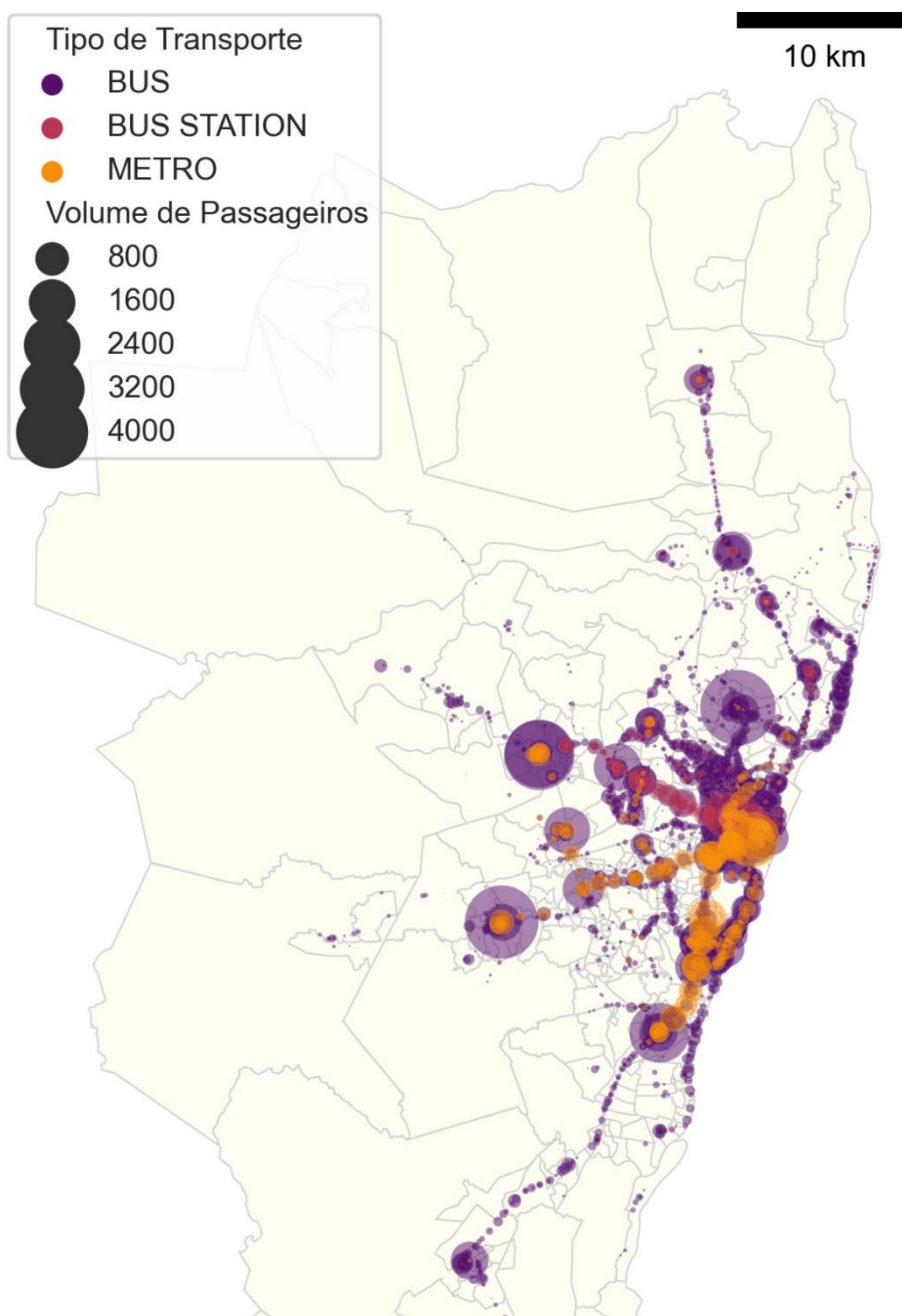
Figura 5-6 Embarques das pernas desagregadas (pico da manhã)



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

No nível das pernas, nota-se a preponderância das estações e terminais periféricos, com destaque às extremidades das Linhas Centro (ambos os ramais) e Sul, além do Terminal Integrado (TI) do Xambá próximo à divisa de Olinda com Recife. Se destacam, de maneira geral, as estações da CBTU que possuem conexão direta com um terminal integrado, comprovando que no pico da manhã as integrações ônibus → CBTU são muito mais presentes que o sentido contrário (Figura 5-7). Esse resultado demonstra o peso das integrações no total de embarques realizados na Região Metropolitana do Recife.

Figura 5-7 Desembarques das pernas desagregadas (pico da manhã)

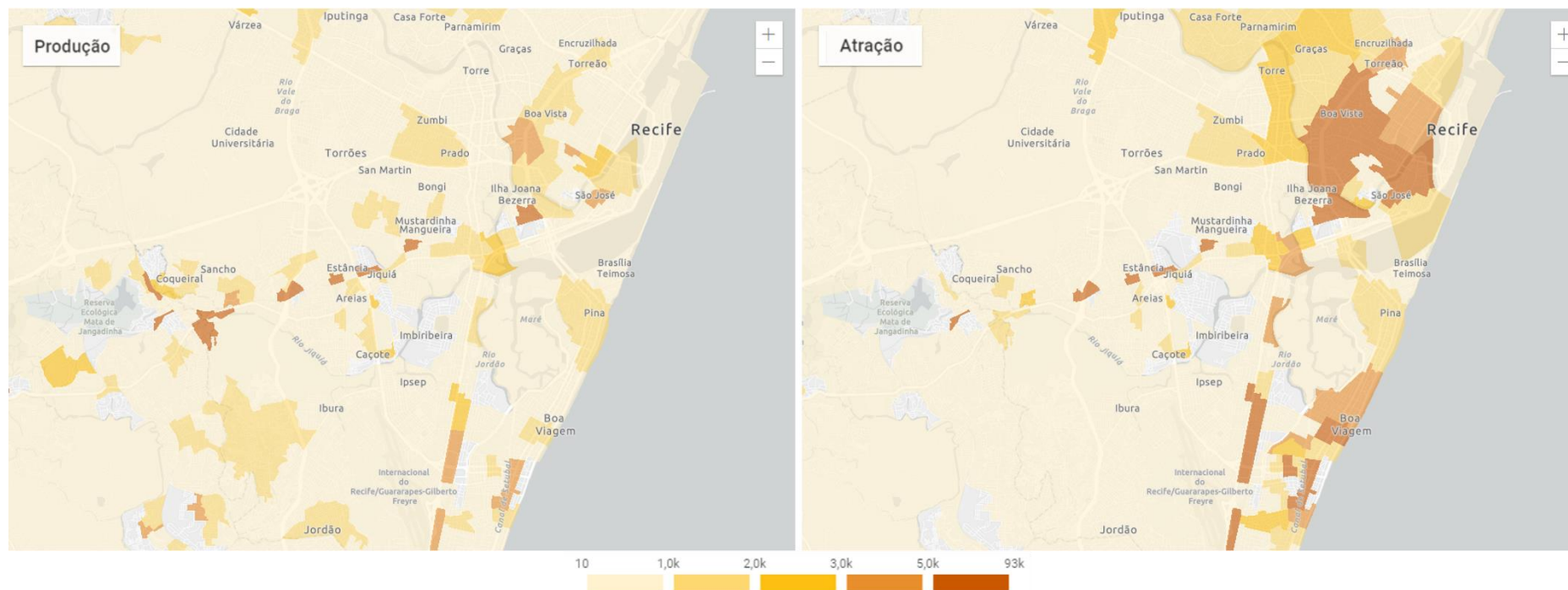


Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Os desembarques no nível das pernas também se mostram concentrados nas estações e terminais integrados. É possível notar o movimento massivo de desembarque nos terminais integrados que permitem conexão às linhas da CBTU, reforçando a vocação alimentadora dos sistemas de ônibus em especial na extremidade periférica das linhas metroviárias. O TI do Xambá se confirma como polo de troca do vetor norte, enquanto as estações, terminais e paradas da região central de Recife monopolizam os desembarques no nível da rua.

Uma última abordagem agrega à análise o conhecimento espacial do zoneamento. A seguir, na Figura 5-8, um mapa de calor da atração e produção do zoneamento do pico da manhã evidencia os eixos do metrô como os principais em termos de movimentação de passageiros.

Figura 5-8 Atração e Produção por zona no pico manhã - Zoneamento 530



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Analisando a atração e produção dos volumes normalizados pela área das zonas de tráfego observa-se a produção de viagens mais relevante no eixo do Metrô Centro 1. A atração é centralizada em Recife.

6. MONTAGEM DA REDE DE SIMULAÇÃO

Um modelo consiste na representação de um sistema real, através de um conjunto de condições operacionais e hipóteses simplificadoras, que simbolizam comportamento e disposição do sistema correspondente. Portanto, por meio da modelagem é possível descrever o comportamento de um sistema, com a utilização de um modelo que imite as respostas do sistema real em uma sucessão de eventos no decorrer do tempo. Os componentes da rede de simulação, que é a base do modelo, serão descritos a seguir.

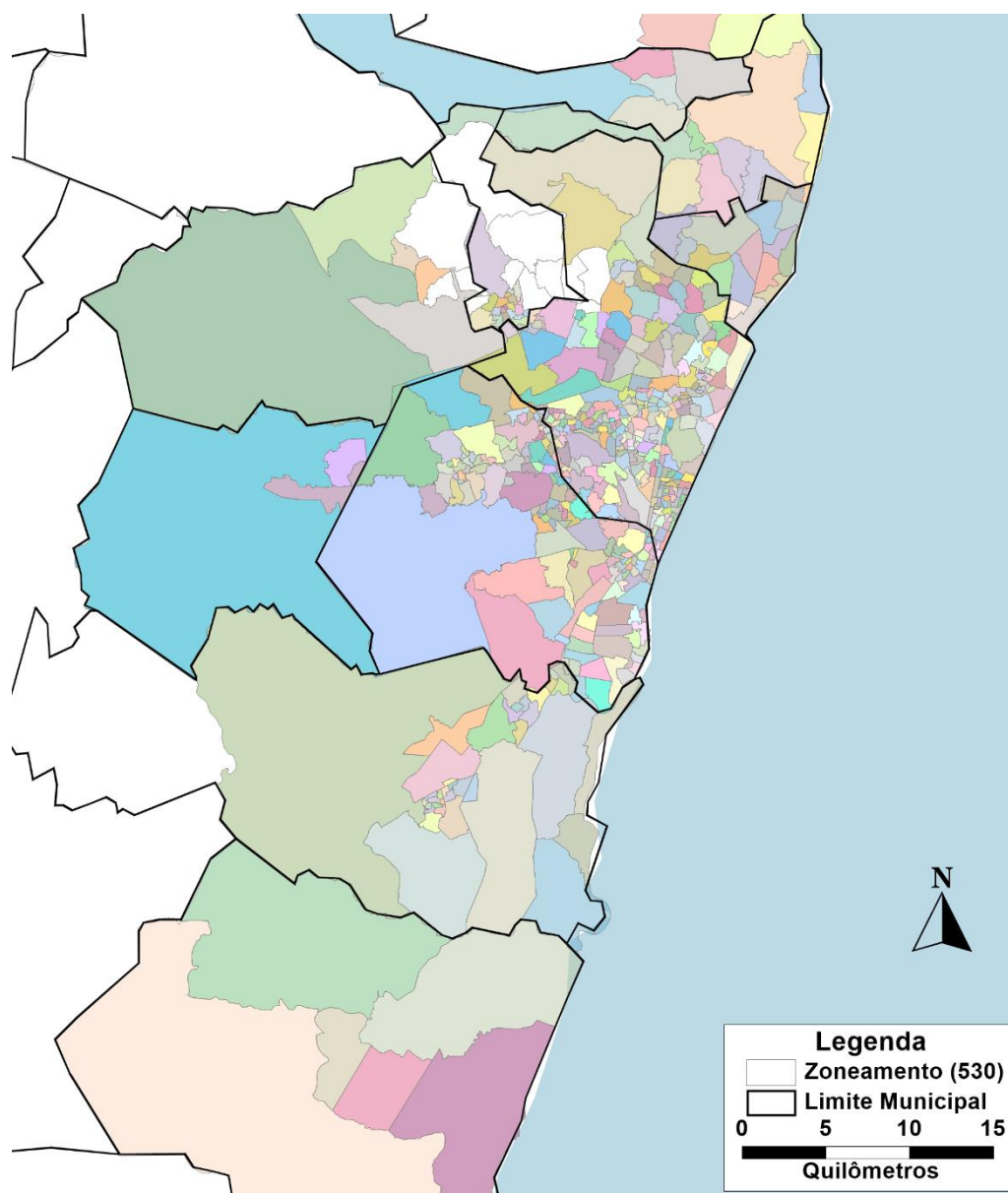
6.1 ZONEAMENTO ADOTADO

O zoneamento equivale à divisão territorial da área estudada em unidades básicas de análise dos fluxos de deslocamento. Em geral, há uma relação direta entre o tamanho e número de zonas e o nível de detalhamento da análise. Portanto, para o modelo em questão, na área de influência direta há uma maior quantidade de zonas que cobrem, individualmente, uma pequena porção territorial.

O zoneamento de tráfego usado no modelo (Figura 6-1) foi elaborado a partir dos setores censitários do censo demográfico conduzido pelo IBGE, realizado em 2010. Os microdados do censo 2022 ainda não estão disponíveis, portanto, para manter compatibilidade com as informações socioeconômicas do modelo de geração, mantiveram-se os setores do censo 2010. Esses setores foram agregados resultando em um zoneamento composto por 530 zonas, seguindo os seguintes princípios:

- As zonas respeitam os limites municipais e, sempre que possível, os limites dos setores censitários do IBGE, uma vez que as informações de população e emprego são obtidas de dados que são desagregados de acordo com esses limites (municípios, distritos, zonas de setor censitário);
- Acidentes geográficos e outros fatores naturais, como rios e montanhas, devem limitar as fronteiras das zonas, uma vez que influenciam diretamente nos deslocamentos, evitando-se, então, unir em uma única zona deslocamentos que tomam sentidos contrários;
- As zonas devem ser formadas evitando-se que sua fronteira separe dois lados de uma mesma grande avenida, de forma que a origem e destino de um indivíduo ao longo do dia útil sejam computadas em uma mesma zona;
- Apenas uma estação de metrô por zona, quando possível, de modo a garantir a boa representação da demanda (embarque e desembarque) de cada estação; e
- Atendimento de pelo menos uma linha de ônibus, com ponto de embarque e desembarque dentro da zona, nos dois sentidos de percurso.

Figura 6-1 Zoneamento adotado



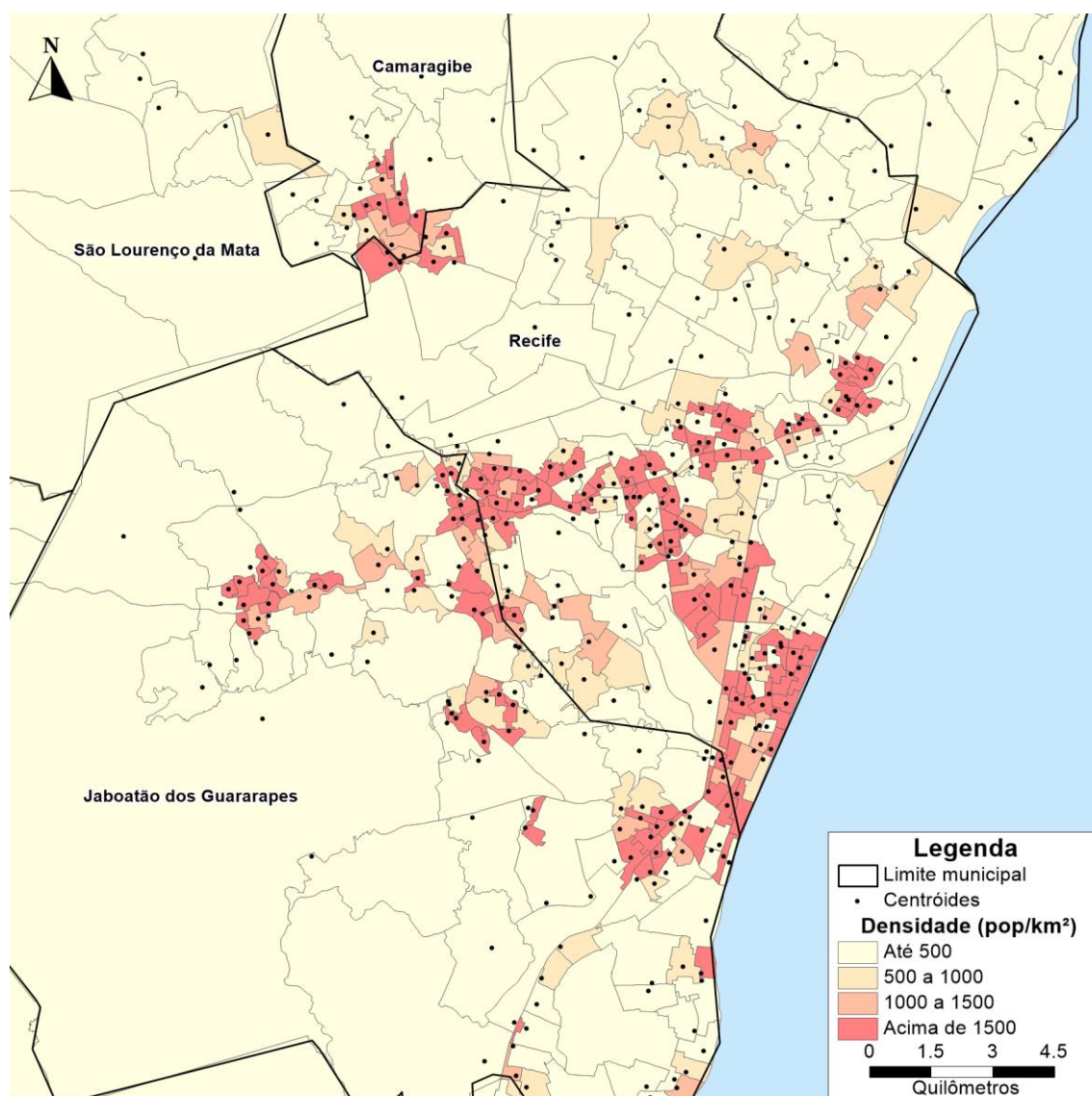
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

6.1.1 Centroides e conectores

Cada zona é representada por um centroide, que são pontos geográficos que correspondem ao local de entrada na rede de simulação das viagens geradas pelas respectivas zonas, conforme Figura 6-2. A posição dos centroides é ajustada manualmente, zona a zona, para corresponder à concentração real da demanda de passageiros de transporte coletivo, no centro das áreas urbanas, e próximo aos principais eixos de acesso.

Os centroides são conectados à rede viária por meio dos conectores. A maneira como essa ligação é realizada depende da oferta de transporte público da área, sendo criado pelo menos um conector por zona.

Figura 6-2 Centroides do zoneamento proposto



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

6.2 BASE VIÁRIA

A base viária é o suporte da rede de linhas de transporte coletivo e dos deslocamentos a pé, particularmente relevantes para o acesso ao sistema de transporte coletivo a partir dos centroides, assim como para os transbordos efetuados no meio das viagens. O desenvolvimento de um modelo de simulação de alta precisão está diretamente relacionado ao detalhamento da base viária e a qualidade das informações nela contidas.

Em virtude de uma série de estudos sobre a mobilidade da RMR, o Consórcio desenvolveu e vem aprimorando uma rede dessa área no *software* TransCAD®. Nos últimos anos ocorreram importantes alterações da infraestrutura viária e dos serviços de transporte coletivo, sendo necessário atualizar alguns componentes do modelo como mão das vias, acesso de pedestres – especialmente no entorno das estações de metrô e terminais de ônibus, passarelas e travessias nos principais eixos da RMR –, conversões proibidas, novas ligações, viadutos e trincheiras e sistema Via Livre (BRT).

6.2.1 Tempos de viagem

Uma etapa essencial da montagem da rede de simulação consiste em atribuir tempos a todos os *links* da rede viária que são usados por uma ou várias linhas de transporte coletivo. Os tempos a bordo dessas linhas são resultantes dos valores associados aos *links* e são utilizados no cálculo do custo generalizado, que orienta a distribuição dos fluxos de passageiros por cada par origem-destino.

Para o presente estudo, a obtenção dos tempos de percurso nos *links* rodoviários (usados pelos ônibus) se deu a partir da coleta de dados por meio do Google Transit, no qual para cada escala de cor foi definida uma velocidade média. Dessa forma, cruzando as informações da base viária georreferenciada com as velocidades levantadas, foi possível determinar um tempo de percurso para cada *link* da base em que há passagem de rota rastreada do transporte coletivo. Ressalta-se que os tempos considerados se referem a velocidade comercial, ou seja, já embutindo os tempos de parada das linhas. Foram verificadas que as velocidades do BRT, da faixa exclusiva de ônibus na Av. Agamenon Magalhães e das faixas exclusivas de ônibus nas conexões de Recife com Jaboatão e Olinda estão condizentes com a operação da referência de calibração (maio de 2023).

Já os tempos de percurso e tempos de parada dos trechos da Linhas de Metrô e VLT foram levantados junto ao operador atual, a empresa CBTU, conforme a Tabela 6-1:

Tabela 6-1 Dados dos tempos de viagem a bordo das linhas de transporte coletivo

Sistema	Tempo por link	Tempos de parada (<i>stops</i>)	Tempo total de cada linha
Ônibus	Média por sentido das velocidades coletadas pelo Google Transit	Nulos Já embutidos no tempo dos links	$\sum T_{links}$ (velocidade comercial)
Metrô/ VLT (CBTU)	Obtidos da CBTU	Obtidos da CBTU	$\sum T_{links} + T_{stops}$

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

6.2.2 Tempos de caminhada

Os tempos de caminhada são usados no cálculo do custo generalizado para as etapas de acesso (do centroide de origem até o primeiro embarque), transferências (entre dois usos de transporte coletivo) e egresso (do último desembarque até o centroide de destino), que são normalmente realizados a pé.

Esses tempos foram obtidos mediante a aplicação da velocidade fixa de 4 km/h, e o alto nível de detalhamento da rede viária garante que as distâncias medidas no caminho escolhido pelos passageiros sejam representativas da realidade.

6.3 LINHAS DE TRANSPORTE COLETIVO

O sistema de transporte coletivo é representado no *software* TransCAD® pelo *Route System*, arquivo que contém as rotas dos serviços de transporte coletivo e seus atributos. A rede de simulação contempla todas as linhas de transporte coletivo ativas em maio de 2023 (Tabela 6-2), que operam no período da manhã (entre 5h e 7h59), dos sistemas metropolitano e complementar do Recife.

Tabela 6-2 Síntese dos sistemas modelados

Sistema	Número de linhas modeladas	Tarifas 2023 (mais comum)	Data de Referência
Metropolitano (Grande Recife)	350	R\$ 2,70 – 20,05 (R\$ 4,10)	Maio/2023
Complementar Recife	7	R\$ 4,10	Maio/2023
Metrô Centro 1	1	R\$ 4,25	Maio/2023
Metrô Centro 2	1	R\$ 4,25	Maio/2023
Metrô Sul	1	R\$ 4,25	Maio/2023
VLT	2	R\$ 4,25	Maio/2023

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

A rede de simulação foi montada a partir da importação, para uma rede viária previamente elaborada pelo Consórcio no *software* TransCAD®, de bancos de dados no formato GTFS (*General Transit Feed Specification*). No caso dos sistemas metropolitano complementar, os GTFS foram elaborados pelo próprio Consórcio, a partir do shape de linhas de cada sistema, geolocalização dos pontos de embarque e de desembarque (PEDs), e sequência de uso dos PEDs por cada linha.

A importação dos GTFS para o TransCAD® se dá através da ligação dos pontos usados por cada linha, na sequência indicada, segundo o menor caminho. A determinação do menor caminho depende fundamentalmente do nível de detalhamento e qualidade da rede viária modelada: vias traçadas, especificação do sentido de circulação, velocidade do fluxo.

Após o processo de importação, todas as linhas foram revisadas para corrigir eventuais erros e garantir que o modelo represente o atendimento real da melhor forma. Uma atenção especial foi dada à localização dos pontos finais das linhas, particularmente aqueles próximos a terminais de ônibus e em um raio de 1 km das estações de metrô.

Após estes ajustes pontuais dos pontos de parada, chegou-se a um sistema de rotas (*Route System*) detalhado na Tabela 6-3. Esse sistema também contempla os pontos de parada em que há o embarque e desembarque de passageiros, sendo modelados como *Route Stops*. Os tempos de parada nos PEDs, quando não embutidos no tempo de viagem, são especificados no *Dwelling Time* (campo do *Route Stops*).

Tabela 6-3 Rotas e Stops da rede de simulação após importação dos GTFS

Sistema	Routes	Route Stops
Metrô (Linha Centro 1, Linha Centro 2 e Sul)	6	90
VLT (Linha Oeste e Sul)	4	25
Consórcio Grande Recife	716	26.091
Complementar Recife	14	796

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Dois atributos das linhas de transporte coletivo são essenciais no cálculo do custo generalizado: o *headway* e a capacidade. Esses são definidos uma vez para cada linha, ao contrário do tempo de viagem, que é especificado no *layer* da base viária e herdado pelas linhas em função do seu itinerário.

O *headway* corresponde ao intervalo médio de tempo que separa duas partidas consecutivas de uma mesma linha (ou sublinha, caso variações da mesma linha sejam modeladas). Ele é expresso na unidade de tempo do modelo (minutos) e corresponde ao inverso da frequência (número de

viagens por unidade de tempo). Para cada linha foi calculado o intervalo médio a partir do número de viagens registrado nos 180 minutos do período de modelagem, ou seja, 5h00 às 7h59:

$$Headway = \frac{180}{N_{serviços}^{5h-7h59}}$$

Essa variável é usada para o cálculo do tempo de espera dos passageiros, estimado como a metade do *headway*. Vale ressaltar que, caso várias linhas passem pelo mesmo ponto e atendam o itinerário do passageiro, o tempo de espera é calculado como a metade do *headway* resultante (considerando a média do número de viagens de todas as linhas que propiciam um deslocamento equivalente).

A capacidade da linha corresponde ao número total de passageiros que a linha pode transportar durante o período de modelagem. Assim, essa variável associa o *headway* e a capacidade unitária dos veículos usados para operar a linha:

$$Cap_{linha} = N_{serviços}^{5h-7h59} \times Cap_{veículo} = \frac{180}{Headway} \times Cap_{veículo}$$

Para calcular a capacidade das linhas foram consideradas as seguintes capacidades de veículos presentes na Tabela 6-4:

Tabela 6-4 Capacidade dos veículos

Tipo de veículo	Capacidade (PAX)	Ocupação (Pax/m²)	Linhas
Complementar	35	Padrão	Maioria das linhas de ônibus
Convencional	71	Padrão	Ônibus de pequeno porte
BRT	128	Padrão	Linhas de BRT
Metrô Linha Centro	1.032	6	Linhas de metrô
Metrô Linha Sul	1.200	6	Linhas de metrô
VLT	540	6	Linhas de VLT

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAC-ESCON-RHEIN, 2024

6.3.1 Sistema tarifário

O sistema tarifário representa como as tarifas são definidas e cobradas para os usuários do transporte coletivo, sendo um fator essencial do processo calibração e simulação para que as viagens levem em conta não apenas o tempo de deslocamento, mas também o custo para sua realização. No caso da RMR, o estudo do sistema tarifário baseou-se nos dados de tarifa nominal e na matriz de integração tarifária referentes ao mês de maio de 2023, fornecidas pelos órgãos gestores do transporte coletivo.

Posteriormente à definição da data-base da presente modelagem (calibração), houve a extinção do Anel B, em decisão do CSTM de 22/fev/2024, a partir da qual todas as tarifas passam a valer R\$ 4,10. Por coerência com a oferta vigente em maio/2023, a calibração do modelo é feita mantendo-se o Anel B e sua extinção é considerada, como atualização tarifária, na configuração dos cenários futuros. Na mesma deliberação que extinguiu o Anel B, também foi extinto o Vem Social.

O sistema tarifário pode ser dividido em duas partes, os valores de tarifa nominal e a integração tarifária, sendo, respectivamente, o valor cobrado quando a viagem é realizada em apenas um embarque e quando a viagem é realizada em mais de um embarque havendo redução ou

gratuidade na tarifa do segundo e demais embarques. Na RMR, a tarifa nominal depende de aspectos espaciais, modais e temporais, resultando em 10 tarifas nominais representadas na Tabela 6-5 (data base maio/2023).

- Aspecto espacial: Valor da tarifa de acordo com a distância do centro de Recife (Anel A – zonas centrais, Anel B – zonas periféricas e Anel G – Alimentadoras do metrô);
- Aspecto modal: Valor da tarifa de acordo com o modo de transporte (Metrô, VLT, BRT, ônibus, Veículo de Pequeno Porte - VPP);
- Aspecto temporal: Valor da tarifa varia de acordo com o horário.

Tabela 6-5 Tarifas nominais do Transporte Coletivo do RMR

Tarifas do SEI – válida de segunda a sábado		
Serviços Principais	Tarifa	Número de Linhas
Anel A	R\$ 4,10	305
Anel B	R\$ 5,60	73
Anel G	R\$ 2,70	3
METRÔ / VLT	R\$ 4,25	5
Serviços Opcionais e Especiais		
N.º	Descrição	Tarifa
41	Setúbal (Opcional)	R\$ 5,15
64	Piedade (Opcional)	R\$ 7,70
72	Candeias (Opcional)	
160	Gaibu/Barra de Jangada (Via Paiva)	
214	UR-02/Ibura (Opcional)	
224	UR-11 (Opcional)	
229	Marcos Freire (Opcional)	
342	Curados (Opcional)	
191	Recife/Porto de Galinhas (Sem ar-condicionado)	R\$ 13,70
195	Recife/Porto de Galinhas (Opcional)	R\$ 20,05
Tarifa Social – VEM Comum (Dias úteis – 9h às 11h e 13h30 às 15h30)		
Serviços Principais		Tarifa
Anel A		R\$ 3,10
Anel B		R\$ 4,60

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Na RMR, a integração tarifária passou por transformações significativas nos últimos 5 anos. Com o intuito de atingir uma melhor performance operacional, passou-se da integração total para a integração temporal. Essa mudança resulta na possibilidade de integrações serem feitas fora dos terminais de integração (TI), desde que os embarques consecutivos estejam dentro do intervalo de 2 horas e sejam validados com o uso do bilhete denominado Cartão VEM, aceito nos sistemas de ônibus e do metrô da RMR. No entanto, algumas linhas não são integradas ou possuem regras específicas, sendo necessário utilizar a matriz de integração tarifária, fornecida pelo CTM, para classificar as linhas com características tarifárias em comum.

Essas classes, para serem válidas, devem responder a dois critérios simultaneamente: (I) um valor de tarifa nominal comum para a classe; e (II) um único valor de tarifa integrada com outras classes, produzindo, respectivamente, o que é chamado de *Mode Table* e *Mode Transfer Table* no TransCAD®. Tais classes permitem representar no modelo de simulação um sistema tarifário mais aderente possível à realidade.

A definição das classes (*Modes*) foi feita a partir da combinação da zona de operação da linha (Anel A, Anel B e Anel G), tarifa nominal, tipo de integração tarifária (linhas que atendem terminais ou não), modo de transporte (Metrô, VLT, BRT, ônibus, VPP), e horário de utilização, implicando a Tabela 6-6.

Tabela 6-6 Tratamento da Matriz de Integração fornecida pelo CTM

Etapas para classificação das linhas	
1.	Remoção de tarifas não relevantes para o modelo: <ul style="list-style-type: none"> Tarifas sociais fora do horário de pico (5h – 7:59h) – R\$ 3,10 e R\$ 4,60 Tarifas desatualizadas – R\$ 3,35 e R\$ 3,75 (2021)
2.	Remoção de linhas desativadas em maio de 2023 <ul style="list-style-type: none"> Comparando matriz de integração com consolidado fornecido pelo Grande Recife
3.	Análise das integrações por anéis <ul style="list-style-type: none"> Divisão da matriz de integração por pares (Anel A – Anel A, Anel A – Anel B, Anel A – Metrô etc.) Verificação de predominância de um valor de tarifa sob os demais valores de tarifa
4.	Análise das integrações por tipo de integração <ul style="list-style-type: none"> Divisão da matriz de integração por pares (TI X TI, TI X Linha, Linha X Linha e Linha X TI) Linha com origem ou destino em Terminais de integração (TI) Verificação da aparição da linha em mais integrações do tipo Linha ou TI Verificação de predominância de um valor de tarifa sob os demais valores de tarifa

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Como resultado da análise, mais de 98% das integrações da matriz de integração, fornecida pelo CTM, pertinentes ao estudo, correspondem aos valores das tarifas previstas pelo modelo de simulação. Assim, o sistema de transporte coletivo da RMR pode ser agrupado em 9 *modes*, como representado na Tabela 6-7. Além disso, as tarifas integradas e complementares da integração entre os *modes* podem ser representadas pela Tabela 6-8 e pela Tabela 6-9.

Com as informações das 3 tabelas são geradas ambas *Mode Table* e *Mode Transfer Table*, representadas, respectivamente, no item 15.2 e no item 15.3 do Anexo.

Tabela 6-7 Tarifa nominal dos *modes* do Transporte Coletivo da RMR

Mode	Tarifa	Descrição
TRILHOS	R\$ 4,25	Metrô e VLT
TI_AnelA	R\$ 4,10	Terminais de Integração Anel A
TI_AnelB	R\$ 4,10	Terminais de Integração Anel B
INT_AnelA1	R\$ 4,10	Linhas integradas do Anel A
INT_AnelA2	R\$ 4,10	Linhas integradas do Anel A com tarifa diferenciada
INT_AnelB	R\$ 5,60	Linhas integradas do Anel B
INT_AnelG	R\$ 2,70	Linhas integradas do Anel G
SEM_INT	R\$ 4,10 ²	Linhas sem integração
STCP	R\$ 4,10	Linhas do sistema complementar

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Tabela 6-8 Tarifa integrada da integração do Transporte Coletivo da RMR

Modes	1º Embarque	Tarifa Integrada								
	Tarifa única	2º Embarque								
		Trilhos (Metrô/VLT)	TI Anel A	TI Anel B	INT Anel A1	INT Anel A2	INT Anel B	INT Anel G	Sem INT	STCP
Trilhos (Metrô/VLT)	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	5,60	4,25	4,25	8,35	8,35
TI Anel A	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	6,80	8,20	8,20
TI Anel B	4,10	5,60	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	6,80	8,20	8,20
INT Anel A1	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	6,80	8,20	8,20
INT Anel A2	4,10	5,60	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	6,80	8,20	8,20
INT Anel B	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	9,70	5,60	8,30	9,70	9,70
INT Anel G	2,70	4,10	4,10	6,80	6,80	8,30	8,30	5,40	6,80	6,80
Sem INT	4,10	8,35	8,20	8,20	8,20	8,20	9,70	6,80	8,20	8,20
STCP	4,25	8,35	8,20	8,20	8,20	8,20	9,70	6,80	8,20	8,20

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

² Tarifa mais significativa dentre as linhas não integradas, podendo variar entre R\$ 2,70 (Anel G) e R\$ 20,05 (Opcional).

Tabela 6-9 Tarifa complementar da integração do Transporte Coletivo da RMR

Grupo de serviço	1º Embarque	Tarifa Complementar								
		2º Embarque								
	Tarifa única	Trilhos (Metrô/VLT)	TI Anel A	TI Anel B	INT Anel A1	INT Anel A2	INT Anel B	INT Anel G	Sem INT	STCP
Trilhos (Metrô/VLT)	4,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1,35	0,00	0,00	4,10	4,10
TI Anel A	4,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	4,10	4,10
TI Anel B	4,10	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	4,10	4,10
INT Anel A1	4,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	4,10	4,10
INT Anel A2	4,10	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	4,10	4,10
INT Anel B	5,60	0,00	0,00	0,00	0,00	4,10	0,00	2,70	4,10	4,10
INT Anel G	2,70	1,40	4,10	4,10	4,10	5,60	5,60	2,70	4,10	4,10
Sem INT	4,10	4,25	4,10	4,10	4,10	4,10	5,60	2,70	4,10	4,10
STCP	4,25	4,25	4,10	4,10	4,10	4,10	5,60	2,70	4,10	4,10

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

De maneira geral, para casos em que o usuário utiliza apenas uma linha de transporte coletivo, o TransCAD® considera a tarifa nominal na simulação. Quando há embarque em mais de uma linha, o software considera o primeiro valor pago igual ao nominal e, posteriormente, o valor determinado na *Mode Transfer Table*, como complemento entre os modos utilizados. Quando não há especificação tarifária de uma integração considera-se a tarifa nominal de todas as linhas utilizadas na viagem, o que acontece para todas as linhas dentro das classes SEM INT (Sem integração) e STCP.

7. CONFIGURAÇÃO DO MODELO DE ALOCAÇÃO

7.1 MÉTODO DE ALOCAÇÃO

O *Pathfinder* é um dos principais métodos de alocação que considera a tarifa como um fator determinante para escolha dos melhores caminhos. Além da tarifa, o valor do tempo também é um parâmetro considerado na escolha dos caminhos, e é associado a tarifa através da conversão do tempo em dinheiro. Ambas as variáveis compõem o custo generalizado dos itinerários possíveis para cada par O-D e a alocação dos fluxos de passageiros se dá através da minimização desse custo.

$$CG = \sum_i F_i + VOT \times \left(\sum_j W_j t_j + \sum_k P_k \right)$$

Onde:

- CG é o custo generalizado, variável que deve ser minimizada durante a alocação;
- F_i são as tarifas pagas nas linhas de transporte coletivo, incluindo os eventuais descontos tarifários;
- VOT corresponde ao valor do tempo (detalhes a seguir, na **seção 7.2**);
- t_j são os tempos de cada trecho da viagem e W_j seus respectivos pesos, sendo esses:
 - tempo de acesso: trecho, normalmente percorrido a pé (mas também podendo ser de bicicleta, carona etc.), entre o ponto de origem da viagem (representado pelo centroide da zona de origem) e o primeiro embarque em uma linha de transporte coletivo;
 - tempo de espera, no ponto de ônibus ou plataforma da estação de metrô;
 - tempo a bordo da linha de transporte coletivo (que inclui tempo em circulação e tempo de parada, ou *dwelling time*);
 - tempo de transbordo: trecho percorrido a pé para realizar integração entre duas linhas de transporte coletivo, entre o desembarque da primeira e a espera pela segunda;
 - tempo de egresso: trecho entre o último desembarque e o ponto final da viagem, representado pelo centroide da zona de destino;
- P_k são as penalidades eventualmente aplicadas ao cálculo do custo generalizado, em função do número de transbordos, de determinados embarques e desembarques etc.

A utilização das tarifas é importante no modelo de alocação uma vez que possui grande influência na escolha das rotas e modos de transporte. Assim, a alocação também se torna uma ferramenta valiosa em estudos econômicos, em que é essencial o entendimento de como a receita e a escolha de linhas pode variar em função da alteração de tarifa.

No presente trabalho, o método de alocação utilizado nas simulações de demanda de transporte coletivo foi o *Equilibrium Pathfinder*. Esse é uma extensão do *Pathfinder*, que considera a capacidade dos veículos de transporte como uma variável. Normalmente esses valores são inseridos nas rotas para restringir o fluxo de forma que não exceda a capacidade das linhas. Outra possibilidade é aplicar esses valores aos *links* de acesso de terminais ou estações para representar as capacidades das plataformas.

Portanto, no método de alocação utilizado, a cada iteração o volume alocado é comparado a capacidade das rotas. As penalidades são adicionadas de acordo com uma função genérica de

atraso, com base na relação volume/capacidade (V/C). Em seguida são realizadas novas atribuições de caminho, em que os maiores custos são usados como insumos no *loop* de iterações, obtendo-se um novo conjunto de valores (detalhes a seguir, ver **seção 7.3**).

7.2 VALOR DO TEMPO

O valor do tempo, expresso em R\$/min, é um dos parâmetros considerados no cálculo do custo generalizado no processo de alocação das viagens. Esse parâmetro é de suma importância para o modelo, pois ele permite converter os tempos em valor monetário e comparar opções de itinerário que possuem tarifas e tempos diferentes.

Para efeito do presente trabalho, o valor do tempo foi determinado com base no salário-mínimo nacional de 2023 e nos resultados da Pesquisa Origem-Destino da RMR de 2018, em uma parceria entre o Instituto da Cidade Pelópidas Silveira e o Grande Recife Consórcio de Transporte Metropolitano.

A partir da matriz O-D de transporte coletivo dessa pesquisa, foi determinada a distribuição de viagens realizadas por faixa de renda dos passageiros, retirando-se da amostra os usuários que não quiseram informá-la. Verificou-se que a faixa de renda 1, referente aos passageiros de até 1 salário-mínimo, é a que contempla a maior quantidade de viagens de Transporte Coletivo, conforme apresentado na Tabela 7-1.

Tabela 7-1 Distribuição de renda dos passageiros de transporte coletivo na Pesquisa O-D 2018 da RMR

Faixa	Descrição da Faixa	Quantidade de Viagens	%	% acumulado
1	Até 1 salário-mínimo	747.085	74,612%	74,61%
2	Mais de 1 salário-mínimo até 2 salários-mínimos	172.670	17,245%	91,86%
3	Mais de 2 salários-mínimos até 3 salários-mínimos	42.989	4,293%	96,15%
4	Mais de 3 salários-mínimos até 5 salários-mínimos	27.645	2,761%	98,91%
5	Mais de 5 salários-mínimos até 10 salários-mínimos	9.369	0,936%	99,85%
6	Mais de 10 salários-mínimos até 20 salários-mínimos	1.497	0,149%	100,00%
7	Mais de 20 salários-mínimos	37	0,004%	100,00%
Total		1.001.292	100,0%	100,0%

Fonte: Pesquisa O-D da RMR, 2018. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRAC-CECON-RHEIN, 2024

Foi então calculado o salário médio dos usuários de transporte coletivo, com base nessa faixa de renda e no valor do salário-mínimo de 2023 de R\$ 1.320,00. A conversão de mês para minuto foi feita considerando-se a média de 173 horas trabalhadas por mês (estimada considerando-se carga horária de 8 horas/dia, 5 dias por semana e 52 semanas por ano). Portanto, em termos da presente simulação, um usuário de transporte coletivo considera que permanecer 1 minuto em uma viagem equivale a gastar R\$ 0,13.

Valor do Tempo (adotado no modelo de calibração) = R\$ 0,13/min

7.3 RESTRIÇÃO DE CAPACIDADE

Como abordado anteriormente, a alocação de demanda de transporte coletivo é realizada no *software* de simulação TransCAD®, através do método *Equilibrium Pathfinder*, que permite definir diferentes restrições de capacidade. Essas restrições traduzem como atraso os efeitos que a saturação das linhas de transporte público pode causar na forma como os passageiros percebem sua viagem. Tais efeitos equivalem a:

- Redução do conforto do passageiro devido à crescente ocupação do veículo;
- Aumento do tempo de permanência resultante do congestionamento a bordo do veículo;
- e
- A possibilidade de um usuário não embarcar em um veículo devido à restrição da capacidade.

Esse procedimento de alocação é um processo iterativo: a cada iteração, o custo generalizado das alternativas para o deslocamento dos fluxos é recalculado através da função de atraso (nesse caso adota-se a *BPR Function*, do nome do *Bureau of Public Roads*, dos Estados Unidos), que aplica uma penalidade em função da lotação de cada linha de transporte coletivo.

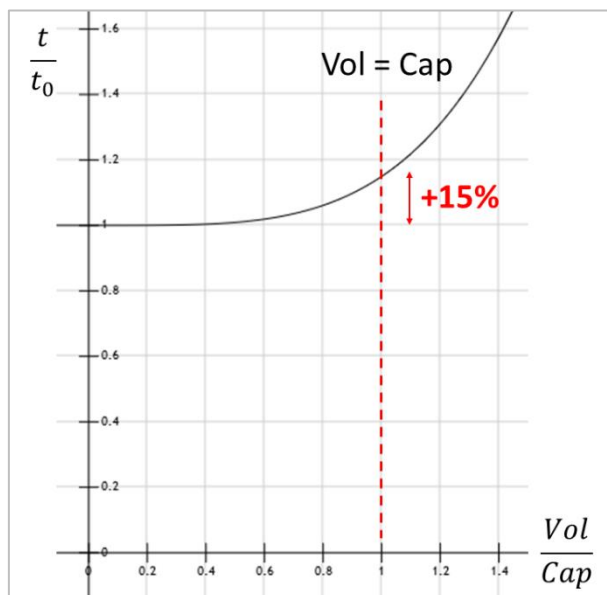
$$t = t_0 \times f\left(\frac{Vol}{Cap}\right) = t_0 \times \left(1 + \alpha \times \left(\frac{Vol}{Cap}\right)^\beta\right)$$

Onde:

- t = tempo de viagem do *link* congestionado;
- t_0 = tempo de viagem do *link* quando a linha de transporte público está vazia (equivalente ao fluxo livre)
- Vol = volume de passageiros que transitam pelo *link* no período da simulação
- Cap = capacidade do *link* no período da simulação (passageiros por unidade de tempo)

Os valores padrão dos parâmetros α e β foram mantidos no presente estudo, devido à falta de dados de referência adequados para calibrar melhor a função de volume-atraso. Portanto, adotou-se $\alpha=0,15$ e $\beta=4,00$ (ver Figura 7-1).

Figura 7-1 Gráfico da função f de atraso (BPR function) com os valores $\alpha = 0,15$ e $\beta = 4$



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

7.4 CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS DE ALOCAÇÃO

A *Transit Network* é criada no TransCAD® a partir de um *layer* de rotas e *stops* associados, e utilizada para:

- Encontrar a melhor rota entre dois pontos;
- Calcular os atributos dos melhores caminhos; e
- Executar o procedimento de alocação de passageiros nas rotas de transporte coletivo.

Essa *network* apresenta parâmetros pré-definidos que podem ser alterados de acordo com as particularidades de cada localidade. Para o presente trabalho os seguintes parâmetros foram utilizados nas configurações da rede (Tabela 7-2):

Tabela 7-2 Parâmetros da Transit Network

Parâmetro	Descrição	Valor adotado
<i>Global Initial Penalty Time</i>	Peso global aplicado à penalidade de tempo no primeiro embarque	1
<i>Global Transfer Penalty Time</i>	Peso global aplicado à penalidade de tempo nos transbordos	1
<i>Global Maximum Initial Wait</i>	Limite superior global do tempo de espera inicial (além do <i>headway</i> , nenhum tempo de espera pode ser maior que esse parâmetro)	60 min
<i>Global Minimum Initial Wait</i>	Limite inferior global do tempo de espera inicial (além do <i>headway</i> , nenhum tempo de espera pode ser menor que esse parâmetro)	0 min
<i>Global Maximum Transfer Wait</i>	Limite superior global do tempo de espera de transferência	60 min
<i>Global Minimum Transfer Wait</i>	Limite inferior global do tempo de espera de transferência	0 min
<i>Global Layover Time</i>	Tempo de viagem global adicional em rotas com <i>loop</i> (onde o final de uma rota ultrapassa o início dela)	5 min
<i>Global Maximum Access Walk</i>	Tempo máximo global de caminhada do centroide ao <i>Route Stop</i> de embarque	20 min
<i>Global Maximum Egress Walk</i>	Tempo máximo global de caminhada do <i>Route Stop</i> de desembarque ao centroide	25 min
<i>Global Maximum Transfer Walk</i>	Tempo máximo global de caminhada em um transbordo (entre <i>Route Stops</i>)	20 min
<i>Global Maximum Impedance</i>	Impedância (nesse caso, igual ao tempo de viagem nos <i>links</i>) máxima global	999
<i>Maximum Transfer Number</i>	Número máximo de transbordos em uma viagem	4
<i>Maximum Trip Time (min)</i>	Tempo total máximo de viagem	500 min
<i>Walk Weight</i>	Peso aplicado ao tempo de caminhada	3
<i>Interarrival Parameter</i>	Utilizado para determinar o tempo de espera a partir do <i>headway</i> (<i>Interarrival Parameter</i> = 0,5 significa que o tempo de espera é equivalente à metade do <i>headway</i>)	0,5

Fonte: Guia de Usuário TransCAD®. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

7.5 SAÍDAS DO MODELO

As seguintes saídas são geradas no processo de alocação:

- *Boarding Counts* (embarques e desembarques em cada *Route Stop*);
- *Transit Flows* (carregamento das linhas);
- *Movement Flows* (volume de trocas entre linhas);
- *Aggregated Flows* (carregamento dos *links* da rede viária);
- *Stop-to-stop Matrix* (fluxos entre pares de *Route Stops* das rotas);
- *Skim Matrix* (indicadores de desempenho entre pares O-D); e
- *Critical Link Analysis* (fluxos entre pares O-D que cruzam *links/Route Stops* específicos).

A Tabela 7-3 a seguir compara os dados de saída e sua importância para a análise de demanda do metrô.

Tabela 7-3 Dados das saídas do modelo (Alocação do *Equilibrium Pathfinder*)

OUTPUT	COMPONENTES NECESSÁRIOS	NATUREZA DOS DADOS	LOCALIZAÇÃO DENTRO DA REDE	FUNÇÃO
<i>Boarding Counts</i>		Número de passageiros que embarcam e desembarcam em cada <i>Route Stop</i> (PED ou estação)	<i>Route Stops</i>	Obter o carregamento do sistema de metrô na hora pico, através da contagem da quantidade de embarques e subtração dos desembarques por estação
<i>Transit Flows</i>		Fluxo de passageiros entre PEDs ou estações consecutivas de uma linha	Rede viária (<i>links</i>)	Analisar o carregamento da rede de linhas na hora pico
<i>Movement Flows</i>	<i>Movement Table</i>	Número de passageiros que realizam transferências específicas entre linhas, em <i>Route Stops</i> específicos	<i>Route Stops</i>	Obter o fluxo de integração entre as linhas e modos
<i>Aggregated flows</i>		Total de passageiros que passam por cada <i>link</i>	Rede viária (<i>links</i>)	Analisar o carregamento da rede viária na hora pico
<i>Stop-to-stop Matrix</i>	Seleção de <i>Route Stops</i>	Número de passageiros que realizam transferência entre um par de <i>Route Stops</i>	<i>Route Stops</i>	Analisar o tipo de transferências entre pares de estações ou PEDs específicos
<i>Skim Matrix</i>		Valores de atributos (custo generalizado, tarifa, tempo de viagem total, tempo embarcado, tempo de acesso, tempo de egresso, tempo de espera, número de transferências etc.) entre pares O-D	Pares O-D	Analisar comparativamente os indicadores de desempenho para cada par O-D, entre os cenários propostos
<i>Critical Link Analysis</i>	<i>Queries</i> (seleção de <i>links</i> ou <i>Route Stops</i>)	Número de passageiros (parcela da matriz O-D de entrada) que transitam em um <i>link</i> ou <i>Route Stop</i> específico	Pares O-D	Verificar quais pares O-D estão com carregamentos críticos na hora-pico

Fonte: Guia de Usuário TransCAD®. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Em relação aos componentes necessários para a *Movement Table*, é necessário informar as linhas e respectivas paradas cujo volume de integração deseja ser conhecido. Já para a matriz da *Stop-to-Stop* é preciso criar uma seleção de *Route Stops* da qual pretende-se conhecer o volume de trocas. A matriz obtida como saída na simulação possui estratificações entre os tipos de desembarque nos *stops* “de” e tipos de embarque nos *stops* “para”, sendo esses:

- Total;
- Acesso a pé – Transferência direta;
- Acesso a pé – Transferência a pé;
- Acesso a pé – Desembarque;
- Transferência direta – Transferência direta;
- Transferência direta - Transferência a pé;
- Transferência direta – Desembarque;
- Transferência a pé – Transferência direta;
- Transferência a pé - Transferência a pé; e
- Transferência a pé – Desembarque.

Onde o acesso a pé é o acesso direto de um centroide, a transferência a pé é o transbordo entre duas linhas de transporte coletivo, que ocorre entre dois *Physical Stops* diferentes, e a transferência direta é o transbordo entre duas linhas que ocorre no mesmo *Physical Stop*.

8. CALIBRAÇÃO DO MODELO DE ALOCAÇÃO

O processo de calibração do modelo consiste na busca de uma configuração de cenário de simulação cujos resultados de alocação devem se aproximar do observado na realidade. Tendo isso em vista, os dados de referência escolhidos para serem utilizados na calibração se baseiam nos embarques observados nas estações do sistema de trilhos, segundo referência do dia 09 de maio de 2023.

Desse modo, os tópicos a seguir empenham-se em detalhar a metodologia e processo de calibração adotados, bem como a avaliação da qualidade dos resultados obtidos em comparação com os dados de referência.

8.1 OBJETOS DE CALIBRAÇÃO E DADOS DE REFERÊNCIA

Conforme explicado anteriormente, o objeto principal de calibração do modelo foi a quantidade de embarques nas estações do sistema de trilhos durante um período de três horas do pico-manhã, compreendido entre 5h00 e 7h59. A observação dos embarques foi dividida por forma de acesso às estações, seja acesso a pé ou acesso via terminal do Sistema Estrutural Integrado – SEI.

As principais ferramentas de modelagem utilizadas para a calibração são as penalidades em termos de tempo ou custo, sendo possível ajustar a sensibilidade do modelo de uma forma mais geral, seja por penalidades por modos ou linhas ou de forma mais minuciosa, com penalidades em pontos de parada, terminais e transbordo. Para se atingir um nível satisfatório de calibração nas estações de metrô e VLT, ajustaram-se as penalidades relacionadas ao embarque inicial e ao transbordo realizado nos *stops* que representam essas paradas.

A penalidade é medida em minutos adicionados ao tempo total de viagem do par O-D alocado, sendo o *Initial Penalty* relativo ao embarque direto em determinado *stop*, e o *Transfer Penalty*, relativo ao embarque no *stop* resultante de um transbordo entre linhas, de modos distintos ou não. De maneira prática, em uma viagem que some 20 minutos de duração, um usuário que embarcar em um ponto de parada com *Initial Penalty* determinado de 5 minutos, então o tempo total de sua viagem será de 25 minutos. Por procedimento padrão, o *software* TransCAD® configura sempre o *Initial Penalty* como 0 minutos e o *Transfer Penalty* em 3 minutos.

8.2 RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO

Os dados de referência dos números de passageiros embarcados por estação do sistema de trilhos foram obtidos juntamente com o processo de elaboração da Matriz OD (descrito no capítulo 5), e são referentes ao dia 09/maio/2023.

Na sequência são apresentados os gráficos da calibração dos embarques por estação, com seus respectivos resultados para o indicador de aderência R^2 . Como estatística de ajuste para cada estação, foi considerado o indicador SQV³ (*Scalable Quality Value*). Calcula-se SQV como:

$$SQV = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(M - C)^2}{f \cdot C}}}$$

³ doi:10.1177/0361198119838849

Onde:

- M é o volume modelado
- C é o volume observado
- f é o fator de escala

Este indicador varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste. Ele não depende da magnitude dos valores em ajuste, é simétrico, e é adimensional. O fator de escala (f) adotado foi de 10^3 . Para o presente estudo, consideram-se bons ajustes aqueles com indicador SQV acima de 0,70.

Os resultados da calibração são apresentados desagregados em: total de embarques (item 8.2.1), embarques totais por estação (item 8.2.2), embarques diretos por estação (item 8.2.3) e embarques transferidos por estação (item 8.2.4), a seguir.

8.2.1 Total de embarques

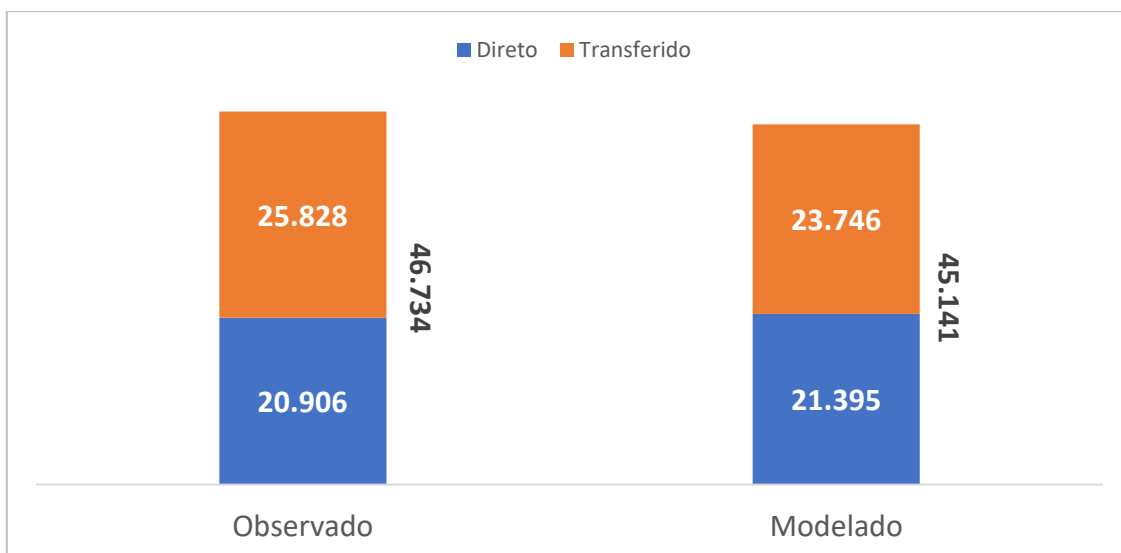
A comparação do total de embarques no sistema de trilhos é apresentada na Tabela 8-1 e na Figura 8-1. Percebe-se o total está bem ajustado, com diferenças percentuais inferiores a 10% e indicador SQV superior a 0,70. O total de embarques transferidos é o que apresenta menor aderência, impactado principalmente pela estação Tancredo Neves (TNV), como será visto no item 8.2.4.

Tabela 8-1 Calibração – Total de embarques

	Observado	Modelado	SQV	Dif	Dif%
Direto	20.906	21.395	0,90	489	2%
Transferido	25.828	23.746	0,71	-2.082	-8%
Total	46.734	45.141	0,81	-1.593	-3%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 8-1 Calibração – Total de embarques



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

8.2.2 Embarques totais

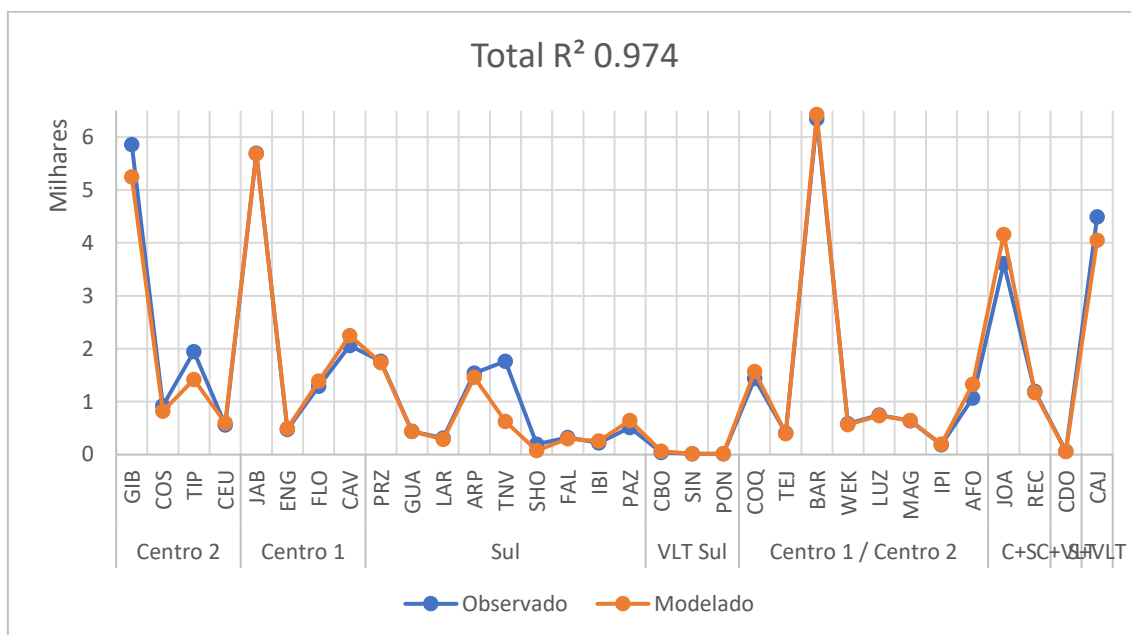
O ajuste do total de embarques por estação é apresentado na Tabela 8-2 e na Figura 8-2. O coeficiente de correlação R^2 é superior a 0,97. Percebe-se que todas as estações possuem bom ajuste, segundo o indicador SQV (acima de 0,70), exceto para a estação Tancredo Neves (TNV). Isto é efeito do ajuste de embarques transferidos, conforme abordado no item 8.2.4.

Tabela 8-2 Calibração – Embarques totais

Linha	Estação	Nome	Observado	Modelado	SQV	Dif	Dif%
Centro 2	GIB	Camaragibe	5.858	5.245	0,80	-612	-10%
	COS	Cosme e Damião	922	823	0,91	-99	-11%
	TIP	Rodoviária	1.947	1.421	0,73	-525	-27%
	CEU	Alto do Céu	559	598	0,95	39	7%
Centro 1	JAB	Jaboatão	5.693	5.686	1,00	-7	0%
	ENG	Engenho Velho	477	492	0,98	15	3%
	FLO	Florianópolis	1.289	1.388	0,92	99	8%
	CAV	Cavaleiro	2.060	2.246	0,89	186	9%
Sul	PRZ	Prazeres	1.764	1.739	0,98	-25	-1%
	GUA	Monte dos Guararapes	441	441	1,00	0	0%
	LAR	Porta Larga	312	287	0,96	-25	-8%
	ARP	Aeroporto	1.543	1.461	0,94	-82	-5%
	TNV	Tancredo Neves	1.762	626	0,54	-1.136	-64%
	SHO	Shopping	195	77	0,79	-118	-61%
	FAL	Antônio Falcão	321	301	0,97	-20	-6%
	IBI	Imbiribeira	222	259	0,93	37	17%
	PAZ	Largo da Paz	511	647	0,84	136	27%
VLT Sul	CBO	Cabo	41	62	0,91	21	51%
	SIN	Santo Inácio	16	16	1,00	0	0%
	PON	Pontezinha	18	17	1,00	-1	-3%
Centro 1 / Centro 2	COQ	Coqueiral	1.438	1.570	0,90	132	9%
	TEJ	Tejipió	410	399	0,98	-11	-3%
	BAR	Barro	6.343	6.426	0,97	83	1%
	WEK	Werneke	584	565	0,98	-18	-3%
	LUZ	Santa Luzia	750	734	0,98	-16	-2%
	MAG	Mangueira	638	647	0,99	10	2%
	IPI	Ipiranga	185	197	0,97	13	7%
	AFO	Afogados	1.070	1.328	0,80	258	24%
C+S	JOA	Joana Bezerra	3.610	4.157	0,78	547	15%
	REC	Recife	1.197	1.172	0,98	-25	-2%
C+VLT	CDO	Curado	67	56	0,96	-11	-16%
S+VLT	CAJ	Cajueiro Seco	4.492	4.053	0,83	-439	-10%
TOTAL			46.734	45.141	0,81	-1.593	-3%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 8-2 Calibração – Embarques totais



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

8.2.3 Embarques diretos

A Tabela 8-3 e a Figura 8-3 apresentam o ajuste dos embarques diretos para cada uma das estações do sistema de trilhos. As estações Tancredo Neves (TNV) e Shopping (SHO) são apresentadas juntas pois estão ambas contidas na mesma zona de simulação, tornando a identificação de embarques diretos simulados impraticável.

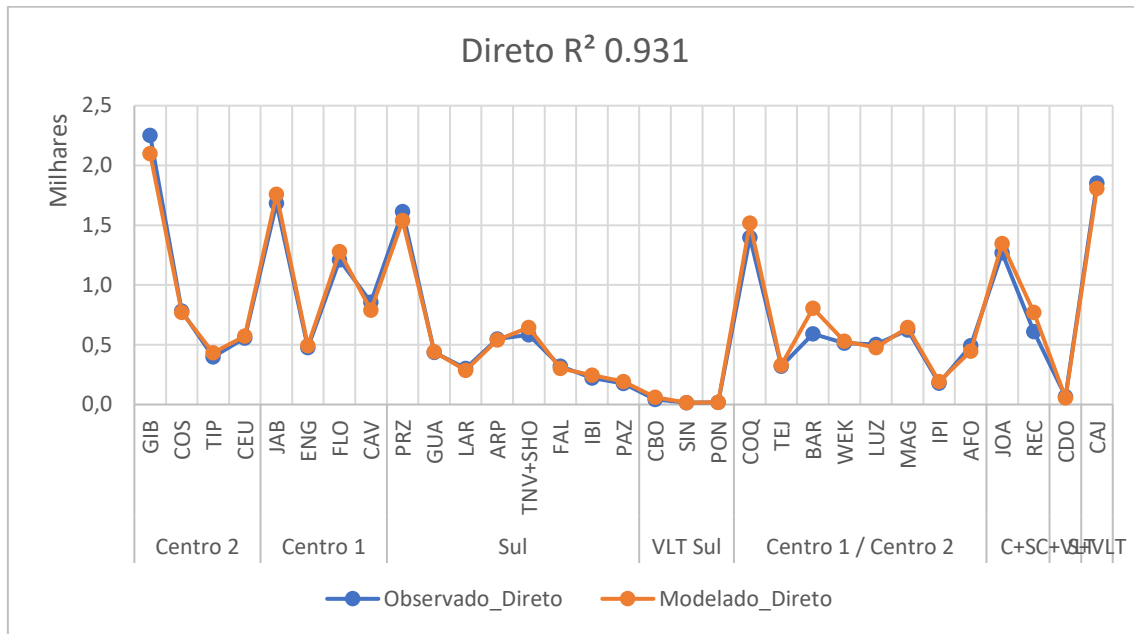
Observa-se que o ajuste está bom, com coeficiente de correlação R² superior a 0,93 e todos os valores do indicador SQV são superiores a 0,77.

Tabela 8-3 Calibração – Embarques diretos

Linha	Estação	Nome	Observado Direto	Modelado Direto	SQV	Dif	Dif%
Centro 2	GIB	Camaragibe	2.252	2.099	0,91	-153	-7%
	COS	Cosme e Damião	780	770	0,99	-10	-1%
	TIP	Rodoviária	397	432	0,95	35	9%
	CEU	Alto do Céu	557	571	0,98	15	3%
Centro 1	JAB	Jaboatão	1.683	1.760	0,94	76	5%
	ENG	Engenho Velho	477	492	0,98	15	3%
	FLO	Florianópolis	1.210	1.280	0,94	70	6%
	CAV	Cavaleiro	855	789	0,93	-67	-8%
Sul	PRZ	Prazeres	1.614	1.538	0,94	-76	-5%
	GUA	Monte dos Guararapes	436	441	0,99	5	1%
	LAR	Porta Larga	303	287	0,97	-16	-5%
	ARP	Aeroporto	548	541	0,99	-7	-1%
	TNV+SHO	Tancredo Neves+Shopping	584	644	0,93	60	10%
	FAL	Antônio Falcão	320	301	0,97	-19	-6%
	IBI	Imbiribeira	221	245	0,95	24	11%
	PAZ	Largo da Paz	176	194	0,96	18	10%
VLT Sul	CBO	Cabo	41	61	0,91	19	47%
	SIN	Santo Inácio	16	16	1,00	0	0%
	PON	Pontezinha	18	17	1,00	-1	-3%
Centro 1 / Centro 2	COQ	Coqueiral	1.397	1.516	0,91	119	9%
	TEJ	Tejipió	322	328	0,99	7	2%
	BAR	Barro	590	805	0,78	214	36%
	WEK	Werneke	513	529	0,98	17	3%
	LUZ	Santa Luzia	503	476	0,96	-28	-5%
	MAG	Mangueira	623	644	0,97	20	3%
	IPI	Ipiranga	179	191	0,97	12	7%
	AFO	Afogados	491	446	0,94	-45	-9%
C+S	JOA	Joana Bezerra	1.269	1.346	0,94	78	6%
	REC	Recife	610	771	0,83	161	26%
C+VLT	CDO	Curado	67	56	0,96	-11	-16%
S+VLT	CAJ	Cajueiro Seco	1.853	1.807	0,97	-46	-2%
TOTAL			20.906	21.395	0,90	489	2%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAC-ESCON-RHEIN, 2024

Figura 8-3 Calibração – Embarques diretos



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAS-CESCON-RHEIN, 2024

8.2.4 Embarques transferidos

O ajuste dos embarques transferidos é apresentado na Tabela 8-4 e na Figura 8-4. O coeficiente de correlação R^2 é superior a 0,95. Observa-se que as estações exclusivas do VLT, além das estações Curado (CDO) e Engenho Velho (ENG) do metrô, apresentam valor observado de zero transferências.

Algumas estações apresentam valor do índice SQV inferior a 0,70. Dentre essas, a estação Rodoviária (TIP) apresenta valor de SQV de 0,69, muito próximo a 0,70, de maneira que não é um ponto de preocupação. Já as estações Alto do Céu (CEU) e Imbiribeira (IBI), apesar de apresentarem valores de SQV abaixo de 0,70, possuem valores absolutos de passageiros transferidos (observado e modelados) muito baixo, de maneira que também não apresentam uma preocupação.

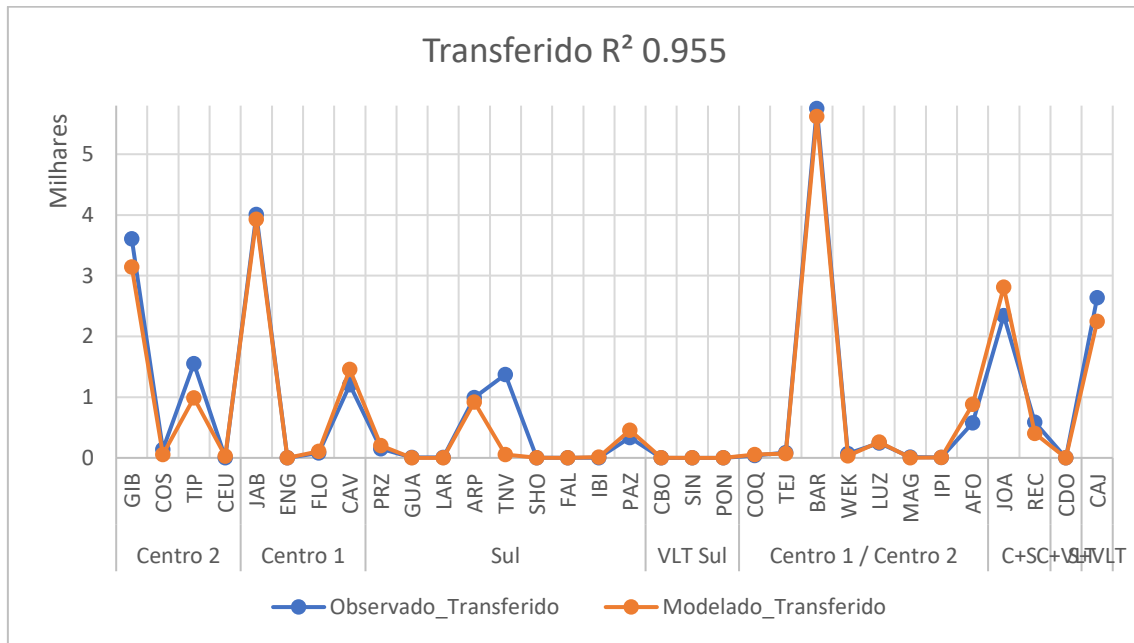
Já para a estação Tancredo Neves (TNV), os totais de embarques transferidos observados e modelados estão muito discrepantes, de forma que o modelo não foi capaz de representar corretamente os embarques transferidos nessa estação. Os artifícios de calibração não se mostraram capazes de corrigir essa discrepância. Assim, para as análises e resultados subsequentes do estudo que dependam de valores absolutos de demanda oriundos do modelo de simulação, será aplicado um fator de correção nessa estação, de forma a adequar a demanda transferida para o patamar correto. Destaca-se que, para o presente relatório, as análises são comparativas, e esse fator de correção não foi aplicado.

Tabela 8-4 Calibração – Embarques transferidos

Linha	Estação	Nome	Observado Transferido	Modelado Transferido	SQV	Dif	Dif%
Centro 2	GIB	Camaragibe	3.605	3.146	0,81	-459	-13%
	COS	Cosme e Damião	141	53	0,81	-89	-63%
	TIP	Rodoviária	1.549	989	0,69	-560	-36%
	CEU	Alto do Céu	3	27	0,69	24	818%
Centro 1	JAB	Jaboatão	4.010	3.927	0,96	-83	-2%
	ENG	Engenho Velho	0	0	-	-	-
	FLO	Floriano	79	108	0,91	29	37%
	CAV	Cavaleiro	1.204	1.458	0,81	253	21%
Sul	PRZ	Prazeres	151	201	0,89	50	33%
	GUA	Monte dos Guararapes	5	0	0,93	-5	-100%
	LAR	Porta Larga	9	0	0,91	-9	-100%
	ARP	Aeroporto	994	920	0,93	-74	-7%
	TNV	Tancredo Neves	1.371	55	0,47	-1.316	-96%
	SHO	Shopping	2	4	0,96	2	109%
	FAL	Antônio Falcão	1	0	0,97	-1	-100%
	IBI	Imbiribeira	1	14	0,70	13	1.432%
	PAZ	Largo da Paz	335	454	0,83	118	35%
VLT Sul	CBO	Cabo	0	2	-	2	-
	SIN	Santo Inácio	0	0	-	0	-
	PON	Pontezinha	0	0	-	0	-
Centro 1 / Centro 2	COQ	Coqueiral	41	53	0,94	13	31%
	TEJ	Tejipió	88	70	0,94	-18	-20%
	BAR	Barro	5.753	5.621	0,95	-132	-2%
	WEK	Werneke	71	36	0,88	-35	-49%
	LUZ	Santa Luzia	247	259	0,98	12	5%
	MAG	Mangueira	14	4	0,92	-11	-74%
	IPI	Ipiranga	6	6	1,00	0	5%
	AFO	Afogados	579	882	0,72	303	52%
C+S	JOA	Joana Bezerra	2.342	2.811	0,77	469	20%
	REC	Recife	587	401	0,80	-186	-32%
C+VLT	CDO	Curado	0	0	-	-	-
S+VLT	CAJ	Cajueiro Seco	2.639	2.246	0,81	-393	-15%
TOTAL			25.828	23.746	0,71	-2.082	-8%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAC-ESCON-RHEIN, 2024

Figura 8-4 Calibração – Embarques transferidos



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRA-CESCON-RHEIN, 2024

9. PROJEÇÃO DA DEMANDA

9.1 ANÁLISES DE REGRESSÃO PARA GERAÇÃO DE VIAGENS

9.1.1 Tratamento de dados socioeconômicos e demográficos

Para a regressão linear que possibilita a projeção da demanda, foram utilizados alguns dos bancos de informações públicas de censos e pesquisas. Os dados escolhidos foram tratados em nível de macrozoneamento, a fim de agregar espacialmente as informações baseadas nas residências dos indivíduos à localização do seu primeiro registro do bilhete eletrônico no sistema de transporte (maneira pela qual a origem do deslocamento é identificada no processo de geração da matriz de bilhetagem eletrônica). Por esse motivo, ressalta-se a importância de ter um zoneamento – bem como um macrozoneamento – que seja coerente com os setores censitários, unidade mínima de análise dos principais entes federativos.

Os dados tratados, com sua fonte, ano de referência, unidade de agregação e unidade utilizada, estão elencados na Tabela 9-1.

Tabela 9-1 Bancos de dados oficiais trabalhados

Fonte	Ano	Dado	Unidade de agregação	Unidade utilizada	Metodologia para tratamento dos dados
CNEFE	2022	Cadastro Nacional de endereços	Setor Censitário	Setor Censitário	
CENSO DEMOGRÁFICO (IBGE)	2022	População por faixa etária e por renda	Setor Censitário	Setor Censitário	
RAIS	2018	Empregos formais	Município	Setor Censitário	Redistribuição com base no número de estabelecimentos
INEP	2022	Microdados educação básica	Distrito	Setor Censitário	Redistribuição com base no número de estabelecimentos de educação
		Microdados educação superior	Município	Setor Censitário	Redistribuição com base no número de estabelecimentos de educação

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Após o tratamento e estruturação dos dados, foram feitos diversos testes para encontrar uma equação linear com relevância estatística.

9.1.2 Definição do macrozoneamento

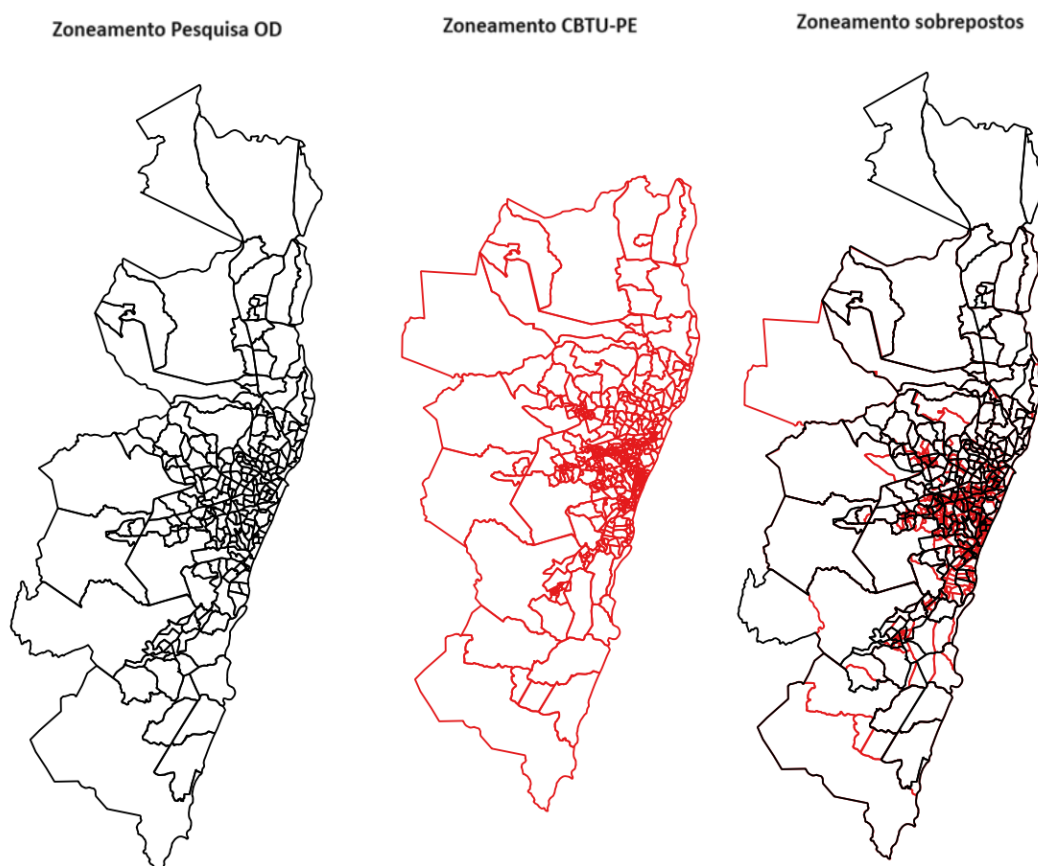
As regressões do modelo de geração visam traduzir, em termos de variáveis socioeconômicas ou de oferta, o total de viagens atraídas e produzidas por cada zona. Naturalmente, o modelo não almeja fornecer valores exatos, já que há particularidades nas dinâmicas de mobilidade de cada zona que não são integralmente explicadas pelas variáveis testadas. Isso é especialmente verdade para um modelo calibrado a partir de dados de bilhetagem, já que a origem e destino

de cada viagem da matriz observada corresponde ao primeiro embarque e ao último desembarque – que não necessariamente ocorrem, respectivamente, na mesma zona onde a viagem efetivamente se iniciou e terminou, já que é comum haver um trecho de caminhada.

Por estes motivos, foram avaliadas estratégias para mitigar o viés associado ao zoneamento, que é notavelmente desagregado no entorno dos eixos de trilhos e outras áreas centrais. A abordagem de maior coerência foi a definição de um macrozoneamento a ser aplicado exclusivamente no modelo de geração. Para isso, foram agrupadas zonas de características homogêneas, levando em consideração a existência de barreiras físicas (como rios e vias expressas), os limites administrativos e a similaridade socioeconômica.

A referência para esse processo foi o zoneamento da Pesquisa Origem-Destino do Recife 2021, com 256 zonas, que é no geral compatível com o zoneamento utilizado no estudo. As zonas da Pesquisa O-D foram refletidas com foco na homogeneidade e na acessibilidade interna a trajetos não motorizados, cumprindo a função de reduzir o viés associado à diferença entre a zona de origem (ou destino) e a zona do primeiro embarque (ou do último desembarque), conforme a Figura 9-1.

Figura 9-1 Zoneamento Pesquisa OD e CBTU-PE

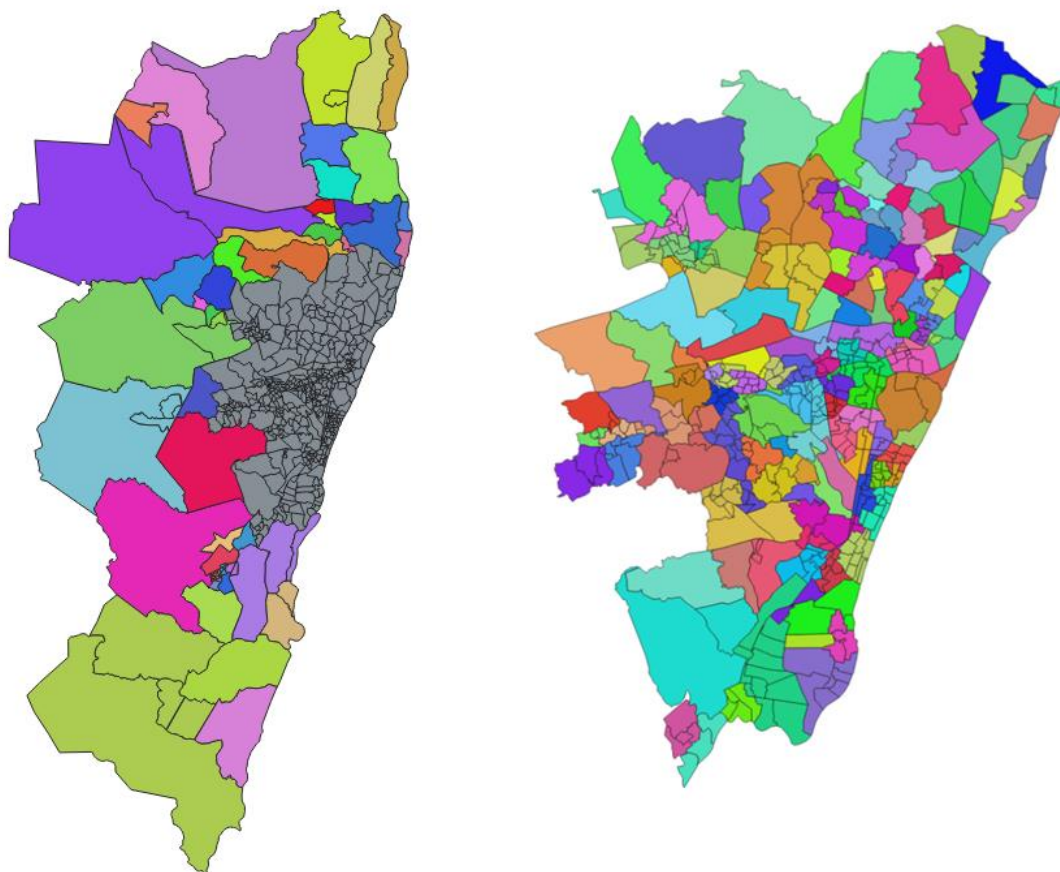


Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Por outro lado, uma das barreiras físicas consideradas na Pesquisa OD é o próprio sistema de trilhos, de maneira que ela não resolve (e mesmo agrava) o problema de descolamento entre a demanda observada e as variáveis socioeconômicas no entorno das estações da CBTU. Desta maneira, procedeu-se ao recorte das zonas lindeiras a estas estações, a partir das quais foram geradas, no total, 98 novas macrozonas – uma por estação, exceto para as estações Tancredo

Neves e Shopping, que foram inseridas na mesma macrozona dada sua proximidade. Assim, no total, o macrozoneamento é composto de 98 macrozonas. A Figura 9-2 ilustra a estrutura do macrozoneamento e do zoneamento implementados no projeto. Na imagem localizada à esquerda, a área destacada em cinza representa a zona central da região analisada.

Figura 9-2 Macrozoneamento adotado para modelagem



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Desta maneira, as regressões lineares serão calibradas a partir do macrozoneamento, com agregação (soma) das viagens observadas e das variáveis socioeconômicas de cada zona. Já a aplicação das regressões calibradas, para todos os cenários, será feita na escala das 530 zonas originais. Desta maneira, obtém-se maior assertividade na predição dos comportamentos de demanda, sem prejuízo ao nível de detalhamento necessário para o estudo.

9.1.3 Regressão linear

A regressão linear é um passo importante para a obtenção de matrizes futuras, sendo uma técnica com base na estatística que relaciona uma variável dependente ou explicada (atração ou produção de viagens) a uma ou mais variáveis explicativas (dados socioeconômicos e demográficos). Assim, é possível estabelecer uma relação entre as predições feitas nas variáveis explicativas, a respeito das quais têm-se maior domínio ou controle, e a variável explicada em análise.

Para a determinação das equações lineares, que explicam produção e atração de viagens, utilizou-se a ferramenta Análise de Dados do Excel e a biblioteca *statmodels*⁴ da linguagem de programação Python, que tornou possível a análise de diversas equações e escolha do conjunto de variáveis preditivas que mais se adequam às circunstâncias da regressão em análise (de produção ou atração de viagens).

9.1.3.1 *Produção de viagens*

A produção da viagem na hora de pico da manhã é geralmente associada a origens domiciliares. Portanto, para a determinação de viagens produzidas por zona, contou-se com variáveis como a população total por zona, a quantidade de domicílios por zona, a renda da população, entre outros fatores. Este cálculo é calibrado no nível das macrozonas e aplicado no nível das 530 zonas de tráfego.

As variáveis explicativas analisadas devem apresentar baixa correlação entre si. Variáveis com forte relação de dependência (alta correlação) podem tendenciar os resultados da regressão linear e prejudicar a interpretação dos resultados. Assim, num primeiro momento, foi analisada a correlação de diversas variáveis preditivas coletadas, tais como o número de domicílios (totais e separados em particular e coletivo) e a população agrupada em diversas classes, por idade ou por renda. O conjunto de variáveis que, pela verificação estatística do quadrado do coeficiente de correlação produto-momento, apresentassem baixa correlação ($R^2 < 0,5$), seguiam para os testes de regressão de diferentes combinações de variáveis.

Em seguida, todas as combinações admissíveis (entre variáveis explicativas não correlacionáveis) foram testadas. Com base em resultados de indicadores de significância estatística (p-valor e teste-T), no ajuste do modelo estatístico linear (R^2), e do coeficiente Durbin-Watson, que avalia a independência dos resíduos (diferença entre valor observado e previsto), foram estabelecidos os melhores modelos para produção. Eventualmente, na determinação das regressões, foi permitida a eliminação de outliers, com a finalidade de refinar a aderência do modelo. A retirada de outliers foi restrita a 10% do total de observações analisadas.

Após a avaliação das várias combinações entre variáveis, observou-se que a mais aderente entre as opções testadas é a da população de indivíduos maiores de 15 anos por zona (ou macrozona). Entretanto, para obter uma regressão satisfatória, acrescentou-se variáveis de oferta para ajuste do modelo, dado que a produção de viagens utilizada não se baseia no domicílio, e sim nos embarques do transporte coletivo. A presença destas variáveis de oferta se explica pela maior concentração de entradas diretas em estações de metrô (linhas Centro e Sul) e BRT. A forma final da função de regressão para a produção de viagens é mostrada a seguir:

$$P_i = 680,06 \times METRO_i + 315,225 \times BRT_i + 0,098 \times POP_i$$

Onde:

- P_i = número total de viagens de transporte público produzidas pela zona (ou macrozona) i na hora de pico da manhã;
- POP_i = população com mais de 15 anos da zona (ou macrozona) i ;
- $BRT_i / METRO_i$ = número de estações BRT ou metrô (linhas Centro e Sul) na zona (ou macrozona) i .

Os resultados estatísticos obtidos para essa equação são descritos na Tabela 9-2 a seguir:

⁴ <https://www.statsmodels.org>

Tabela 9-2 Resultados da função de regressão para a produção de viagens

Atributo	p-valor	t-valor
População (>15 anos)	0.0000%	24,3216
Estações BRT	0.3055%	3,0045
Estações METRO	0,0000%	6,9899
R ²	0,851	
Durbin-Watson	1,948	

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

9.1.3.2 Atração de viagens

A atração da viagem no pico da manhã ocorre, habitualmente, por motivo de trabalho, educação e até saúde, com deslocamentos destinados a estabelecimentos como hospitais, UPAs e clínicas médicas. Conforme detalhado no item 3.1, este modelo tem por objetivo a simples determinação da proporção de viagens atraídas por cada zona ou macrozona (porcentagem em relação ao total), já que o total de viagens no pico da manhã é definido pelo modelo de produção. Desta maneira, as proporções de atração observadas na situação atual são extrapoladas para os horizontes futuros a partir da projeção das variáveis de produção. Assim como na produção, este cálculo é calibrado no nível das macrozonas e aplicado no nível das 530 zonas de tráfego.

Com base neste princípio, foram analisadas a correlação de diversas variáveis preditivas coletadas, tais como o número de estabelecimentos (segregados por tipo, como saúde, e educação), número de vagas em escolas, número de escolas de ensino superior e número de empregos formais. Avaliou-se, ainda, a normalização destas variáveis pela área (densidade) e pela população (indicadores per capita). Novamente foram avaliadas variáveis de oferta, ligadas à presença de estações de metrô (linhas Centro e Sul) e de BRT, além dos Terminais Integrados.

Na sequência, todas as combinações entre variáveis não correlacionáveis foram testadas. Com base em resultados de indicadores de significância estatística (p-valor e teste-t), no ajuste do modelo estatístico linear (R²), e do coeficiente Durbin-Watson, que avalia a independência dos resíduos, foram estabelecidos os melhores modelos para atração de viagens. Eventualmente, na análise das regressões, foi permitida a eliminação de *outliers*, com a finalidade de refinar a aderência do modelo. A retirada de *outliers* foi restrita a 10% do total de observações analisadas.

Após a avaliação de várias combinações entre as variáveis, observou-se que as mais aderentes entre as opções testadas é a combinação do número de estabelecimentos de saúde (variável proxy das atividades de emprego e estudo), além das estações de metrô e BRT. A função de regressão para a atração de viagens é mostrada a seguir:

$$A_i = 49,667 \times EstabSaude_i + 828,251 \times METRO_i + 591,308 \times BRT_i$$

Onde:

- A_i = número total de viagens de transporte público atraídas pela zona (ou macrozona) i na hora de pico da manhã;
- $EstabSaude_i$ = número de estabelecimentos de saúde da zona (ou macrozona) i ;
- $BRT_i / METRO_i$ = número de estações BRT ou metrô (linhas Centro e Sul) na zona (ou macrozona) i .

Os resultados estatísticos obtidos para essa equação são apresentados na Tabela 9-3:

Tabela 9-3 Resultados da função de regressão para a atração de viagens

Atributo	p-valor	t-valor
Estabelecimentos de saúde	0.0000%	22,6354
BRT	0.0014%	4,4729
METRO	0.0000%	11,0263
R ²	0,8236	
Durbin-Watson	1,9001	

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

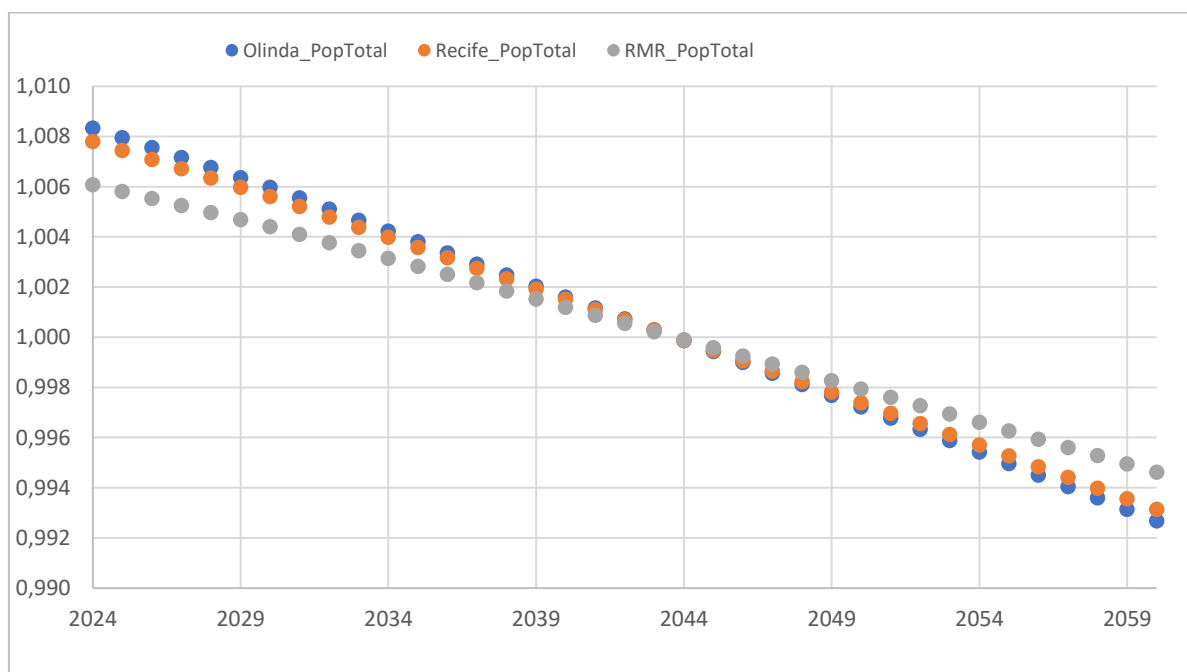
9.2 PROJEÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

A variável “População com mais de 15 anos” foi projetada segundo série de projeção oficial do IBGE para estratificação da população total do Estado de Pernambuco (projeção até o ano de 2060).

A definição das taxas de crescimento da “População com mais de 15 anos” por município da RMR ocorreu a partir da determinação da variação (elasticidade) do crescimento entre as populações totais por município (estimadas pelo IBGE) em relação ao crescimento populacional estimado para Pernambuco entre os anos de 2012 e 2022. As elasticidades definidas foram aplicadas, assim, às taxas de projeção da população maior de 15 anos em Pernambuco (segundo fonte do IBGE).

A Figura 9-3, a seguir, representa os fatores de projeção para a população total do Recife, de Olinda e da RMR. Nota-se que a variação a população para os dois principais municípios da RMR é mais pronunciada do que a variação da RMR como um todo.

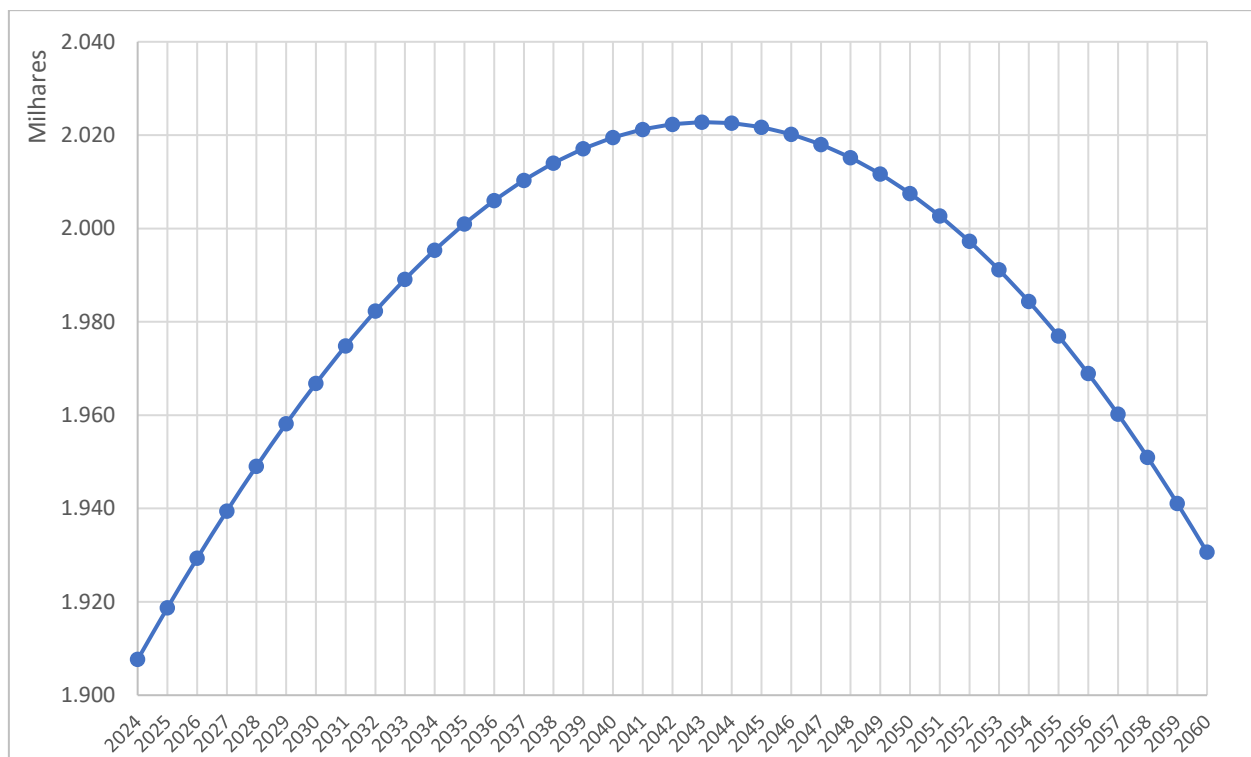
Figura 9-3 Fatores de projeção da população em Recife, Olinda e RMR



Fonte: IBGE. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Finalizadas a definição e aplicação das séries de projeção populacionais para os municípios da RMR, faz-se conhecer, por meio da Figura 9-4, os valores totais para a variável “População com mais de 15 anos” ao longo do horizonte de estudo (2024-2060).

Figura 9-4 Projeção da variável “População com mais de 15 anos” – RMR



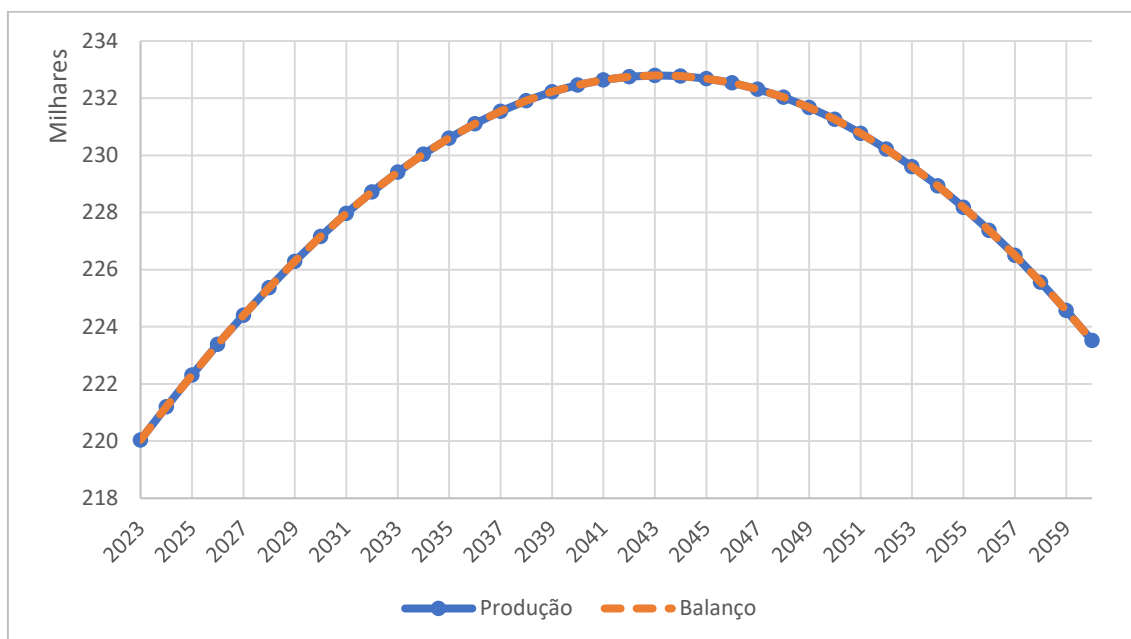
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

9.3 PROJEÇÃO DAS VIAGENS GERADAS POR ZONA DE TRÁFEGO

A partir dos resultados de regressão, aplicados em cada zona, obtêm-se as taxas de crescimento a serem aplicadas às viagens produzidas da matriz do ano base de 2023. Aos valores de projeção da variável explicativa foi aplicada a regressão de produção.

Uma vez obtidos os totais de viagens gerados por zona, esses devem ser balanceados de modo a ter seus totais igualados. Normalmente, a atração da viagem é ajustada em relação à produção da viagem, devido à maior inércia do crescimento da população em comparação com o crescimento econômico. Por outras palavras, os modelos de produção são considerados como preditores mais precisos da realidade a longo prazo. O total balanceado de viagens projetadas é representado pela curva laranja da Figura 9-5 a seguir.

Figura 9-5 Ajuste final da geração de viagens projetada para o horizonte de estudo - RMR



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

9.4 MATRIZES FUTURAS DE TRANSPORTE COLETIVO

Após a projeção das variáveis e determinação da atração e produção de cada zona para cada ano do horizonte estudado, ainda é necessário fazer a distribuição dos valores totais entre os pares de zona origem-destino. Para isso foi utilizado o modelo de Fratar (explicado na **seção 3.2**), que realiza a distribuição dos pares por meio de uma matriz semente: a matriz do ano de 2023 utilizada no Cenário Base.

Após a distribuição das matrizes para cada ano horizonte contemplado, apresenta-se na Tabela 9-4 os totais de cada ano.

Tabela 9-4 Totais das matrizes do horizonte de estudo no Pico Período-Manhã (5h-7h59)

Ano	Demanda pico-manhã
2023	220.043
2024	221.202
2025	222.317
2026	223.385
2027	224.404
2028	225.374
2029	226.292
2030	227.160
2031	227.971
2032	228.720
2033	229.409
2034	230.037
2035	230.603
2036	231.106
2037	231.544
2038	231.916
2039	232.223
2040	232.465
2041	232.641
2042	232.751
2043	232.796
2044	232.775
2045	232.688
2046	232.535
2047	232.316
2048	232.031
2049	231.679
2050	231.260
2051	230.776
2052	230.226
2053	229.610
2054	228.929
2055	228.182
2056	227.371
2057	226.499
2058	225.566
2059	224.572
2060	223.520

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

10. MIGRAÇÃO MODAL

O modelo de divisão modal tem como objetivo determinar a probabilidade de escolha dos usuários diante das alternativas de transportes disponíveis na área em estudo, conforme explicado na **seção 3.3**.

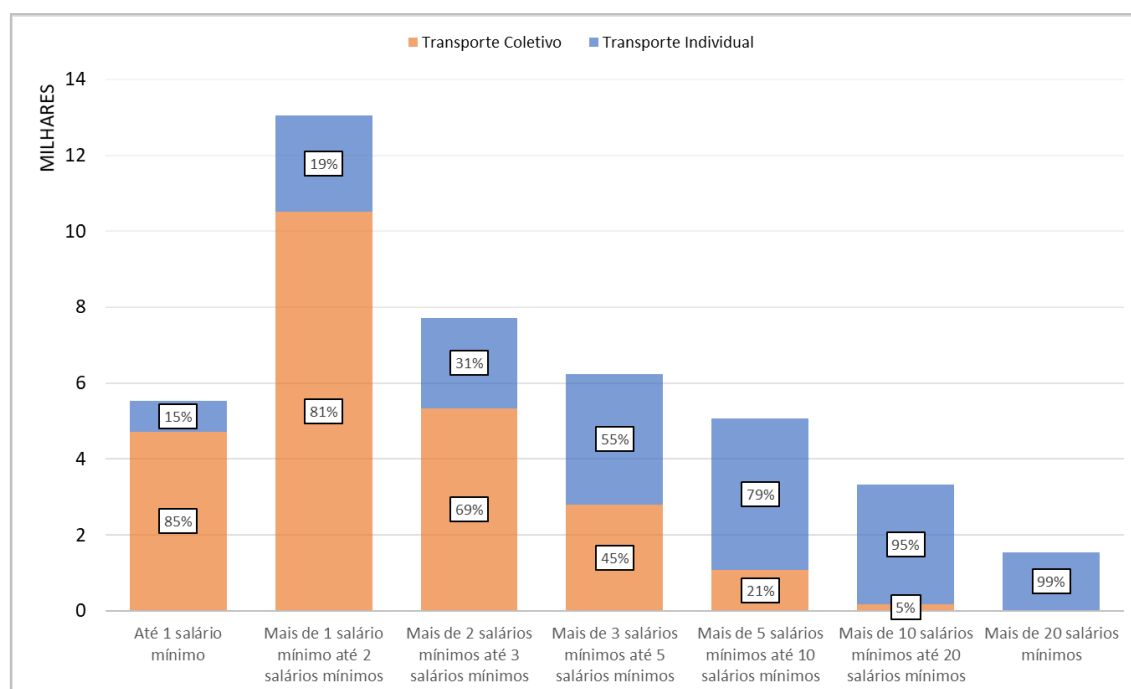
Para o presente estudo, adota-se um modelo de migração modal. Isto é, apoiando-se em um modelo de escolha discreta, aplica-se uma migração modal, a fim de estimar o aumento de demanda de transporte coletivo advinda do transporte individual em razão das melhorias do transporte coletivo (melhorias de operação e aumento da oferta da rede de transportes, conforme descritas nos cenários do **capítulo 11**). Nos itens seguintes, são detalhadas as fontes de informações para a calibração do modelo, e é apresentado o resultado da calibração.

10.1 FONTE DE INFORMAÇÕES DAS ESCOLHAS

O modelo de escolha discreta *Logit* foi calibrado utilizando-se informações da pesquisa O-D domiciliar da Região Metropolitana de Recife, de 2018. A pesquisa O-D domiciliar é uma pesquisa de preferência revelada, em que cada entrevistado revela a preferência do modo que utilizou para fazer cada viagem. Assim, foram utilizados os registros de viagens para os períodos do pico manhã (viagens iniciadas entre 05h00 e 07h59). Além disso, foi trabalhada a amostra que viaja por motivo 'trabalho'. Tal seleção se deveu à limitação de informação quanto às zonas da pesquisa O-D entre as quais se dão as viagens por outras motivações (estudos, lazer etc.).

Dentro dos critérios anteriores, foram considerados os registros de viagens de entrevistados com faixa de renda entre 2 e 3 salários-mínimos, o que correspondeu a cerca de 7,7 mil registros. Os totais de viagens por faixa de renda, além da distribuição da escolha por modo (coletivo ou individual), estão representados na Figura 10-1.

Figura 10-1 Registros de viagens por faixa de renda e por modo – Pesquisa O-D 2018



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Percebe-se que a categoria de renda selecionada apresenta proporções de viagem mais distribuídas entre os modos coletivo e individual (69% e 31%, respectivamente). Dada a baixa representatividade de usuários de modo individual nas categorias de renda inferiores (menor que 2 salários-mínimos - SM), optou-se por não selecionar, a fim de não utilizar para calibração possíveis usuários que são cativos do transporte público e não possuem uma escolha verdadeira. Por sua vez, as categorias acima de 5 salários-mínimos demonstraram não ser representativas dos usuários do transporte coletivo. Os primeiros testes de calibração das utilidades, consideraram tais faixas de renda e apontaram aumento da utilidade do transporte coletivo mediante aumento dos custos com esse modo. Tais resultados ilógicos deixaram de ocorrer, uma vez que foi retirada da amostra as categorias de renda superior a 5 SM.

Por fim, as categorias de 2-3 SM e de 3-5 SM foram testadas individualmente para comparação das utilidades produzidas. Observou-se que, para a categoria de 3-5 SM, as impedâncias disponíveis (como tempos de viagem por modo, custo da viagem por modo e quantidade de transbordos no transporte coletivo) não eram suficientes para representar as utilidades dos modos analisados, uma vez que os resultados dos betas da função seguiam ilógicos (por exemplo, representando o tempo de viagem com sinal positivo). Esse comportamento pode representar ausência de outros elementos considerados importantes para esses usuários ao determinar sua utilidade (como conforto e segurança), mas que, contudo, não puderam ser mensurados para esse estudo. Dessa forma, para calibração do modelo de escolha discreta, considerou-se apenas a categoria de renda de 2-3 SM, tal como dito anteriormente.

A pesquisa O-D domiciliar possui 20 modos de viagens codificados. A fim de calibrar o modelo de migração modal, apenas alguns modos foram utilizados. Esses modos foram agrupados conforme ilustrado na Tabela 10-1, a seguir:

Tabela 10-1 Modos calibração migração modal

Código modo	Descrição modo	Modo agrupado	Total registros por modo		Proporção
			Motivo trabalho	Motivo estudo	
1	Somente a pé	NÃO UTILIZADO	7.912	5.128	12,47%
2	Somente bicicleta	NÃO UTILIZADO	2.206	489	2,58%
3	Somente Ônibus (apenas uma linha)	COLETIVO	17.915	6.266	23,12%
4	Somente Ônibus (duas ou mais linhas)	COLETIVO	16.894	4.032	20,01%
5	Somente Metrô	COLETIVO	463	82	0,52%
6	Bicicleta + Ônibus	COLETIVO	218	50	0,26%
7	Bicicleta + Ônibus + Metrô	COLETIVO	21	4	0,02%
8	Ônibus + Metrô	COLETIVO	6.104	1.091	6,88%
9	Transporte Escolar	NÃO UTILIZADO	50	881	0,89%
10	Fretado	NÃO UTILIZADO	1.145	164	1,25%
11	Motocicleta	INDIVIDUAL	6.534	858	7,07%
12	Carro (dirigindo)	INDIVIDUAL	18.066	2.680	19,84%
13	Carro (como passageiro)	INDIVIDUAL	2.349	810	3,02%
14	Táxi	INDIVIDUAL	113	16	0,12%
15	Uber	INDIVIDUAL	334	99	0,41%
16	Mototáxi	INDIVIDUAL	171	29	0,19%
17	Barco	NÃO UTILIZADO	8	9	0,02%
18	Caminhão	NÃO UTILIZADO	15	-	0,01%

Código modo	Descrição modo	Modo agrupado	Total registros por modo		Proporção
			Motivo trabalho	Motivo estudo	
19	VLT (Veículo Leve sobre Trilhos)	COLETIVO	19	3	0,02%
20	Outro	NÃO UTILIZADO	1.051	296	1,29%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

As informações de impedâncias foram retiradas da rede de simulação, e são explicadas na próxima seção.

10.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

As variáveis explicativas estudadas foram os tempos e custos para cada um dos modos de transporte analisados. Os tempos e custos foram considerados para o ano de 2019, e estimados a partir da rede de modelagem para cada par de origem e destino.

Os dados que influenciam a impedância de automóvel devem estar compatíveis com as informações observadas de viagem. Como a pesquisa O-D está na referência de 2018, é condizente que os dados da ANP estejam na referência de 2019.

10.2.1 Variáveis explicativas modo individual

Para estimar os caminhos do modo individual na rede de modelagem, foram levantadas (pelo Google Maps) as velocidades de circulação em viagens no tráfego misto por categoria de via (arterial, coletora e local) na área de influência do metrô. Seguindo a essa etapa, foi necessário propor a generalização das velocidades de tráfego misto para toda a base viária modelada. Para tanto, os valores levantados foram comparados às velocidades desempenhadas pelo transporte coletivo (determinadas segundo descrito no item 6.2.1).

Com estas velocidades, foi feita uma busca de caminhos de menor tempo na rede, de forma a obter, para cada par O-D, o tempo e o comprimento de viagem.

Para o custo de viagem de automóvel, foi estimado um coeficiente de custo por quilômetro rodado, considerando o custo do combustível. Utilizou-se um consumo de 0,0829 L/km para gasolina e de 0,1203 L/km para etanol.

Os preços de venda dos combustíveis foram obtidos a partir das informações disponibilizadas pela ANP⁵ (2019)⁶, para a cidade de Recife, e são de R\$ 5,399 por litro para gasolina e R\$ 4,61 por litro para etanol.

Finalmente, foram obtidos os dados de venda de combustível para o Estado de Pernambuco, disponibilizados pela ANP⁷ (2019). A informação de venda é utilizada para fazer uma média ponderada entre os coeficientes de custo da gasolina e do etanol.

A Tabela 10-2, a seguir, apresenta o cálculo do coeficiente de custo.

⁵ http://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Municipio_Posto.asp

⁶ Ano de referência de análise de preços e consumo de combustível, anterior à pandemia por Covid-19.

⁷ <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>

Tabela 10-2 Coeficiente custo individual

Combustível	Gasolina	Etanol	Unidade
Consumo	0,0829	0,1203	L/km
Custo	5,3990	4,6100	R\$/L
Coeficiente custo	0,4476	0,5544	R\$/km
Venda 2019	3.205	767	m³
Custo médio	0,4682		R\$/km

Fonte: ANP (2019) Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Os tempos de viagem do modo individual, para cada par O-D, foram obtidos diretamente da rede de modelagem com as velocidades levantadas, conforme já explicado na **seção 6.2.1**.

10.2.2 Variáveis explicativas modo coletivo

As variáveis explicativas do modo coletivo foram obtidas diretamente do modelo de alocação de viagens, detalhado nos capítulos 6 e 7. Valor de tarifa pago, tempos de caminhadas, esperas no veículo, número de transbordos, para cada par O-D, são os resultados descritos na *skim matrix* da Tabela 7-3.

10.3 CALIBRAÇÃO DA FERRAMENTA LOGIT MULTINOMIAL

Foram estudadas algumas variáveis para compor as funções de utilidade. Entretanto, algumas combinações geraram resultados ilógicos (tempos com sinais positivos) ou então não significativos (teste-t menor que 2). Assim, as variáveis que foram mantidas no modelo são: custo no modo individual, tempo de espera inicial no modo coletivo, e número de transbordos no modo coletivo. Observa-se que o sinal dos coeficientes das duas primeiras variáveis é negativo, ou seja, um aumento no custo ou no tempo gera redução de utilidade (“desutilidade”) para aquele modo. Por outro lado, para a variável “número de transbordos”, a calibração resultou num sinal positivo, o que indica aumento da utilidade do modo coletivo frente ao aumento da interconectividade da rede de transporte.

A função de utilidade do modo individual é dada por:

$$U_{Ind} = -0,675 - 0,006208 * CustoAuto$$

E a função do modo coletivo é dada por:

$$U_{Col} = -0,004268 * TempoInicialColetiv + 0,066285 * N^oTransbordoColetivo$$

Conforme exposto no item 3.3, a probabilidade da escolha de cada modo é:

$$P_{Ind} = \frac{e^{U_{Ind}}}{e^{U_{Ind}} + e^{U_{Col}}} \quad P_{Col} = \frac{e^{U_{Col}}}{e^{U_{Ind}} + e^{U_{Col}}}$$

O modelo calibrado representa bem a divisão modal observada na matriz O-D da pesquisa domiciliar. A Tabela 10-3, a seguir, apresenta o total das matrizes observadas (motivo de viagem a trabalho) e das matrizes modeladas, utilizando-se o modelo descrito. Percebe-se que a repartição modal está bem representada, no agregado das matrizes.

Tabela 10-3 Calibração modelo migração modal

	Individual	Coletivo
Observado*	939.455	226.760
	81%	19%
Modelado	757.940	279.221
	73%	27%

*Foram filtrados os totais de viagens das zonas representadas no modelo de simulação

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

10.4 APLICAÇÃO DO MODELO DE MIGRAÇÃO MODAL

Com o modelo calibrado, a aplicação é feita considerando a variação nas impedâncias do transporte coletivo (custo e tempo), para cada par de Origem-Destino, ao se implementar algum dos cenários em análise. Com isso, obtém-se novas proporções entre transporte individual e coletivo para cada par Origem-Destino. A fim de compor um prognóstico de atratividade de demanda pelo transporte coletivo, apenas pares O-D que tiveram aumentos na demanda são considerados, descartando-se a demanda que ocasionalmente tenha diminuído do transporte coletivo. Dessa forma, esta é uma estimativa otimista de potencial de migração para o transporte coletivo, frente os cenários analisados.

As proporções de migração para os pares Origem-Destino são apresentadas na **Seção 13.1**.

11. CENÁRIOS INICIAIS

Nessa etapa do Estudo, foram definidos cenários iniciais, de modo a avaliar a responsividade do modelo em relação a diferentes configurações de oferta, demanda e tarifa. As análises principais foram posteriormente efetuadas durante a fase de iteração com o Estado PE e União, apresentada no capítulo 12.

Assim, foram definidos 3 cenários iniciais (A, B.1, e C), e uma variação de cenário (B.2)⁸, conforme Tabela 11-1. É importante ressaltar que todas as análises apresentadas neste capítulo foram realizadas no período de pico da manhã (entre 5h00 e 7h59).

Importante enfatizar que, para todos os cenários, considera-se a atualização tarifária ocorrida em março/2024, isto é, a extinção do Anel B e incorporação das linhas de ônibus desse anel nos valores e regras tarifárias do Anel A.

Tabela 11-1 Resumo de cenários

Cenário	Descrição	Rede de Transporte	Política Tarifária	Horizonte
0	Calibração	Oferta maio/2023	Vigente em 2023	2023
A	Base (operação conforme plano operacional atual da empresa) ⁹	Oferta maio/2023	Atualizado (março/2024)	2025 – 2060
B.1	Melhorias trilhos SEM eletrificação do VLT	Linhas metrô: melhorias operacionais e de intervalo (SEM eletrificação do VLT) Ônibus: Oferta maio/2023	Atualizado (março/2024)	2025
B.2	Melhorias trilhos COM eletrificação do VLT	Linhas metrô: melhorias operacionais e de intervalo Linhas VLT: eletrificação Ônibus: Oferta maio/2023	Atualizado (março/2024)	2025
C	Melhorias trilhos SEM eletrificação do VLT COM seccionamento ônibus	Linhas metrô: melhorias operacionais e de intervalo (SEM eletrificação do VLT) Ônibus: Seccionamento de linhas de ônibus em estações de metrô	Atualizado (março/2024)	2025

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAC-ESCON-RHEIN, 2024

Inicialmente, apenas o cenário A – Base é simulado para todos os anos horizontes do Estudo (2025 – 2060), a cada 5 anos, para verificar a evolução tendencial da demanda ao longo dos anos. Já as demais simulações ocorrem fixando-se o ano de 2025, o que permite avaliar a sensibilidade da demanda a variações de oferta. Segue a descrição dos cenários:

- **Cenário 0** corresponde ao cenário de calibração com a rede de transporte coletivo vigente em maio de 2023;
- **Cenário A – Base**, utilizado para comparação com a rede de transporte coletivo vigente de maio de 2023. Já contempla a extinção do Anel B;

⁸ Com o intuito de avaliar o impacto da eletrificação do VLT na demanda dos trilhos.

⁹ O cenário Base reflete o cumprimento do plano operacional elaborado pela empresa. Destaca-se que atualmente o plano não é integralmente obedecido.

- **Cenário B.1** conta com a requalificação do sistema metroferroviário, aqui identificada pela expressão “melhorias operacionais” dos sistemas de trilhos e intervalos menores;
- **Cenário B.2** inclui, além das melhorias do cenário B.1, a eletrificação do VLT;
- **Cenário C** inclui o seccionamento das linhas de ônibus concorrentes ao sistema do metrô. Contempla, além das melhorias dos trilhos citadas anteriormente, proposta de rearranjo de linhas de ônibus existentes a serem detalhadas ainda neste capítulo.

As melhorias operacionais aplicadas ao sistema de trilhos de Recife são representadas no modelo de simulação por meio de fator de imagem de 0,95. O fator de imagem é um coeficiente que multiplica o tempo de viagem no veículo, ou seja, o valor de 0,95 no fator de imagem gera uma percepção por parte do usuário de redução de tempo no veículo de 5%.

11.1 ATUALIZAÇÃO TARIFÁRIA – EXTINÇÃO DO ANEL B

Em função da medida de extinção do Anel B que entrou em vigor em 03 de março de 2024, as tarifas de 73 linhas de ônibus foram reduzidas de R\$ 5,60 para R\$ 4,10, mesmo valor praticado nas linhas do Anel A.

Como se trata de uma alteração após 2023, ano base da calibração do modelo, as novas tarifas das linhas do Anel B foram aplicadas desde o Cenário Base.

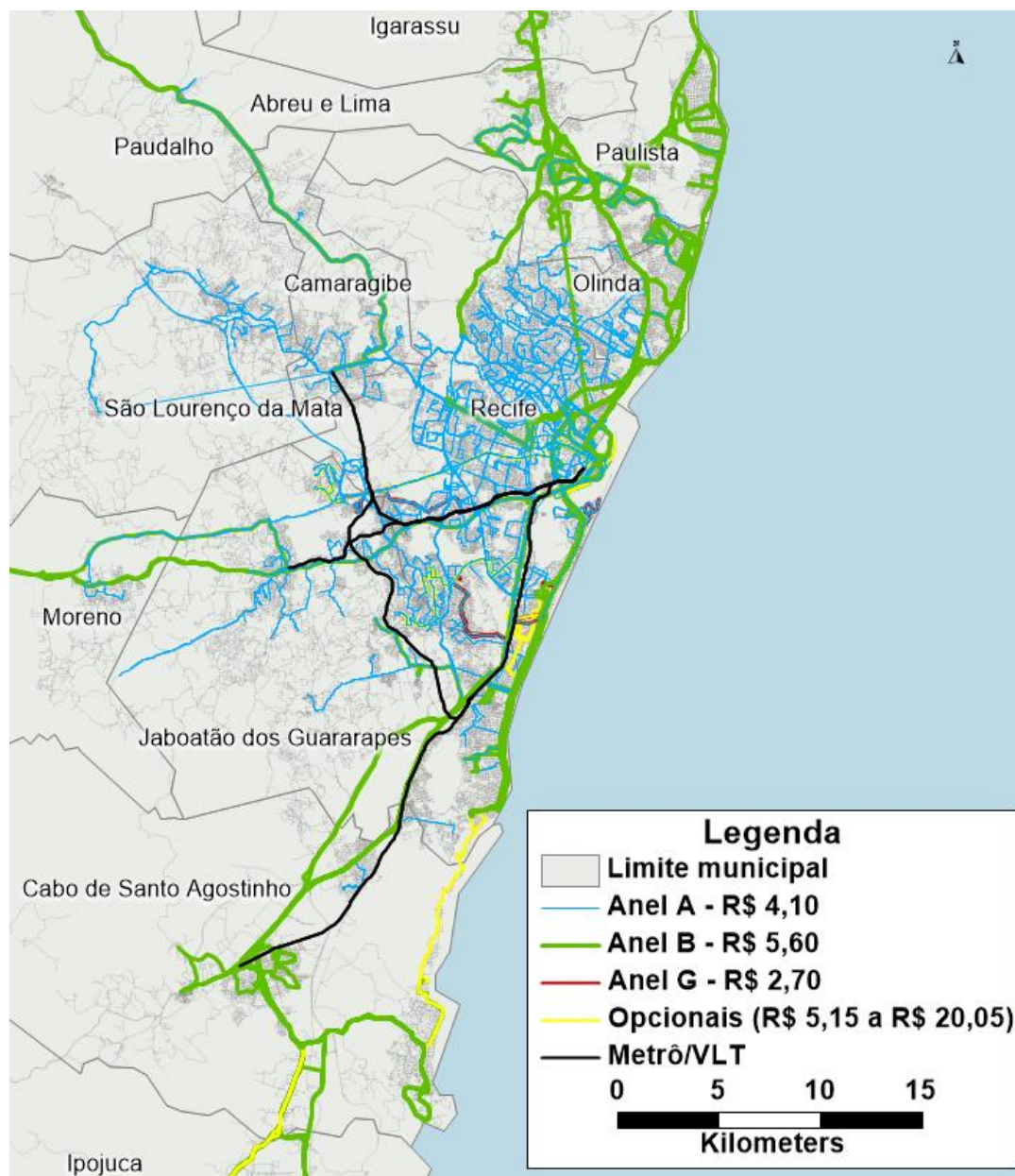
Seguem informações da quantidade e distribuição de linhas por anel representadas na Tabela 11-2 e Figura 11-1 a seguir, com destaque para as linhas do Anel B afetadas.

Tabela 11-2 Quilometragem média e n.º de linhas por anel

Anel	Extensão Média (km)	N.º de Linhas
A	12,4	305
B	21,6	73
G	9,9	3
OPCIONAL	36,9	10
TOTAL		391

Fonte: Base do GTFS, base de linhas que operam em maio/2023, Grande Recife. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRAS-CESCON-RHEIN, 2024

Figura 11-1 Distribuição de linhas por anel tarifário (2023)



Fonte: Base do GTFS, maio de 2023. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Essa mudança impactou 73 linhas de ônibus metropolitanas com extensão média maior do que as demais e motivou a realização de uma simulação para medir o impacto dessa medida na demanda dos trilhos.

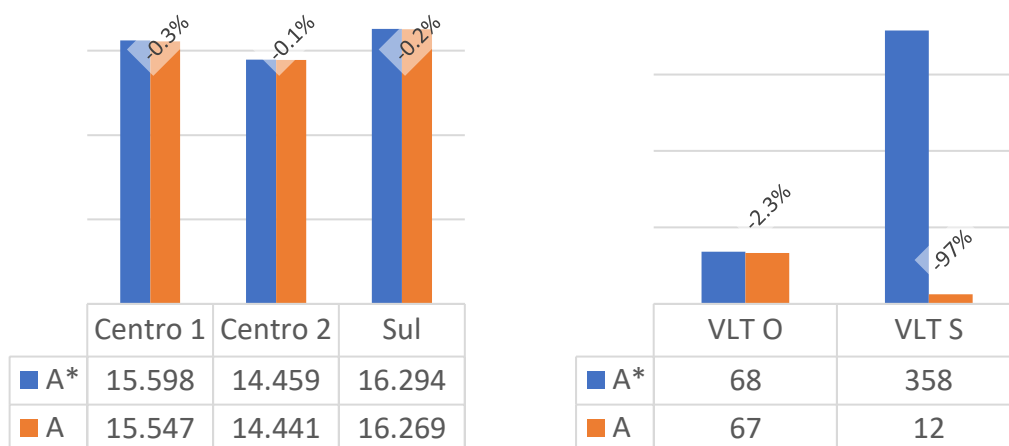
Como resultado, entendeu-se que não ocorriam grandes efeitos na demanda do Metrô. No entanto, houve repercussão relevante na demanda do VLT Sul, uma vez que linhas de ônibus que concorrem com o trecho passaram a ter tarifa inferior à praticada pela CBTU. Na Figura 11-2, são apresentados os resultados de demanda do cenário “A*” (manutenção do anel B) e do cenário “A” (extinção da tarifa do anel B), sob as condições do cenário Base, como apresentado na Tabela 11-3.

Tabela 11-3: Parâmetros dos Cenários - Avaliação da extinção do Anel B

Cenário	Descrição	Metrô	VLT	Rede ônibus	Política tarifária	Horizonte
A*	Base com Anel B	C1 = 16,36min C2 = 16,36min S = 12min	O = 90min S = 45min	Oferta maio/2023	Vigente 2023 (com Anel B)	2025
A	Base	C1 = 16,36min C2 = 16,36min S = 12min	O = 90min S = 45min	Oferta maio/2023	Atualização março 2024 (Anel B extinto)	2025

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 11-2 - Embarques no período pico da manhã – Sistema de trilhos (3h)



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

11.2 RESULTADOS POR CENÁRIO

Os resultados dos cenários são agrupados conforme o objetivo de cada análise, a saber:

- 11.2.1: Evolução da demanda do Cenário Base ao longo dos anos horizontes do estudo;
- 11.2.2: Análise de sensibilidade em relação ao intervalo das linhas de metrô, a fim de defini-lo para as simulações de oferta;
- 11.2.3: Análise de sensibilidade em relação à eletrificação do VLT;
- 11.2.4: Análise de sensibilidade em relação ao seccionamento de linhas de ônibus.

Vale ressaltar que as análises de sensibilidade são realizadas para o ano de 2025 e sem a consideração da migração modal, de maneira a ser possível a comparação que se deseja. Ao ser identificado o cenário principal, o preferido dentre os avaliados, são feitas análises comparativas com o cenário Base a cada 5 anos no período compreendido entre 2025 e 2060.

11.2.1 Evolução da demanda ao longo dos anos horizontes – Cenário Base

Foi realizada, para o Cenário Base, análise da evolução da demanda ao longo dos anos horizontes, cujos resultados são apresentados separadamente para cada linha, na Tabela 11-4, Tabela 11-5, Tabela 11-6, Tabela 11-7 e Tabela 11-8 a seguir.

De forma geral, a longo prazo, a demanda apresenta pouca variação, seguindo o mesmo comportamento do crescimento da população, onde o pico ocorre entre os anos de 2040-2045.

11.2.1.1 Centro 1

Tabela 11-4 Resultados do cenário Base – Centro 1

Cenário	Ano	Intervalo (min)	Embarques	Carr. máx. (PM)	Trecho crítico
			PM		
A – Base	2025	16,4	15.570	10.066	IPI → AFO
	2030		15.891	10.284	IPI → AFO
	2035		16.116	10.434	IPI → AFO
	2040		16.238	10.516	IPI → AFO
	2045		16.253	10.525	IPI → AFO
	2050		16.159	10.464	IPI → AFO
	2055		15.956	10.326	IPI → AFO
	2060		15.649	10.121	IPI → AFO

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

11.2.1.2 Centro 2

Tabela 11-5 Resultados do cenário Base – Centro 2

Cenário	Ano	Intervalo (min)	Embarques	Carr. máx. (PM)	Trecho crítico
			PM		
A – Base	2025	16,4	14.413	8.007	IPI → AFO
	2030		14.672	8.147	IPI → AFO
	2035		14.862	8.260	WEK → LUZ
	2040		14.966	8.324	WEK → LUZ
	2045		14.977	8.330	WEK → LUZ
	2050		14.899	8.283	WEK → LUZ
	2055		14.728	8.183	IPI → AFO
	2060		14.480	8.044	IPI → AFO

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

11.2.1.3 Sul

Tabela 11-6 Resultados do cenário Base – Sul

Cenário	Ano	Intervalo (min)	Embarques	Carr. máx. (PM)	Trecho crítico
			PM		
A – Base	2025	12,0	16.235	9.251	SHO → FAL
	2030		16.576	9.446	SHO → FAL
	2035		16.826	9.574	SHO → FAL
	2040		16.965	9.650	SHO → FAL
	2045		16.983	9.660	SHO → FAL
	2050		16.875	9.601	SHO → FAL
	2055		16.658	9.486	SHO → FAL
	2060		16.331	9.300	SHO → FAL

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

11.2.1.4 VLT Oeste

Tabela 11-7 Resultados do cenário Base – VLT Oeste

Cenário	Ano	Intervalo (min)	Embarques	Carr. máx. (PM)	Trecho crítico
			PM		
A – Base	2025	90	117	75	MAF → JOL
	2030		133	84	MAF → JOL
	2035		154	94	MAF → JOL
	2040		167	101	MAF → JOL
	2045		170	102	MAF → JOL
	2050		158	96	MAF → JOL
	2055		141	88	MAF → JOL
	2060		117	75	MAF → JOL

11.2.1.5 VLT Sul

Tabela 11-8 Resultados do cenário Base – VLT Sul

Cenário	Ano	Intervalo (min)	Embarques	Carr. máx. (PM)	Trecho crítico
			PM		
A – Base	2025	45	12	5	PON → ANG
	2030		13	5	PON → ANG
	2035		15	6	PON → ANG
	2040		18	8	PON → ANG
	2045		18	8	PON → ANG
	2050		18	7	PON → ANG
	2055		14	6	PON → ANG
	2060		13	5	PON → ANG

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Conforme observado na Seção 11.1, a demanda do VLT Sul é fortemente afetada, com uma redução de 97% da demanda, por conta da extinção da tarifa do anel B. Linhas de ônibus do antigo anel B, que passam a ter tarifas mais baixas e realizam trajetos semelhantes aos do VLT Sul, acabam competindo diretamente, resultando na transferência de demanda de um modo de transporte para o outro.

11.2.2 Análise de sensibilidade da redução de intervalos das linhas de metrô

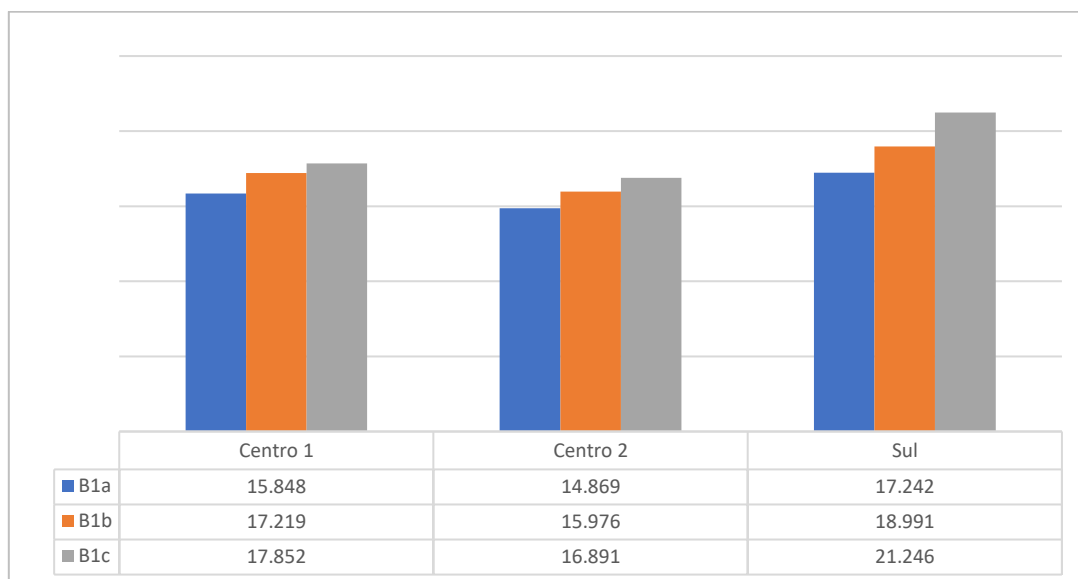
A fim de realizar análise inicial do impacto de redução de intervalos entre veículos do metrô na demanda dos trilhos, cenário B.1, fez-se inicialmente uma análise de sensibilidade de diferentes intervalos de operação, a fim de se comparar a demanda obtida com cada intervalo, conforme apresentado a seguir na Tabela 11-9 e Figura 11-3.

Tabela 11-9 Intervalos (minutos) metrô – Análise de sensibilidade

Cenário	Centro 1	Centro 2	Sul
B1a	16,4	16,4	12,0
B1b	13,8	13,8	10,6
B1c	12,0	12,0	9,0

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 11-3 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59) – Metrô



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRA-CESCON-RHEIN, 2024

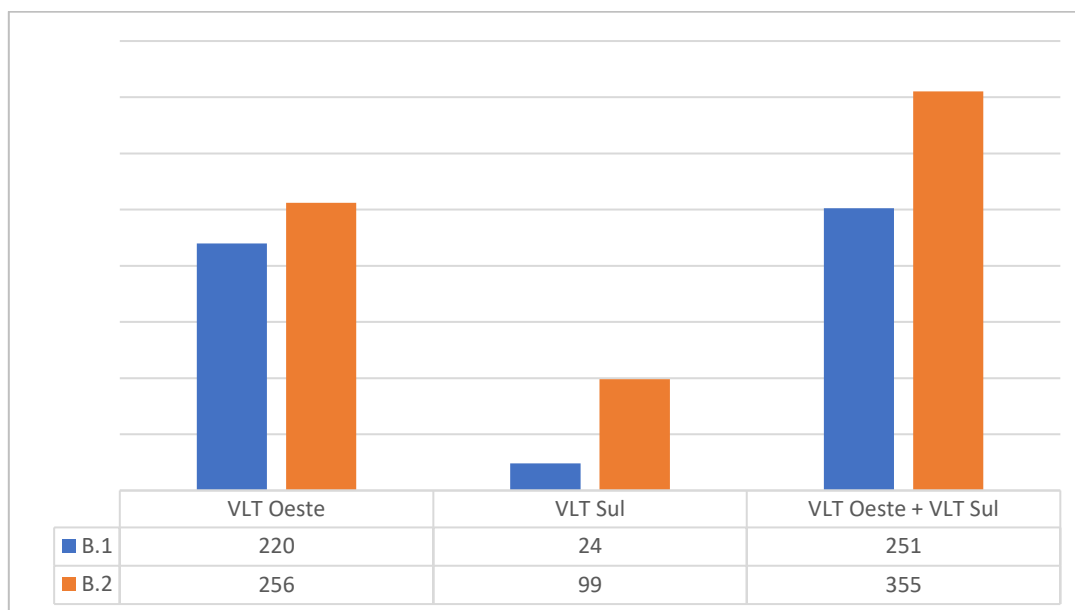
O total de embarques atraído pelo sistema de trilhos se mostrou diretamente proporcional à melhoria dos intervalos de operações, como apresentado na figura anterior. Assim, para os demais cenários, B.2 e C, optou-se pelos intervalos de 12 min para as linhas Centro 1 e Centro 2 e 9 min para linha Sul. Estes valores foram aplicados nos demais cenários iniciais (itens 11.2.3 e 11.2.4).

Ressalta-se que, após as rodadas dos Cenários Iniciais, o Estado PE solicitou a inclusão de cenários adicionais para avaliar outros valores inferiores de intervalos do metrô. Essas novas avaliações foram realizadas durante o processo iterativo com o Estado PE mostradas no capítulo 12.

11.2.3 Análise de sensibilidade da eletrificação do VLT

Na análise de sensibilidade da eletrificação do VLT descrita na Figura 11-4, foi feita simulação considerando melhoria de 20% no fator de imagem do serviço. Portanto, o fator de imagem de 0,8 é mais significativo do que aquele considerado para representar as melhorias operacionais sem eletrificação (0,95). Conforme exposto anteriormente, o cenário sem eletrificação é o B.1 (com os intervalos para o Metrô definidos no item anterior), enquanto o cenário com eletrificação do VLT é o B.2.

Figura 11-4 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59) – VLT



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Como a demanda das linhas VLT é baixa, particularmente após a extinção do anel tarifário B, o aumento representa apenas 104 passageiros nas 3 horas do período pico da manhã. Assim, o cenário a seguir não considera a eletrificação do VLT.

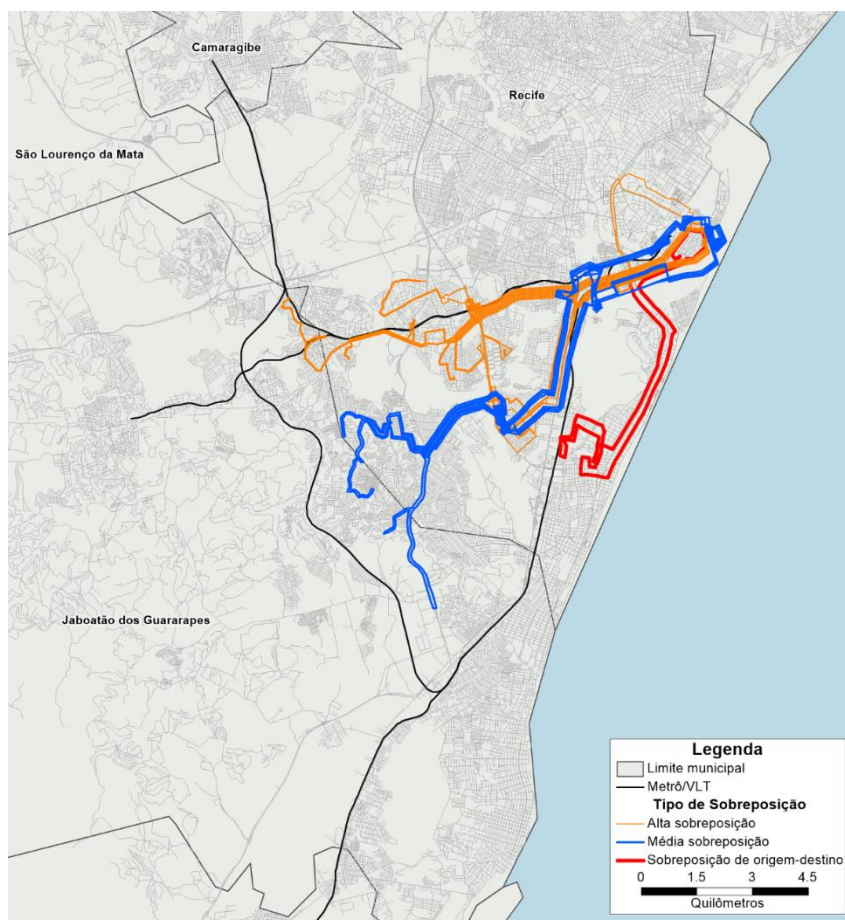
11.2.4 Análise de sensibilidade do seccionamento das linhas de alimentação do metrô

O sistema de transporte coletivo de passageiros na RMR já é **tronco-alimentado** no SEI, do qual fazem parte os ônibus metropolitanos, os ônibus urbanos de Recife e o metrô da RMR. Isso explica o baixo número de linhas concorrentes aos trilhos se comparado com sistemas de outras regiões metropolitanas, como de Porto Alegre e de Belo Horizonte. Dessa forma, a análise de seccionamento de linhas é pontual.

Para definição das linhas seccionadas iniciou-se com a ideia de seccionar todas as linhas classificadas como alta sobreposição apresentadas no RT03. Porém, com o avanço das análises que contaram com a colaboração do Estado de PE e do Consórcio de Transportes Metropolitanos (CTM), cujo conhecimento da realidade local foi preponderante na tomada de decisão, definiu-se que o cenário de seccionamento das linhas concorrentes ao metrô (Cenário C) contemplaria o rearranjo de 12 linhas de ônibus existentes, oito classificadas como sobreposição alta, três como média e uma como origem-destino, apresentadas na Figura 11-5 e na Figura 11-6, e descritas na Tabela 11-10.

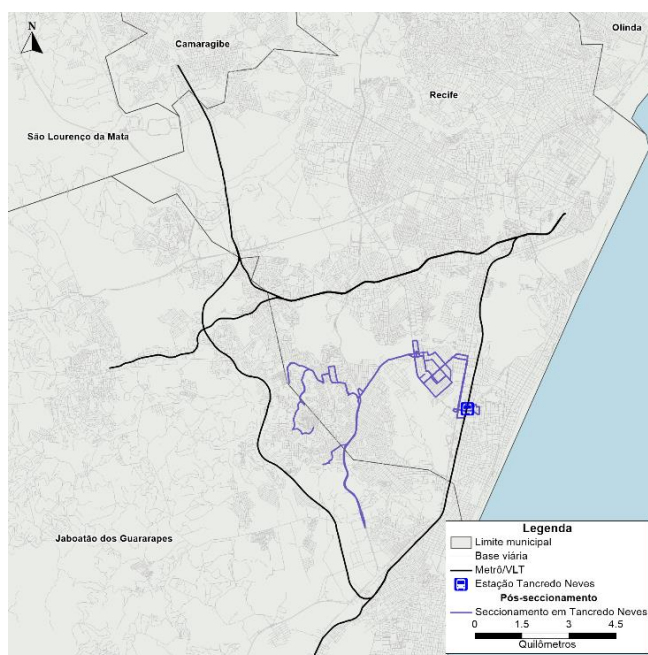
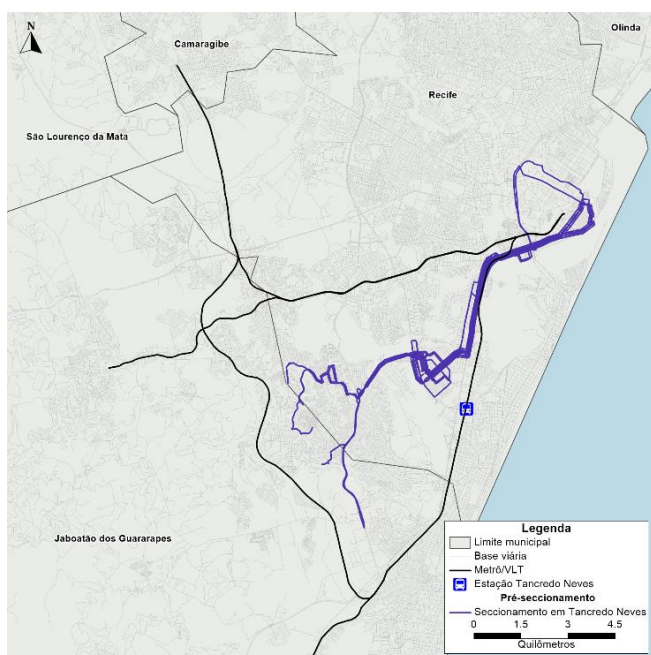
- **Alta sobreposição** – linhas de ônibus com percurso em corredor junto às vias dos trilhos por mais de 3 estações consecutivas;
- **Média sobreposição** – linhas de ônibus com percurso em corredor junto às vias dos trilhos por 2 ou 3 estações consecutivas; e
- **Sobreposição origem-destino** – linhas em trajetos distintos, mas com origem-destino (O/D) coincidentes em estações de metrô ou de VLT.

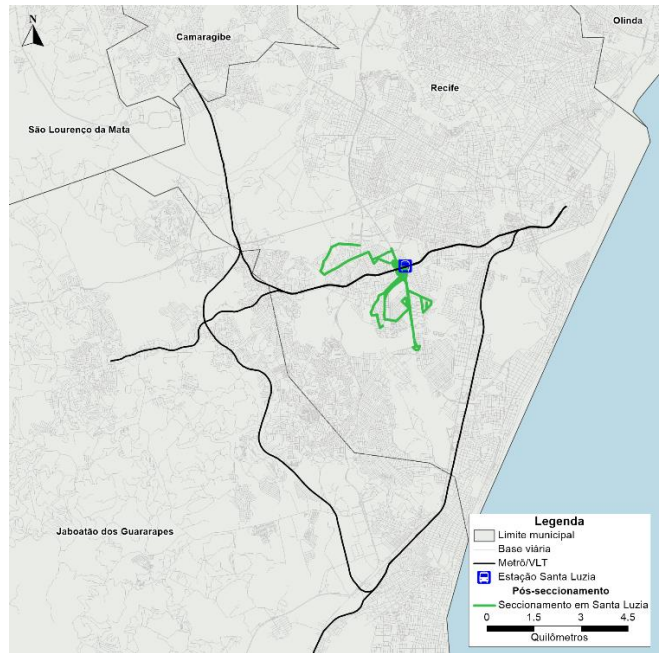
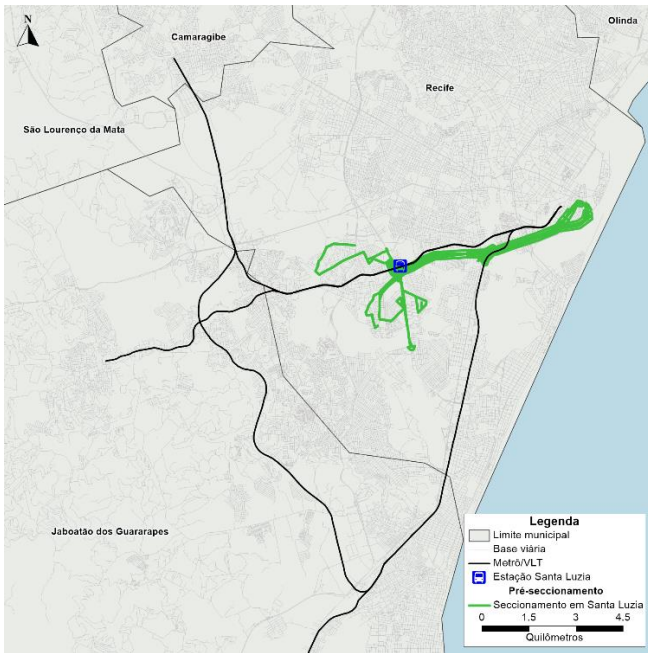
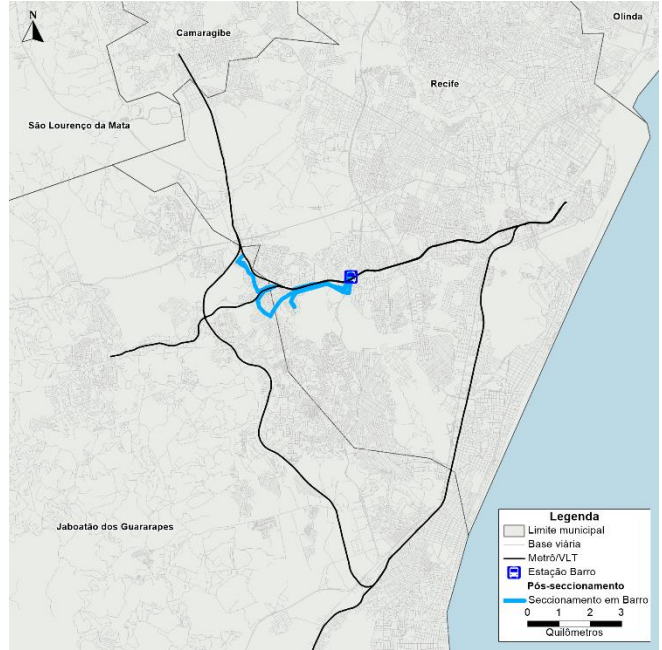
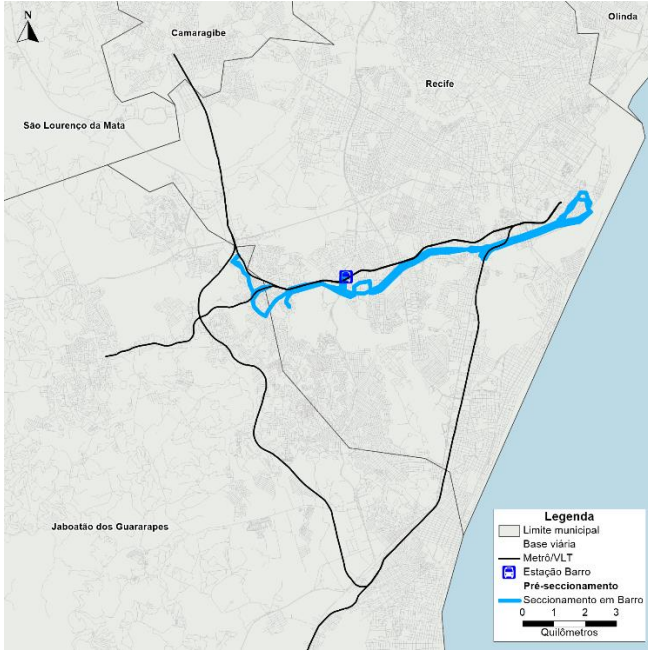
Figura 11-5 Linhas a serem alteradas no Cenário C



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 11-6 Linhas a serem alteradas no Cenário C separadas por estação





Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Tabela 11-10 Lista de linhas a serem alteradas no cenário C

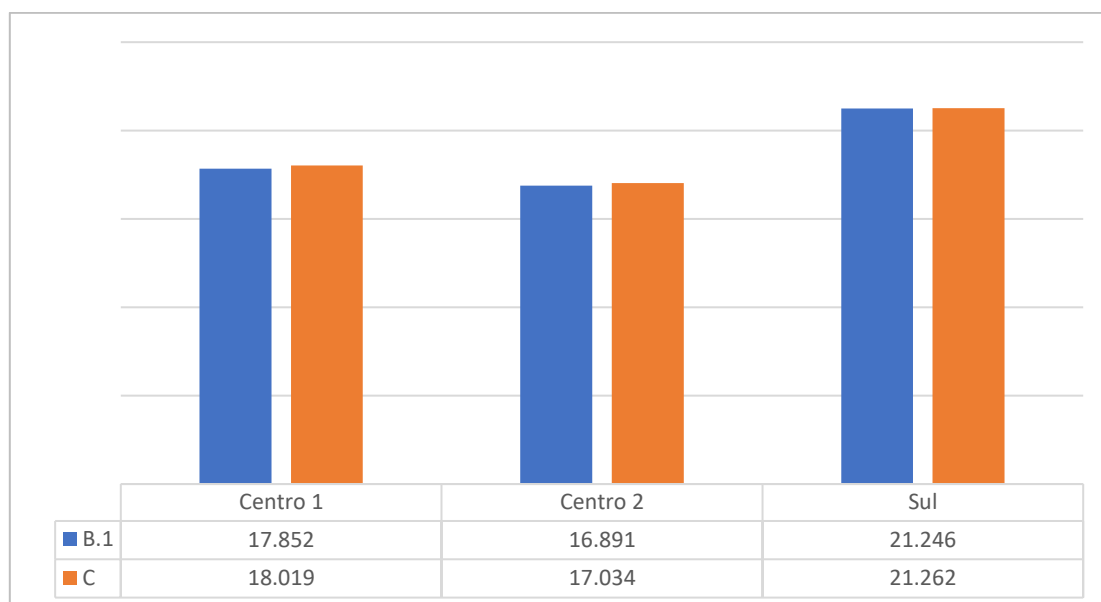
Linha	Descrição	Tipo de Sobreposição	Estação
121	VILA DA SUDENE	Alta	Tancredo Neves
122	VILA DO IPSEP	Alta	Tancredo Neves
211	VILA TAMANDARÉ	Alta	Santa Luzia
212	JARDIM SÃO PAULO (AFOGADOS)	Alta	Santa Luzia
221	VILA CARDEAL E SILVA	Alta	Santa Luzia
222	JARDIM UCHOA	Alta	Santa Luzia
232	CAVALEIRO	Alta	Barro

Linha	Descrição	Tipo de Sobreposição	Estação
242	PACHECO	Alta	Barro
4123	TRÊS CARNEIROS BAIXO (CAIS DE SANTA RITA)	Média	Tancredo Neves
4135	UR-10 (CAIS DE SANTA RITA)	Média	Tancredo Neves
4142	ALTO DOS CARNEIROS (CAIS DE SANTA RITA)	Média	Tancredo Neves
31	SHOPPING CENTER (TERMINAL RES. BOA VIAGEM)	O/D	Excluir linha
Linhas			12

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Após a definição das linhas a serem racionalizadas, foi realizada a simulação do Cenário C, que contempla as alterações das linhas sobre as configurações do Cenário B.1 (que contém os intervalos escolhidos para o Metrô no item 11.2.2, sem eletrificação do VLT).

Figura 11-7 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59) – Metrô



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Verificou-se que o impacto dos seccionamentos na demanda do metrô é quase negligenciável, com acréscimo de 402 embarques (+0,7%) no PM. Este resultado corrobora o entendimento de que o sistema de ônibus atual já apresenta alto grau de complementaridade ao sistema metrô do Recife, o que não justifica os seccionamentos propostos.

11.3 CONHECIMENTOS ASSIMILADOS

A partir das simulações e análises de sensibilidade dos cenários iniciais, foram estabelecidas algumas diretrizes que norteiam as análises subsequentes do processo iterativo com o Estado PE.

- Cenário Base: política tarifária atualizada em função da extinção do Anel B, conforme item 11.1.
- Intervalos do Metrô: provisoriamente, foi definido os intervalos do cenário B1c, porém novas simulações são feitas na fase seguinte durante o processo iterativo com o Estado PE (item 12).

- Eletrificação do VLT: diretriz foi continuar sem a eletrificação do VLT. A análise de sensibilidade apontou um aumento de demanda tímido com a eletrificação (item 11.2.3), não justificado frente aos custos preliminares de implantação (vide RT06 – Estudo Técnico-Operacional, capítulo 5.1).
- Racionalização/seccionamento de linhas no metrô: as análises seguintes não contemplarão o seccionamento de linhas para alimentação das estações das linhas Centro e Sul. O SEI já é um sistema integrado e o seccionamento de linhas do sistema atual resultaria em pouco aumento de demanda no metrô, conforme mostrado no item 11.2.4.

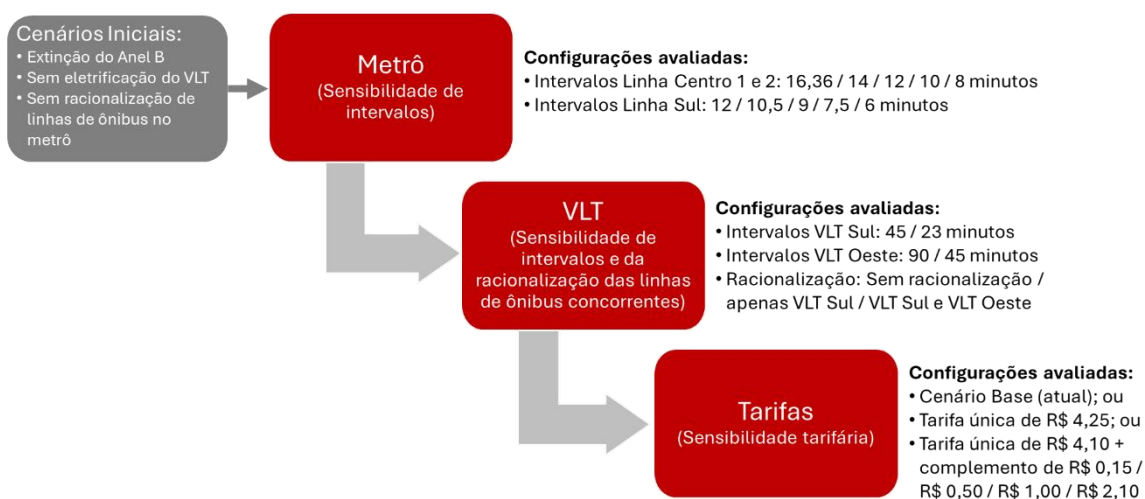
12. PROCESSO ITERATIVO COM ESTADO PE E UNIÃO

Após a análise dos Cenários Iniciais, foi desenvolvido um processo iterativo de simulações, a fim de subsidiar a tomada de decisão da configuração operacional da rede de trilhos do projeto. Trata-se assim da escolha de um Cenário Principal, a ser detalhado nas fases subsequentes do estudo. Esse processo iterativo foi composto por análises e simulações graduais, que antecipam as decisões de maior impacto na rede. Ele possibilitou a decisão, por parte dos entes governamentais, quanto aos parâmetros de intervalos dos trilhos (Metrô e VLT), da rede alimentadora e da política tarifária.

A partir da definição das análises e simulações que se pretendia avaliar, foram realizadas reuniões sucessivas, cada uma centrada em análises específicas, em que foram apresentados os resultados e conclusões por parte do Consórcio e BNDES. Estas reuniões contaram com a participação de representantes do Estado de Pernambuco, do Ministério das Cidades e da Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos (SEMPI). Destacam-se três grupos de análises discutidos durante esse processo decisório, representados na Figura 12-1:

- Sensibilidade dos intervalos operacionais do Metrô;
- Sensibilidade dos intervalos operacionais do VLT e racionalização de linhas sobrepostas;
- Sensibilidade à política tarifária.

Figura 12-1 - Análises graduais do processo iterativo



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRA-CESCON-RHEIN, 2024

12.1 SENSIBILIDADE DE INTERVALOS DO METRÔ

A sensibilidade dos intervalos do metrô tem como objetivo avaliar como a demanda de passageiros do metrô responde às mudanças nos intervalos entre trens desse sistema. O objetivo é subsidiar a decisão quanto aos intervalos de cada uma das linhas do metrô a serem adotados no “Cenário Principal”.

As simulações contemplaram cinco cenários de redução de intervalo do metrô, conforme apresentado na Tabela 12-1. Adicionalmente, para isolar o impacto dos intervalos na demanda, todos os cenários são avaliados sob as mesmas condições a seguir:

- Rede de ônibus: Oferta maio/2023
- Melhoria do fator de imagem do Metrô e VLT (0,95)
- Intervalos do VLT: Oeste – 90 min e Sul – 45 min

- Política tarifária: março/2024
- Ano de análise: 2025
- **Sem** seccionamentos das linhas de ônibus no metrô devido ao baixo impacto, conforme análise dos cenários iniciais (11.2.4.).

Tabela 12-1 Sensibilidade intervalos Metrô – Configuração dos cenários

Cenário	Descrição	Centro 1	Centro 2	Sul
B1a	16 min	16,36 min	16,36 min	12 min
B1b	14 min	14 min	14 min	10,5 min
B1c	12 min	12 min	12 min	9 min
B1d	10 min	10 min	10 min	7,5 min
B1e	8 min	8 min	8 min	6 min

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Na Tabela 12-2 e Figura 12-2, Figura 12-3, Figura 12-4, Figura 12-5 e Figura 12-6 a seguir, são apresentados os resultados da simulação de sensibilidade de intervalos por linha de metrô, em que se pode notar:

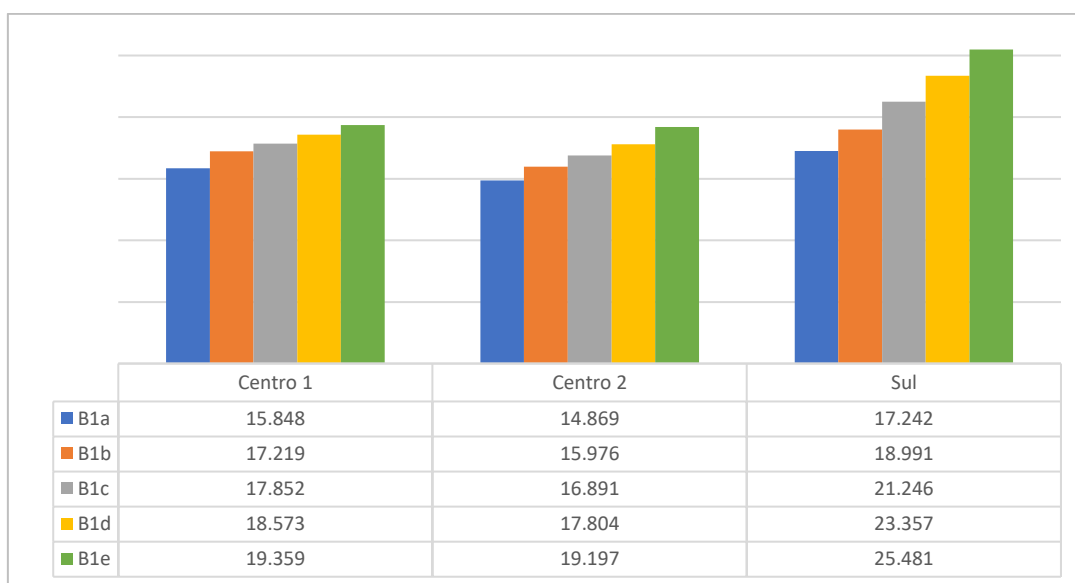
- Aumento da demanda do metrô à medida que os intervalos são reduzidos
- Redução da ocupação à medida que os intervalos são reduzidos

Tabela 12-2 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59)

Linha	B1a (16 min)	B1b (14 min)	B1c (12 min)	B1d (10 min)	B1e (8 min)
Centro 1	15.848	17.219	17.852	18.573	19.359
Centro 2	14.869	15.976	16.891	17.804	19.197
Sul	17.242	18.991	21.246	23.357	25.481
Total	47.959	52.186	55.989	59.734	64.037

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 12-2 Embarques por cenário e por linha (PM, 5h00-7h59)



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 12-3 Carregamento e ocupação (PM, 5h00-7h59) – Metrô Centro 1

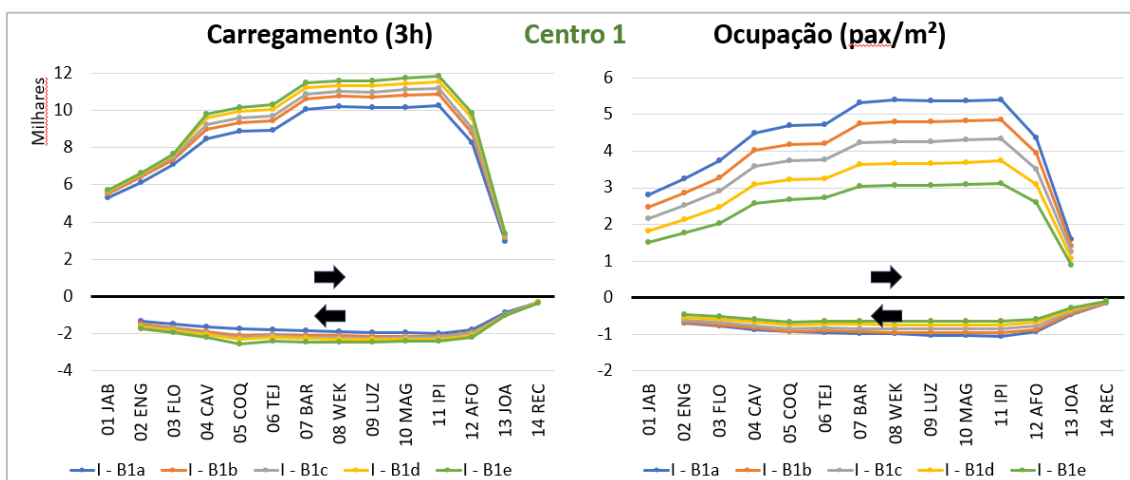


Figura 12-4 Carregamento e ocupação (PM, 5h00-7h59) – Metrô Centro 2

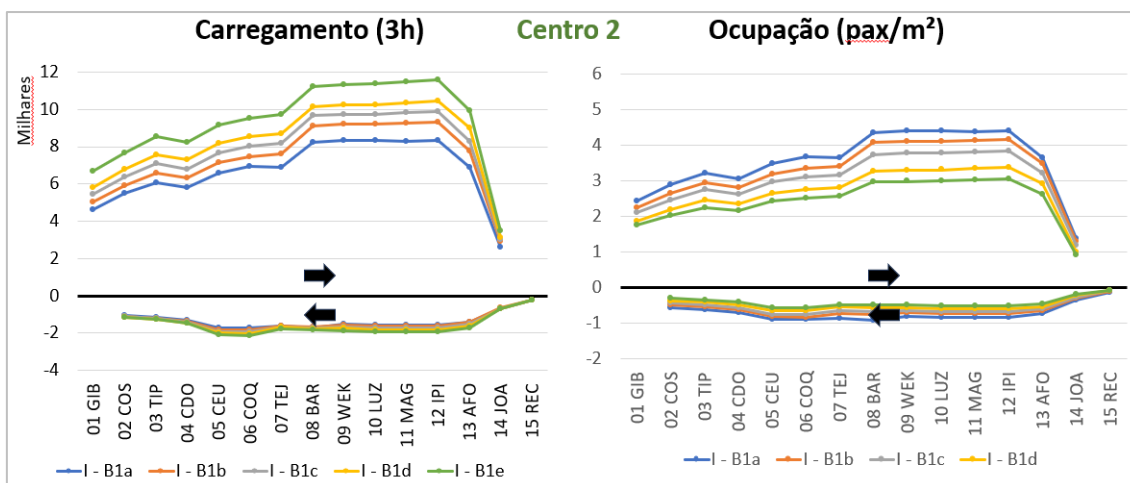


Figura 12-5 Carregamento e ocupação (PM, 5h00-7h59) – Metrô Sul

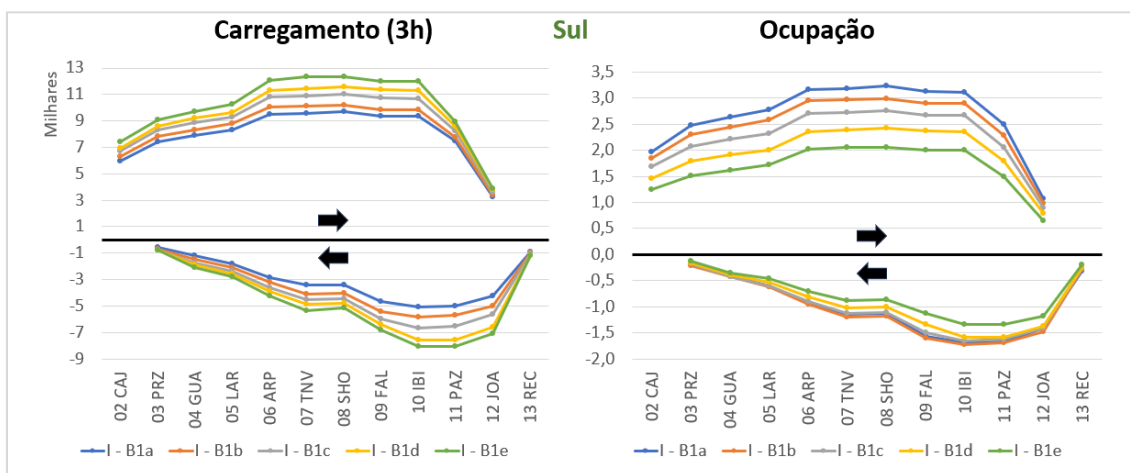
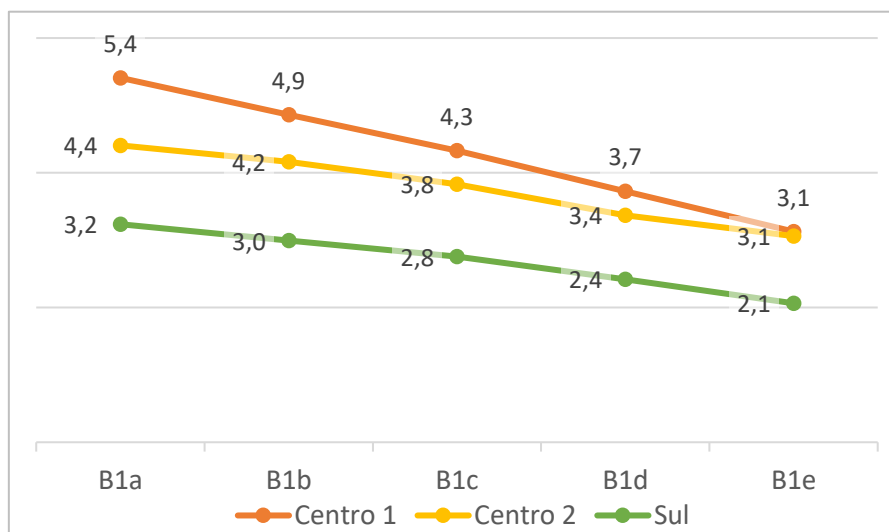


Figura 12-6 Ocupação máxima (PM, 5h00-7h59)



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAS-CESCON-RHEIN, 2024

Como critério de escolha, foram levados em conta o equilíbrio entre as reduções de intervalo analisadas, que geram benefícios aos usuários e atratividade ao sistema, especialmente considerando-se um cenário de concessão do serviço, e os níveis de ocupação e os custos potenciais de CAPEX/OPEX, apresentados no RT06. A configuração escolhida considera um ganho considerável para o usuário, ainda dentro de ocupações em níveis sustentáveis e coerentes com um sistema de alta capacidade.

Assim, as configurações escolhidas pelo Estado de Pernambuco para o Cenário Principal foram uma combinação entre os cenários B1c e B1d, a saber:

- Linhas Centro 1 e Centro 2 (Metrô): Intervalo de **10** minutos
- Linha Sul: Intervalo de **9** minutos

12.2 SENSIBILIDADE DE INTERVALOS DO VLT

A análise de sensibilidade do VLT, descrita na Tabela 12-3, foi feita com objetivo de avaliar a demanda potencial de passageiros do VLT como resposta às mudanças nos intervalos praticados nesse sistema, que podem estar combinadas, ainda, com a racionalização de linhas de ônibus concorrentes ao VLT. Considerando o porte do sistema do metrô, muito superior ao do VLT, foi adotado como intervalo do metrô de entrada das simulações, o valor mais otimista do ponto de vista da demanda, conforme simulado na análise anterior (Centro 1 e Centro 2 – 8 min e Sul – 6 min). Desse modo, avalia-se a demanda do VLT, com menos restrição de capacidade do metrô em relação à situação atual.

As simulações contemplaram cinco cenários de redução de intervalo do VLT, conforme apresentado na Tabela 12-3, que mostra também o cenário de referência de comparação. Adicionalmente, para isolar o impacto das modificações a serem analisadas, todos os cenários são avaliados sob as mesmas condições de rede a seguir, aplicadas ao cenário de referência, aqui denominado M8, que apresenta as mesmas configurações do B1e, da análise do item anterior:

Cenário de referência M8 (B1e):

- Intervalos do Metrô:
 - ✓ C1 = 8 min
 - ✓ C2 = 8 min
 - ✓ S = 6 min
- Melhoria do fator de imagem do Metrô e VLT (0,95)
- Política tarifária: março/2024
- Ano de análise: 2025
- **Sem** seccionamentos das linhas de ônibus no metrô devido ao baixo impacto, conforme análise dos cenários iniciais.

Tabela 12-3 Sensibilidade intervalos VLT – Configuração dos cenários

Cenário	Descrição (mudanças a partir do cenário de referência)	VLT Sul		VLT Oeste	
		Intervalo	Rede	Intervalo	Rede
M8 (B1e)	Cenário de referência (descrição acima)	45 min	Oferta maio/2023	90 min	Oferta maio/2023
VS23	VLT-S: Intervalo de 23 min	23 min	Oferta maio/2023	90 min	Oferta maio/2023
VS23r	VLT-S: Intervalo de 23 min com racionalização	23 min	Racionalização	90 min	Oferta maio/2023
VO45_S45	VLT-O: Intervalo de 45 min	45 min	Oferta maio/2023	45 min	Oferta maio/2023
VO45_S23r	VLT-O: Intervalo de 45 min VLT-S: Intervalo de 23 min com racionalização	23 min	Racionalização	45 min	Oferta maio/2023
VO45r_S23r	VLT-O: Intervalo de 45 min com racionalização e nova estação VLT-S: Intervalo de 23 min com racionalização	23 min	Racionalização	45 min	Racionalização

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Os cenários com nome terminados em “r” são aqueles que contemplam a racionalização de linhas de ônibus concorrentes ao VLT, aplicadas da seguinte maneira:

- VS23r e VO45_S23r: racionalização de linhas de ônibus apenas do VLT-Sul
- VO45r_S23r: racionalização de linhas de ônibus do VLT-Sul e VLT-Oeste.

12.2.1 Racionalização das linhas de ônibus concorrentes

A definição das linhas a serem racionalizadas envolveu a análise da concorrência pelo Consórcio e avaliação do Estado PE e do CTM, cujo conhecimento da realidade local foi preponderante na tomada de decisão sobre quais linhas deveriam ser ajustadas.

Em relação ao VLT Oeste, o Estado PE apresentou proposta de extinção e seccionamentos de linhas de ônibus acompanhados da implantação de uma nova Estação do VLT para que essas intervenções não provocassem percurso negativo para o usuário. Assim, a criação dessa nova Estação seria motivada e vinculada ao seccionamento de linhas, uma vez que o local não apresenta adensamento populacional que signifique demanda lindeira.

As alterações na rede consideradas e os mapas das linhas concorrentes ao VLT afetadas por extinção ou seccionamento estão representados na Figura 12-7 e na Figura 12-8:

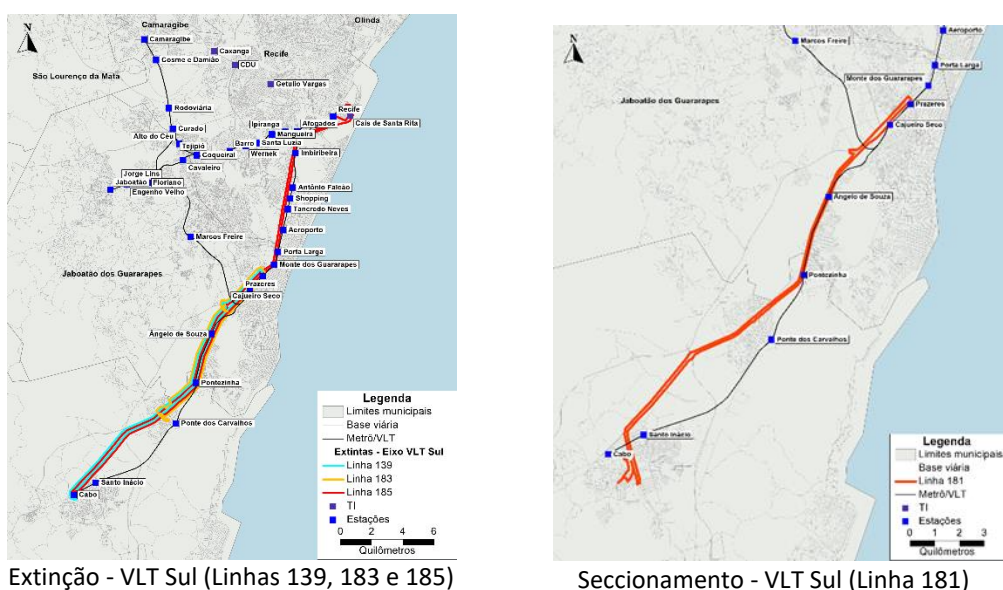
VLT Sul:

- Linhas 139, 183 e 185: extinção devido à concorrência com o VLT Sul;
- Linha 181: seccionamento na Estação Pontezinha, eliminando assim o trecho concorrente ao VLT Sul.

VLT Oeste:

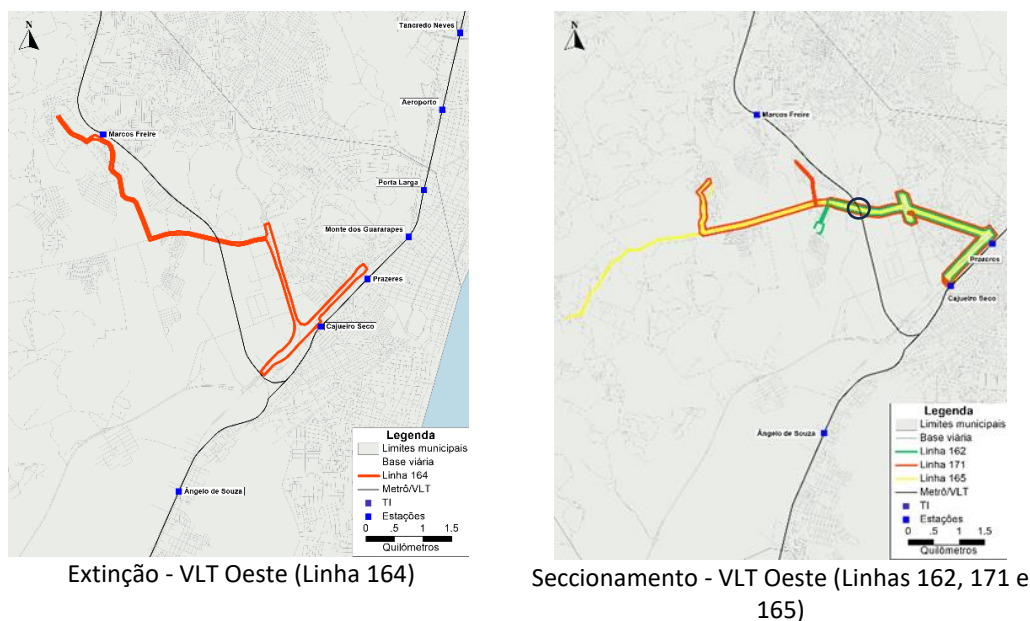
- Linha 164: extinção em função da concorrência com o VLT Oeste entre a Estação Marcos Freire e Cajueiro Seco;
- Linhas 162, 171 e 165: seccionamento em Nova Estação a ser criada no cruzamento das linhas com o VLT Oeste, de modo a evitar o percurso negativo até a Estação mais próxima (Marcos Freire);
- Criação da Nova Estação (destacada por um círculo no mapa da direita na Figura 12-8).

Figura 12-7 – VLT Sul – Racionalização



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRA-CESCON-RHEIN, 2024

Figura 12-8 – VLT Oeste – Racionalização

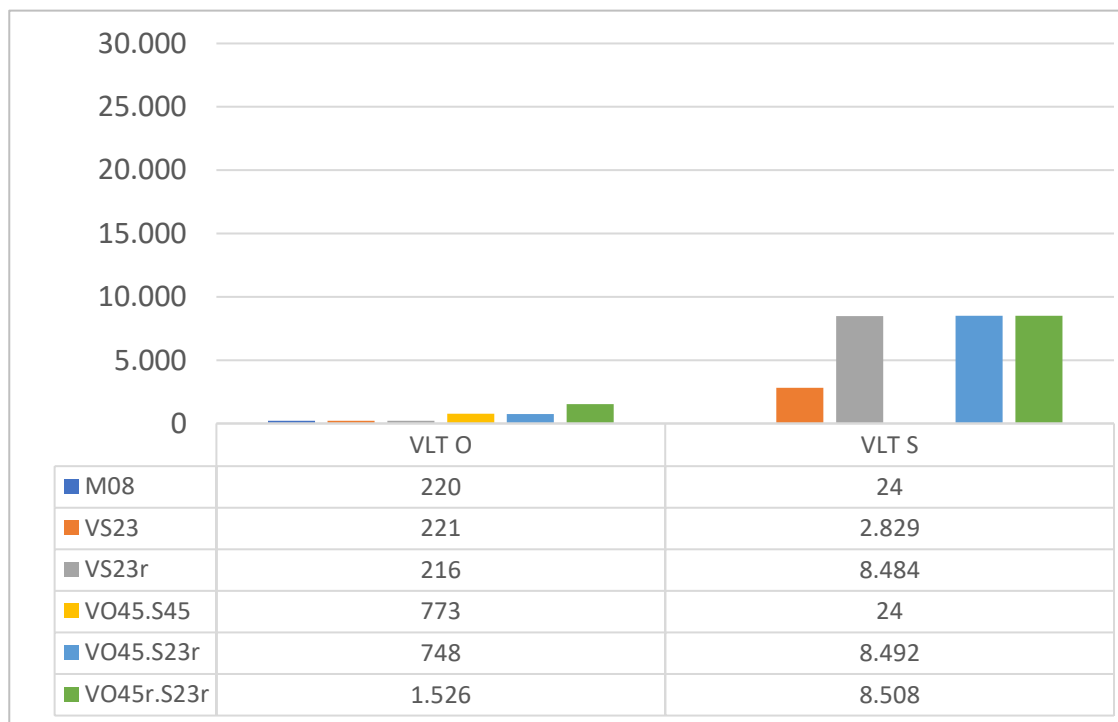


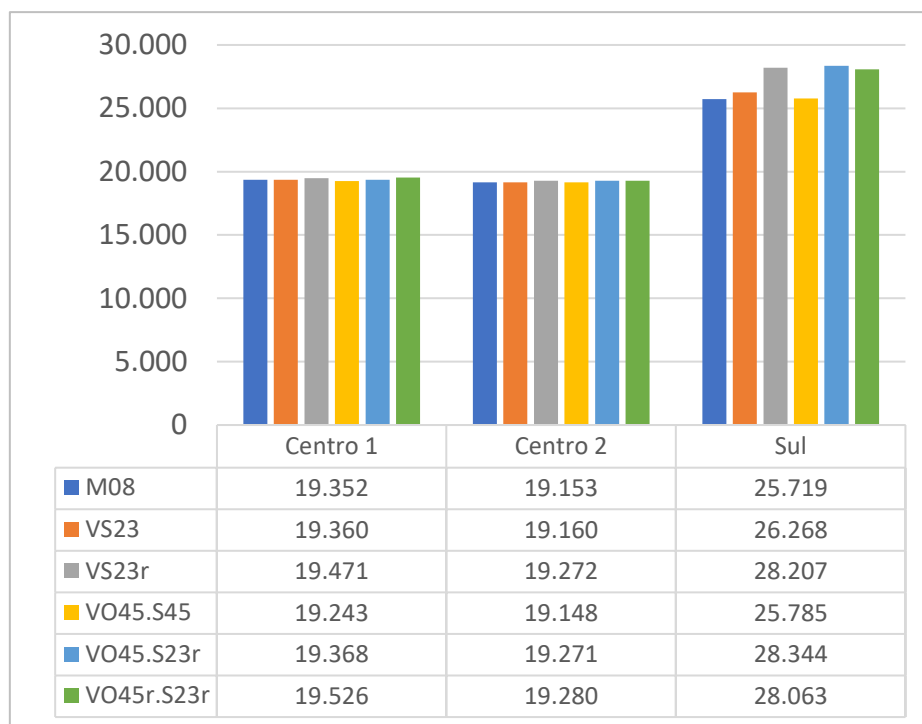
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir (Figura 12-9, Figura 12-10, Figura 12-11 e Figura 12-12), com análises gerais e específicas por linha de VLT.

12.2.2 Resultados Gerais

Figura 12-9 – Total de embarques por linha (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT





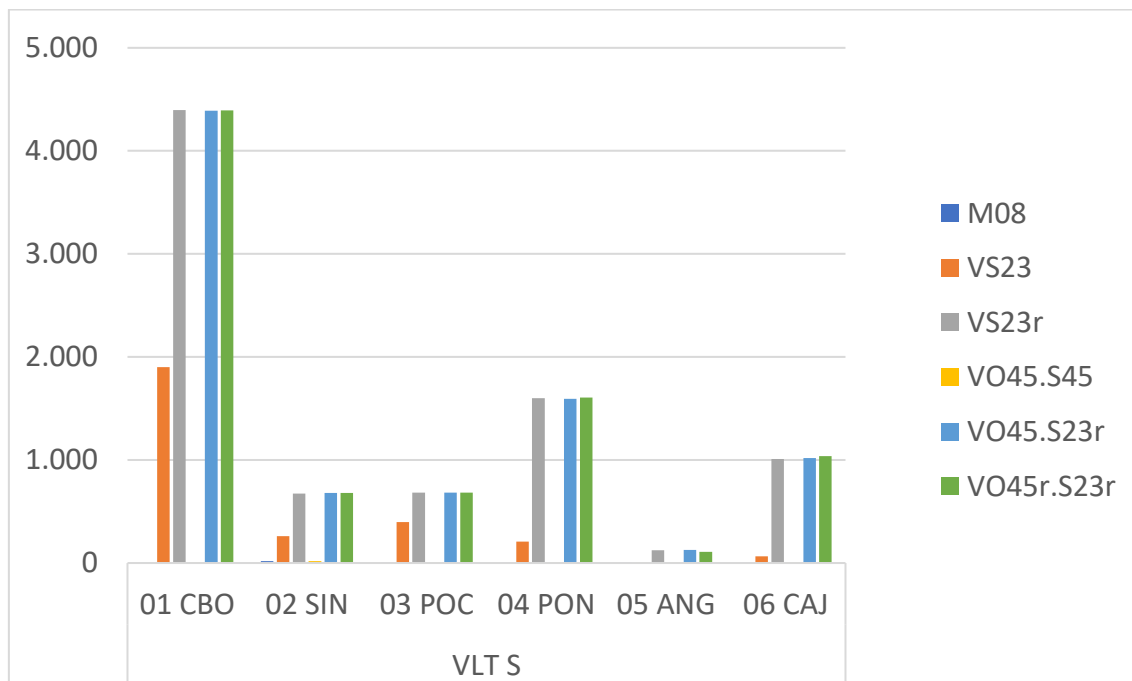
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAS-CESTRON-RHEIN, 2024

A partir da análise dos gráficos de demanda do VLT e do Metrô, destacam-se as seguintes conclusões:

- **Relação entre modos:** variações de intervalo do VLT tem pouco impacto na demanda do Metrô, mas quando a rede do VLT Sul é racionalizada, aumenta em aproximadamente 10% a demanda da Linha Sul do Metrô;
- **Relação entre as linhas VLT:** alterações no VLT Sul tem baixo impacto no VLT Oeste e vice-versa;
- **Resultados gerais:** a demanda é atraída de acordo com os estímulos de redução de intervalo e racionalização dos ônibus.

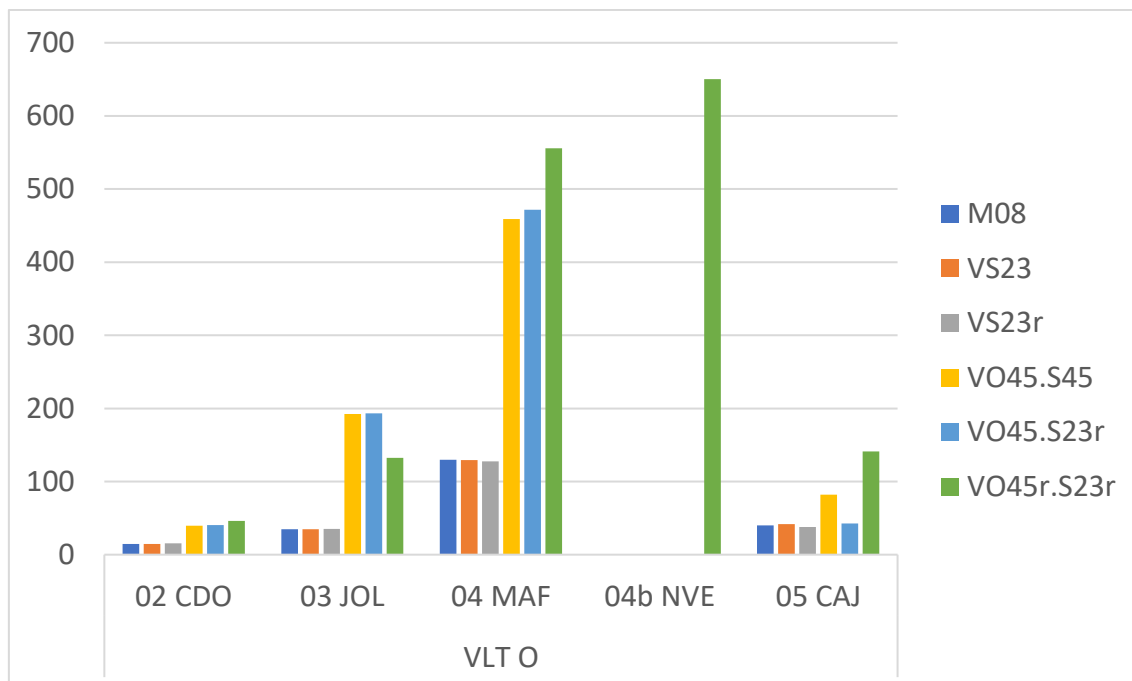
12.2.3 Resultados por linha de VLT

Figura 12-10 – Total de embarques por estação do VLT Sul (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRRA-CESCON-RHEIN, 2024

Figura 12-11 – Total de embarques por estação do VLT Oeste (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT



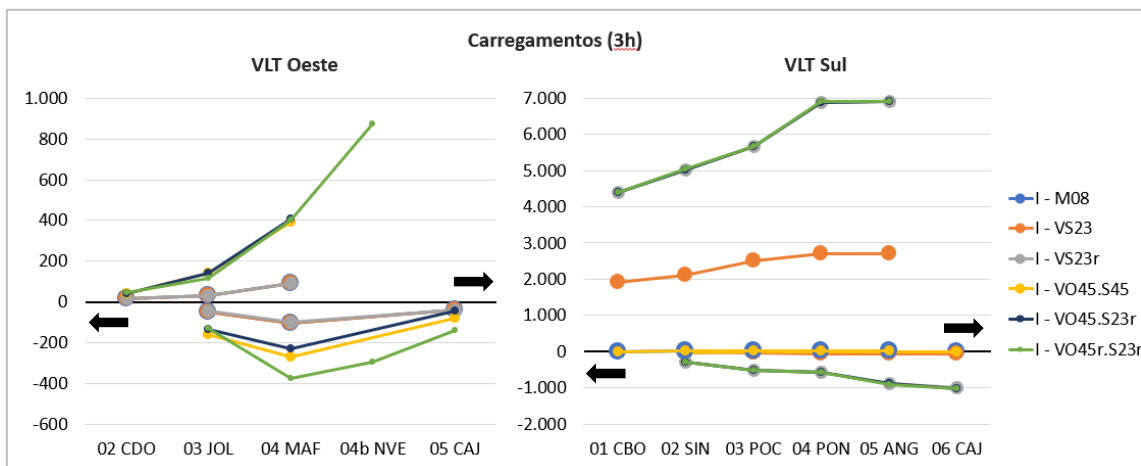
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRRA-CESCON-RHEIN, 2024

A partir da análise dos gráficos de demanda do VLT por linha e estação, destacam-se as seguintes conclusões:

- Com as racionalizações as linhas de ônibus são extintas ou seccionadas, assim, para completar a viagem o usuário é obrigado a realizar a integração com o VLT;

- **VLT Sul:** Com redução de intervalo (23min), ocorre aumento de demanda de cerca de 3.000 embarques nessa Linha - VS23 (laranja). Já quando essa redução de intervalo é combinada com a racionalização de linhas de ônibus, o aumento de demanda é mais significativo (cerca de 8.500 embarques) - VS23r (cinza);
- **VLT Oeste:** Criação de nova Estação com racionalização de rede de ônibus gera aumento de embarques nessa estação (NVE).

Figura 12-12 – Perfil de carregamento por linha e sentido (PM, 5h00-7h59) – Intervenção no VLT



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACECON-RHEIN, 2024

Após as análises dos resultados, os representantes do Estado PE decidiram pela seguinte configuração do VLT para o Cenário Principal:

- Linha Sul = 23 min
- Linha Oeste = 45 min
- Sem racionalização de linhas de ônibus
- Sem implantação da Nova Estação

Como critério de escolha, verifica-se o equilíbrio entre a perspectiva de aumento da demanda versus os investimentos potenciais necessários (RT06). Portanto, optou-se pela redução de intervalos do VLT atualmente praticados, especialmente considerando-se o cenário de concessão do sistema, inicialmente não aplicando a racionalização dos serviços. No entanto, posteriormente, ao longo do período de Concessão, o Estado PE terá a flexibilidade de racionalizar as linhas de ônibus, com foco na linha do VLT Sul, que tem maior potencial de captação de passageiros, sobre um sistema já requalificado, com intervalos inferiores aos atualmente praticados e regulares.

A partir dessa definição da configuração de oferta dos trilhos (Metrô e VLT), é realizada ainda a análise de sensibilidade de tarifa apresentada no próximo item.

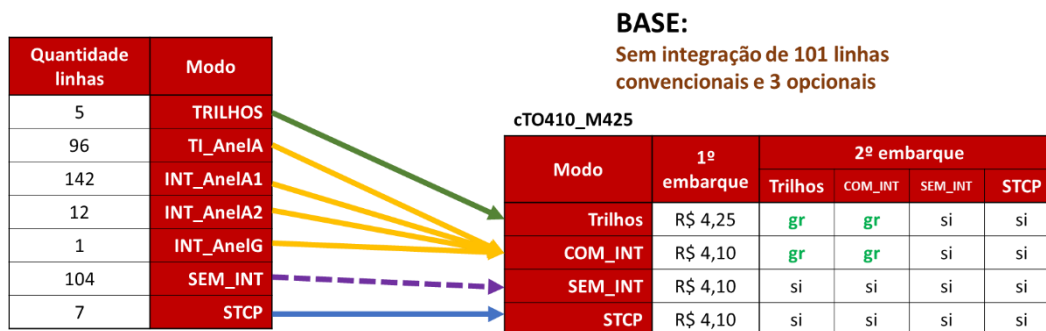
12.3 SENSIBILIDADE TARIFÁRIA

Essa etapa do processo iterativo de simulações para tomada de decisão é referente à análise de sensibilidade da tarifa, atributo que impacta diretamente nas escolhas de caminhos pelos usuários no sistema de transportes. Considerando que, atualmente, a tarifa dos trilhos é de R\$ 4,25, mais cara do que a tarifa dos ônibus de R\$ 4,10 (Anel A), é de interesse que seja analisado o cenário de uma tarifa única igualando os valores dos sistemas. Outra análise

relevante é a aplicação de complementos tarifários para os usuários que realizem integrações Ônibus-Trilhos e Trilhos-Ônibus.

A Figura 12-13 a seguir representa as regras de integração entre os modos do cenário base de comparação.

Figura 12-13 – Regras de integração – Cenário Tarifário Base



CTO410_M425 = cenário tarifário atual (R\$ 4,10 – tarifa do ônibus e R\$ 4,25 – tarifa do Metrô/VLT)

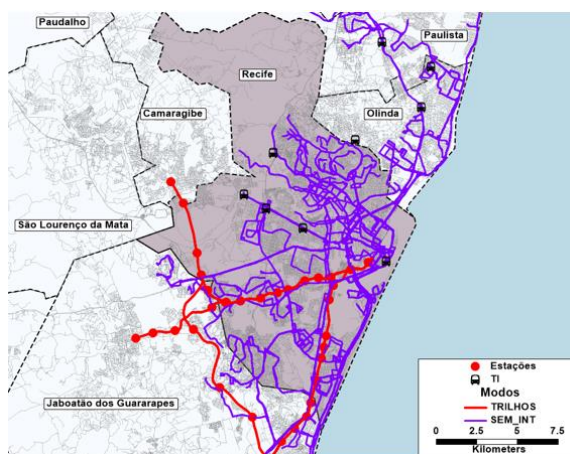
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Onde:

- gr: integração gratuita;
- si: sem integração, segundo embarque paga tarifa cheia.

O modo SEM_INT (sem integração) inclui 101 linhas convencionais (com a tarifa padrão de R\$ 4,10) e 3 linhas opcionais (com tarifas de R\$ 7,70; R\$ 13,70 e R\$ 20,05). Como o nome indica, estas linhas não permitem integração, nem entre si, nem com outras linhas do sistema (incluindo metroferroviárias). A Figura 12-14 mostra a espacialização das linhas de modo SEM_INT.

Figura 12-14 – Linhas de ônibus sem integração com trilhos – Cenário Tarifário Base

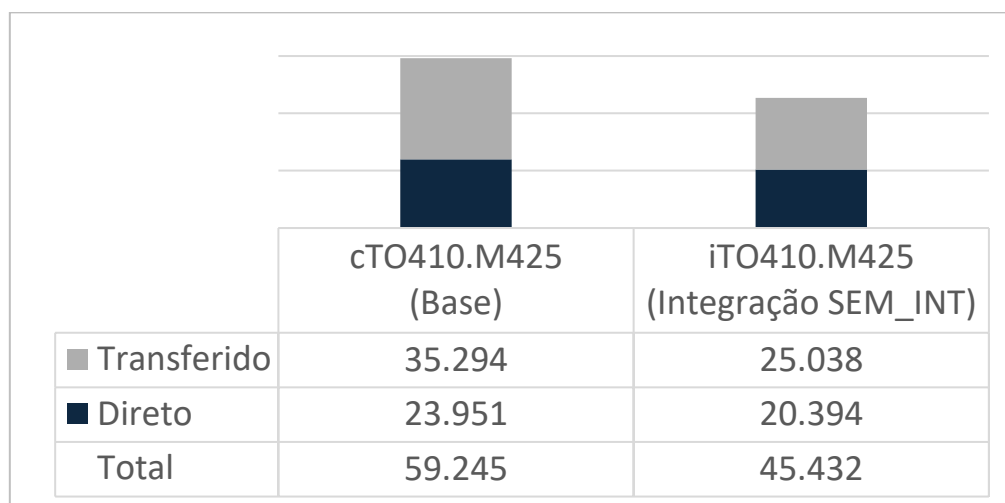


Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

A possibilidade de estender a integração tarifária às linhas do modo SEM_INT – que passariam a ter as regras do modo COM_INT – foi simulada em um cenário intermediário. Os resultados agregados são apresentados na Figura 12-15. Nota-se que essa mudança teria impacto negativo na demanda dos trilhos (-23%), especificamente do Metrô, já que parte das linhas atualmente sem integração passaria a ser concorrente às linhas metroferroviárias. Isso acontece já que a integração tarifária também se aplicaria a viagens ônibus-ônibus, conforme política tarifária

vigente nas linhas de modo COM_INT. Assim, optou-se, em conjunto com o Estado de PE, por prosseguir com as simulações sem considerar a integração das linhas de modo SEM_INT.

Figura 12-15 – Total de embarques nos trilhos (PM, 5h00-7h59) – Integração das linhas SEM_INT



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

As simulações contemplaram cinco cenários tarifários além do Cenário Tarifário Base, conforme apresentado na Tabela 12-5. Ressalta-se que as configurações de oferta, nessa etapa, já foram definidas, conforme registrado nas seções 12.1 e 12.2 acima, e estão resumidas na Tabela 12-4:

Tabela 12-4 – Recapitulativo das configurações operacionais adotadas

Metrô	C1 = 10 min C2 = 10 min S = 9 min fator de imagem = 0,95
VLT	S = 23 min O = 45 min Sem eletrificação fator de imagem = 0,95
Rede ônibus	Oferta maio/2023
Horizonte	2025

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

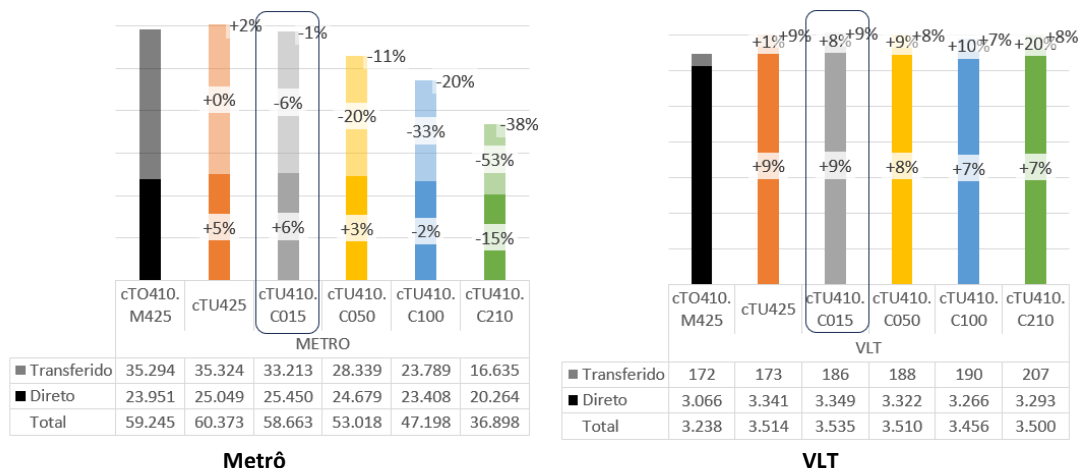
Tabela 12-5 Sensibilidade tarifária – Configuração dos cenários

Cenário	Descrição
cTO410.M425	Base
cTU425	Tarifa única R\$ 4,25
cTU410.C015	Tarifa única R\$ 4,10 com complemento de R\$ 0,15
cTU410.C050	Tarifa única R\$ 4,10 com complemento de R\$ 0,50
cTU410.C100	Tarifa única R\$ 4,10 com complemento de R\$ 1,00
cTU410.C210	Tarifa única R\$ 4,10 com complemento de R\$ 2,10

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Em azul, na tabela acima, destaca-se a configuração escolhida. Os critérios que fundamentaram a escolha são descritos ao final dessa seção. Os resultados estão apresentados nos gráficos da Figura 12-16 a seguir, com destaque ao cenário escolhido.

Figura 12-16 – Variação nos embarques do Metrô e VLT (PM, 5h00-7h59) – Cenários tarifários



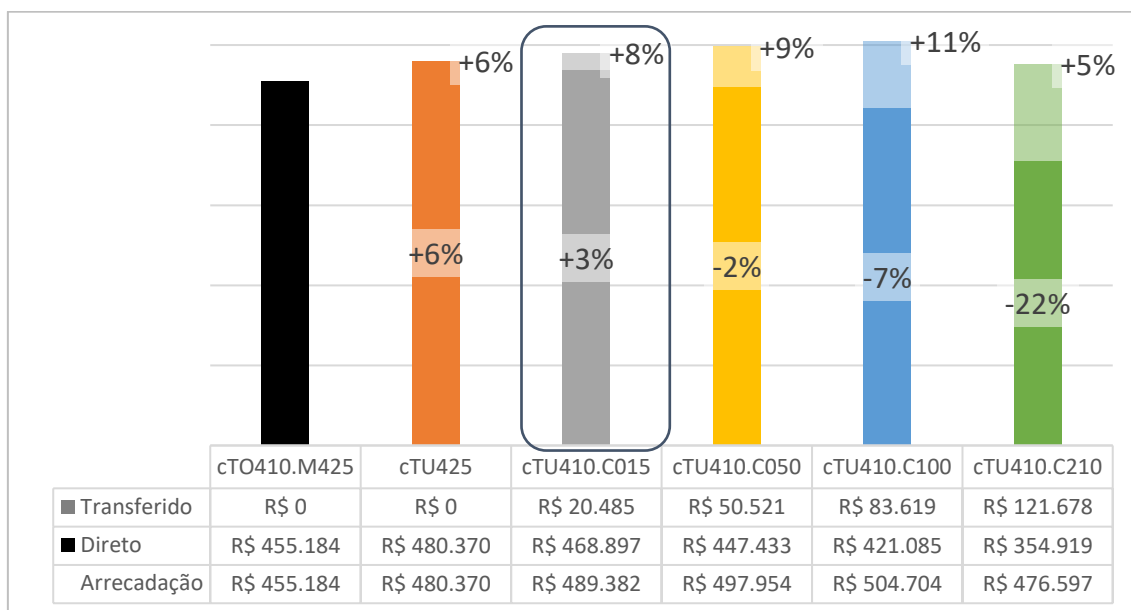
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Em complemento à avaliação da demanda, foi feita a análise da arrecadação teórica preliminar, que corresponde à situação hipotética de todos os passageiros pagarem tarifa cheia, ou seja, sem os descontos de gratuidades ou benefícios relacionados ao usuário (ex: idosos, estudantes e outros). A arrecadação teórica preliminar considera, no entanto, as regras de integração tarifária e é calculada pela fórmula a seguir:

$$Arrec\ Teórica\ Preliminar = PaxDir * TarCheia + PaxTrans * Compl$$

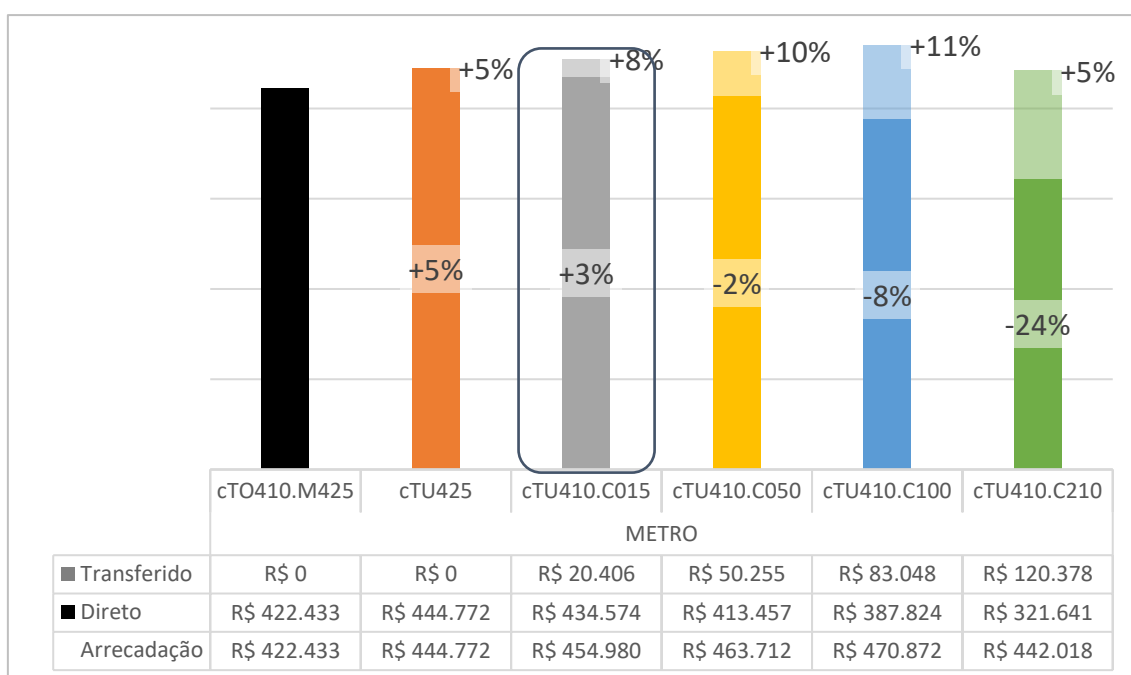
As arrecadações teóricas preliminares para o dia útil estão apresentadas por cenário na Figura 12-17, Figura 12-18 e Figura 12-9 a seguir:

Figura 12-17 – Arrecadação Teórica Preliminar por Cenário (Dia Útil) – Trilhos



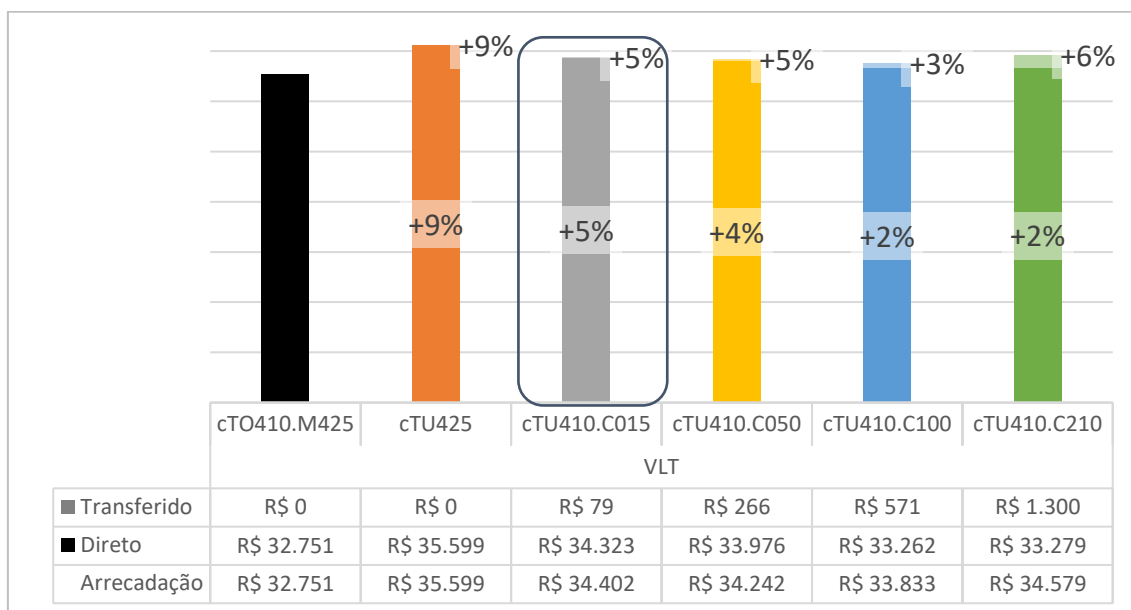
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 12-18 – Arrecadação Teórica Preliminar por Cenário (Dia Útil) – Metrô



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 12-19 – Arrecadação Teórica Preliminar por Cenário (Dia Útil) – VLT



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAS-CESTRON-RHEIN, 2024

Como critério de decisão da política tarifária a ser adotada, considera-se um equilíbrio entre a arrecadação e o impacto no desembolso dos usuários. Essa decisão teve como premissas:

- Evitar aumento de tarifa pública antes da melhoria do serviço;
- Consolidar uma tarifa única entre os modos ônibus e trilhos ($O = T$);
- Instituir o conceito de pagamento de um complemento tarifário no 2º modo da viagem nas integrações ônibus-trilhos e trilhos-ônibus;
- Aumentar a arrecadação com manutenção de tarifa unitária.

Assim, a configuração tarifária escolhida foi a referente ao cenário de tarifa única R\$ 4,10 com complemento de R\$ 0,15.

13.CENÁRIO PRINCIPAL (2025 – 2060)

O Cenário Principal é referente à escolha da configuração do sistema de trilhos, realizada pelo Estado PE, resultante do processo iterativo de análises e simulações apresentado no capítulo anterior. Esse cenário é detalhado para todos os anos horizontes definidos no Estudo (2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050, 2055 e 2060) e seus resultados serão base para o desenvolvimento do Relatório Técnico RT06. A configuração desse cenário em comparação com o Base está resumida na Tabela 13-1 a seguir.

Tabela 13-1 Configurações operacionais dos cenários Base e Escolhido

Cenário	Operação dos trilhos		Rede ônibus	Política tarifária
	Metro	VLT		
Base	C1 = 16 min C2 = 16 min S = 12 min fator = 1,00	S = 45 min O = 90 min fator = 1,00	Oferta maio/2023	Atualização março 2024
Cenário Principal (escolhido) MC10_S09_VS23_O45	C1 = 10 min C2 = 10 min S = 9 min fator = 0,95	S = 23 min O = 45 min fator = 0,95	Oferta maio/2023	Tarifa Única R\$ 4,10 + Complemento R\$ 0,15

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRAS-CESCON-RHEIN, 2024

Uma análise quanto à migração modal e os resultados das simulações do Cenário Principal estão apresentados nos próximos itens.

13.1 IMPACTOS DA MIGRAÇÃO MODAL

Com o objetivo de estimar o aumento de demanda de transporte coletivo advinda do transporte individual, em razão das melhorias do transporte coletivo, adotou-se um modelo de migração modal pela aplicação de um modelo de escolha discreta pré-determinado.

Como expressado, a migração modal foi analisada em virtude de melhorias de oferta e da interconectividade entre redes de ônibus e metrô, a partir do ano 2025. Dessa forma, os totais das matrizes do cenário em avaliação distinguem-se do Base em função da atração de cada intervenção proposta, que gera a migração modal. Desse modo, o cenário Base não causa migração modal.

Cabe ressaltar que a comparação de cenários do processo decisório apresentada no capítulo anterior foi realizada em um único horizonte (2025) e não considera a migração modal, a fim de manter constante a demanda para permitir sua análise. A aplicação da migração é feita posteriormente sobre o Cenário Principal (escolhido).

A diferenciação dos volumes de usuários comparando o cenário Base e o Principal resultou em migração pouco significativa. Como a rede de ônibus é mais abrangente, ou seja, atende a uma área mais relevante da região metropolitana, a requalificação e as melhorias operacionais exclusivamente do sistema metroferroviário não foram suficientes para aumentar significativamente a atratividade do transporte coletivo.

A Tabela 13-2 apresenta os totais das matrizes (para 2025) e a variação percentual de migração modal para Cenário Principal em comparação ao Base.

Tabela 13-2 Migração modal por cenário (PM, 5h00-7h59)

Cenário	Matriz 2025	Variação
Base	222.317	-
Principal	222.581	0,12%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

13.2 FATORES DE EXPANSÃO

O modelo de alocação construído permite uma estimação precisa da demanda do sistema de trilhos no período de pico da manhã (5h às 7h59), em coerência com a matriz origem-destino aplicada na alocação dos cenários. Para subsidiar as iterações com os agentes de interesse, contudo, são necessárias estimativas de demanda em períodos mais agregados, notadamente no dia útil e no ano.

Neste contexto, são calculados fatores para expansão da demanda de maneira progressiva: do período de pico da manhã para o dia útil, do dia útil para o mês, e do mês para o ano. Esta abordagem permite considerar os níveis de desagregação dos dados observados em cada escala temporal, agregando precisão aos fatores obtidos.

13.2.1 Dia útil e mês

A expansão do período de pico da manhã (PM) ao dia útil (DU) é feita por linha, estação e tipo de embarque. Compara-se a demanda registrada no PM com a demanda total do dia útil de referência (09/05/2023), tendo como referência o relatório SBE utilizado para a construção da matriz e calibração do modelo de demanda.

Houve estações em que o fator calculado apresentou distorção excessiva quanto aos embarques transferidos, causada notadamente pela baixa demanda observada no período de pico da manhã em relação ao total do dia útil. Nestes casos, para as linhas Centro e Sul, a expansão foi realizada pelo comportamento médio da linha em questão. No caso do VLT, com exceção da estação Cajueiro Seco, foi adotado para os embarques transferidos o mesmo fator de expansão dos embarques diretos.

Um processo similar é adotado para a expansão do dia 9 para o mês de maio, novamente com base no relatório SBE. Para as estações cujo fator DU/PM adotado para os embarques transferidos não foi aquele do cálculo direto, adotou-se o mesmo fator Mês/DU dos embarques diretos. Para duas estações do VLT (Cajueiro Seco e Curado), o fator adotado em ambos os tipos de embarque foi calculado a partir da média da linha.

A Tabela 13-3 abaixo apresenta os fatores obtidos ao final deste processo.

Tabela 13-3 Fatores de expansão do período de pico da manhã (PM) para o dia útil

Linha ou sublinha	Estação	Fator DU/PM dos embarques		Fator Mês/DU dos embarques	
		Diretos	Transferidos	Diretos	Transferidos
Centro 1	Jaboatão	2,18	2,00	26,03	25,20
	Engenho Velho	1,50	1,72	25,35	25,35
	Florianópolis	1,47	1,72	25,88	25,88
	Cavaleiro	2,98	1,45	26,94	25,14
	Coqueiral	2,14	2,81	26,51	26,51
	Tejipió	3,81	1,79	25,78	26,32
	Barro	2,09	3,60	25,15	25,15

Linha ou sublinha	Estação	Fator DU/PM dos embarques		Fator Mês/DU dos embarques	
		Diretos	Transferidos	Diretos	Transferidos
	Werneke	3,38	1,68	25,53	27,44
	Santa Luzia	4,39	3,10	25,62	24,22
	Mangueira	3,00	2,81	26,34	26,34
	Ipiranga	3,77	2,81	26,06	26,06
	Afogados	8,05	4,66	26,56	24,73
	Joana Bezerra	4,42	5,42	26,13	24,45
	Recife	13,75	19,43	25,06	22,92
Centro 2	Camaragibe	2,26	2,45	27,33	25,81
	Cosme e Damião	1,66	4,24	26,31	24,53
	Rodoviária	3,45	3,49	27,63	25,40
	Curado	9,94	3,39	24,98	24,98
	Alto do Céu	1,83	3,39	26,40	26,40
Sul	Cajueiro Seco	2,14	2,40	25,27	25,07
	Prazeres	3,12	1,09	25,38	24,42
	Monte dos Guararapes	3,23	2,30	25,30	25,30
	Porta Larga	5,16	2,30	24,39	24,39
	Aeroporto	5,67	3,98	24,97	24,93
	Tancredo Neves	3,58	64,62	25,96	24,82
	Shopping	22,04	2,30	24,48	24,48
	Antônio Falcão	8,13	2,30	24,63	24,63
	Imbiribeira	4,63	2,30	24,69	24,69
	Largo da Paz	3,40	1,74	25,18	24,50
VLT Sul	Cabo	2,95	2,95	22,63	22,63
	Santo Inácio	1,38	1,38	20,91	20,91
	Ponte dos Carvalhos	1,88	1,88	17,55	17,55
	Pontezinha	1,50	1,50	21,19	21,19
	Ângelo de Souza	1,70	1,70	18,83	18,83
	Cajueiro Seco	2,14	2,40	20,14	20,14
VLT Oeste	Curado	9,94	9,94	19,92	19,92
	Jorge Lins	1,94	1,94	19,97	19,97
	Marcos Freire	1,94	1,94	19,87	19,87
	Cajueiro Seco	2,14	2,40	20,14	20,14

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

13.2.2 Ano

A expansão do mês ao ano se baseia no relatório de embarques produzido pela CBTU. É feita uma única expansão para o sistema, tendo por referência o mês de maio, conforme referencial da modelagem. Considerando que a movimentação do ano de 2023 ainda não havia sido completamente disponibilizada, foi adotado como referência o ano de 2022. Ao final deste processo, obteve-se o seguinte fator:

$$f_{\frac{\text{Ano}}{\text{Mês}}} = 12,13$$

Aferiu-se que a expansão calculada em 2022 não diferiu significativamente da média entre os anos de 2010 e 2022 (12,25). Confirma-se, assim, a representatividade deste ano apesar dos possíveis impactos ligados ao período final da pandemia de Covid-19.

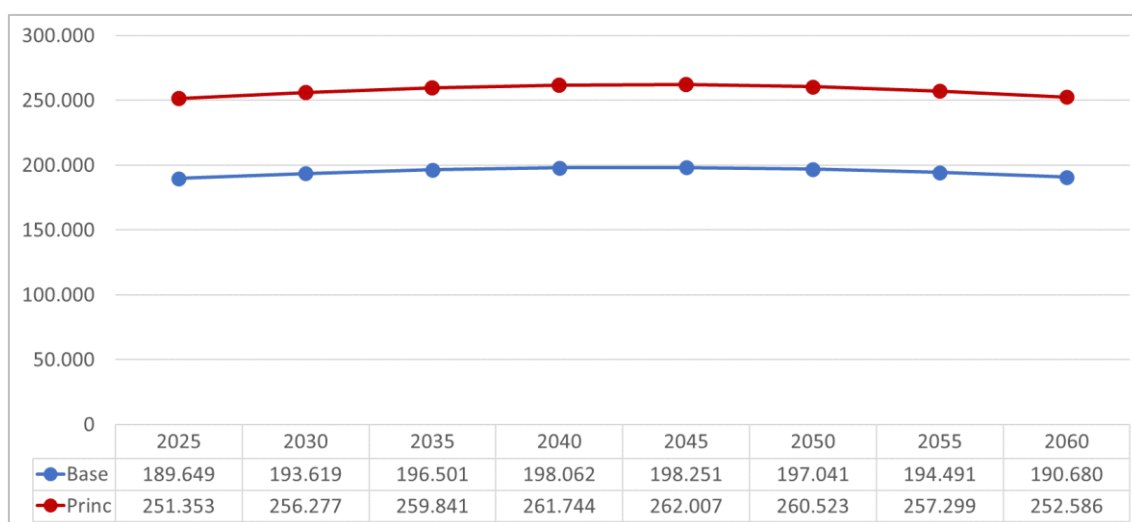
13.3 RESULTADOS CENÁRIO PRINCIPAL X CENÁRIO BASE

É importante destacar que, para obter os resultados no dia útil e ano, foram aplicados fatores de expansão conforme descrito na seção 13.2. A expansão foi realizada por linha, estação e tipo de embarque (direto ou transferido), utilizando a demanda no pico da manhã do dia útil de referência (09/05/2023) para definir o fator DU/PM, e, conseqüentemente, os fatores Mês/DU e Ano/Mês.

A planilha Excel “**CBTU_PE_SaidasRT05.xlsx**”, anexa a este relatório, contempla o consolidado dos resultados de ambos os cenários, Principal e Base. Os itens a seguir apresentam os principais indicadores deste consolidado.

13.3.1 Evolução da demanda total (Metrô e VLT) – anos horizontes (Dia Útil)

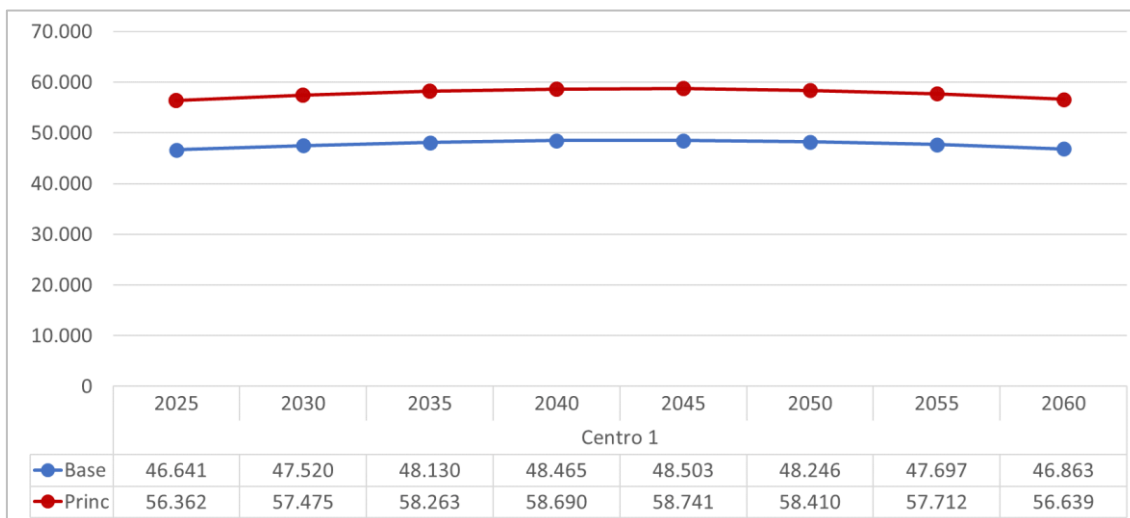
Figura 13-1 – Evolução anual do total de passageiros DU: Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

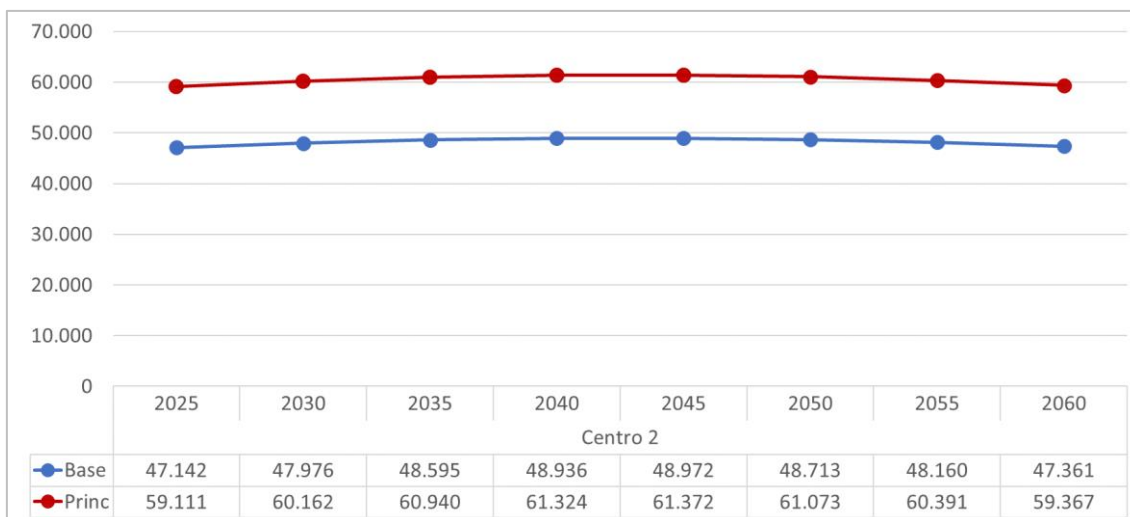
13.3.2 Evolução da demanda por linha – anos horizontes (Dia Útil)

Figura 13-2 – Metrô Centro 1 - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal



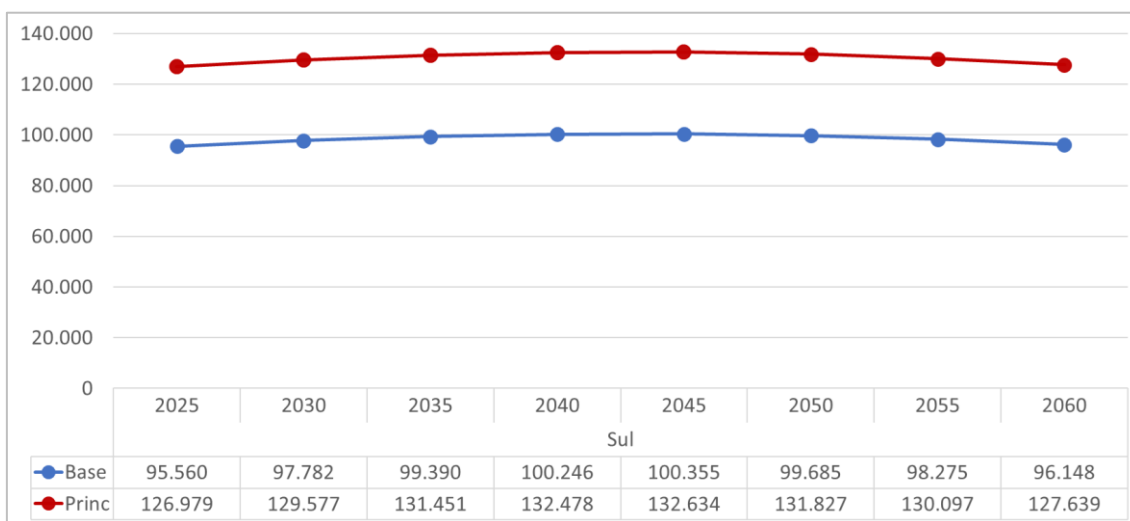
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 13-3 – Metrô Centro 2 - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal



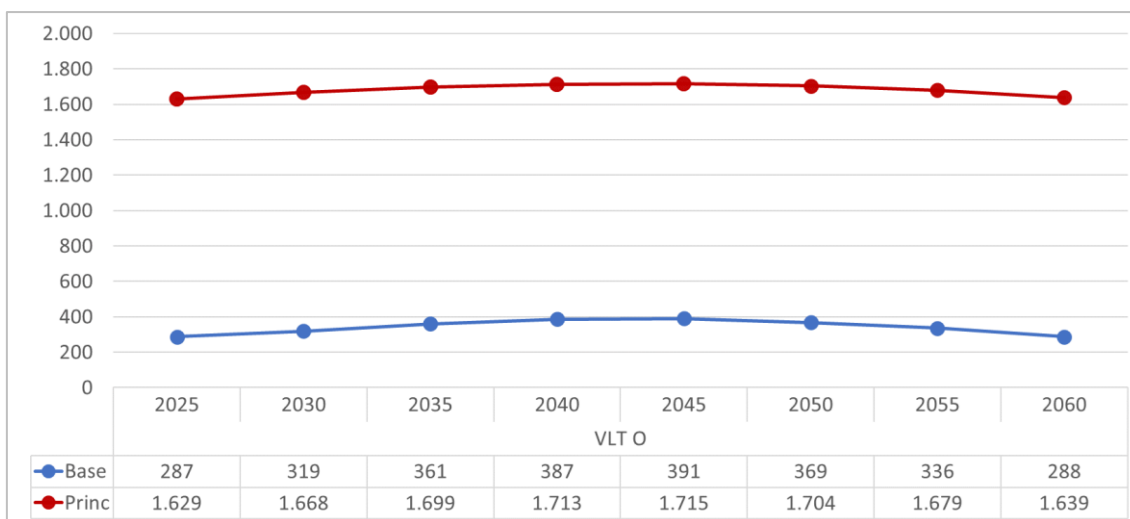
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 13-4 – Metrô Sul - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal



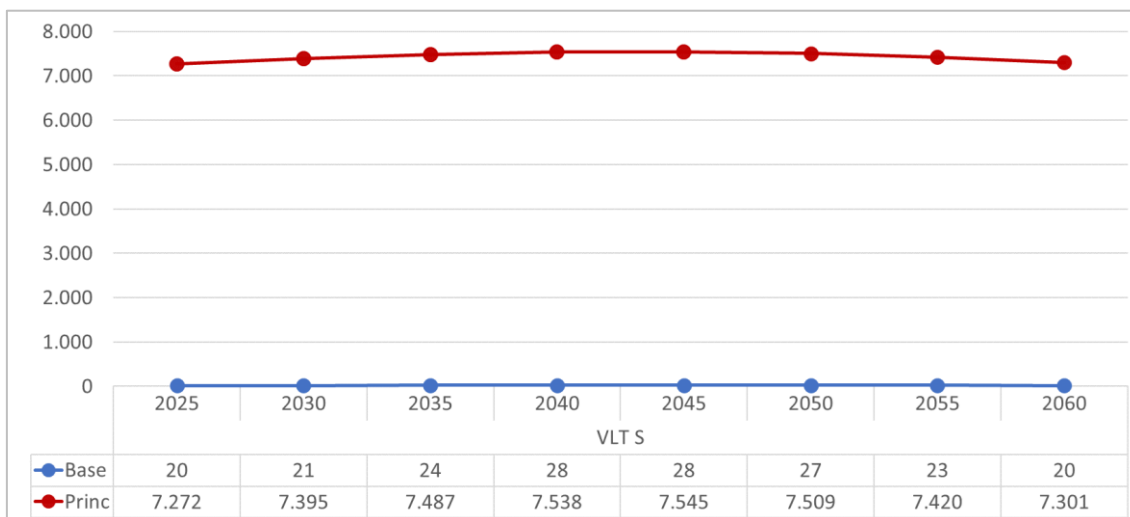
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 13-5 – VLT Oeste - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

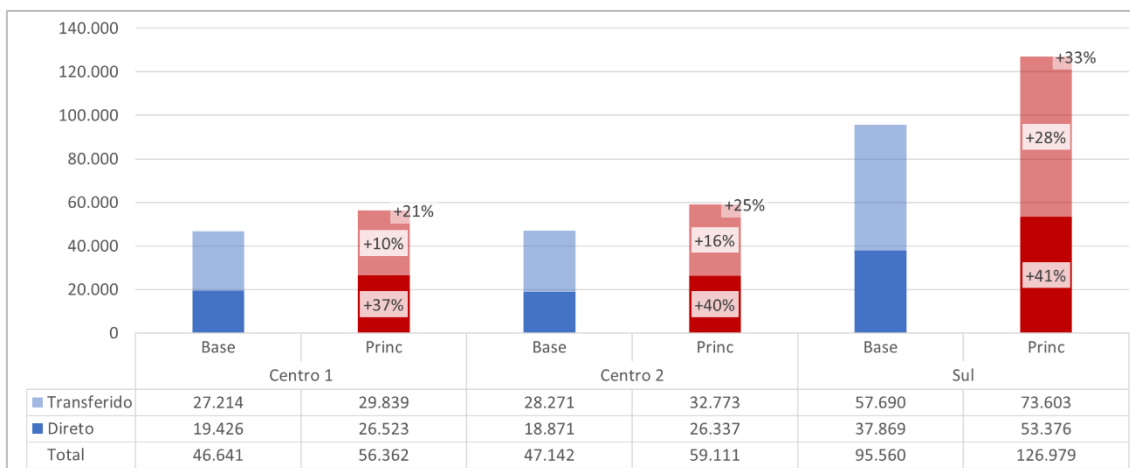
Figura 13-6 – VLT Sul - Evolução da demanda (dia útil) – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

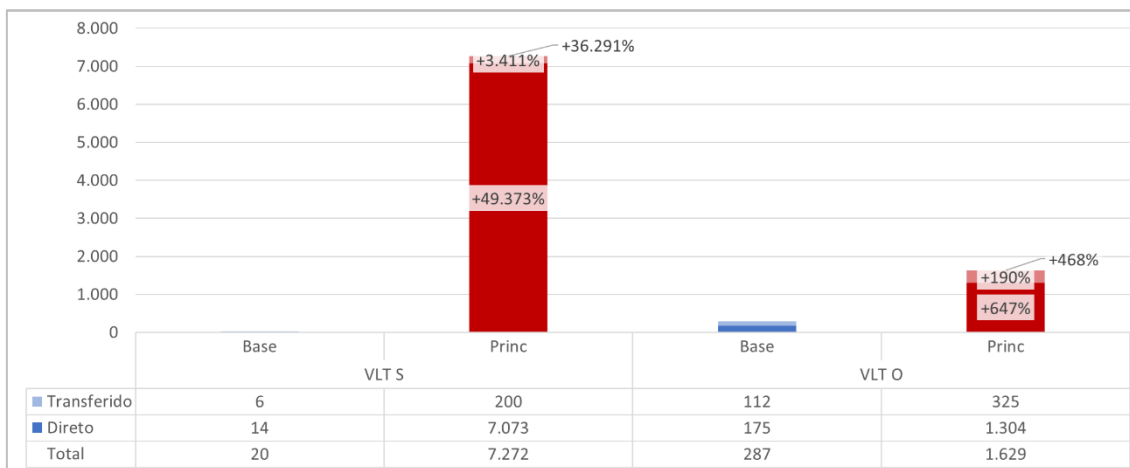
13.3.3 Embarques Diretos x Transferidos – 2025 (Dia Útil)

Figura 13-7 – Metrô - Diretos x Transferidos – 2025 (dia útil) – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

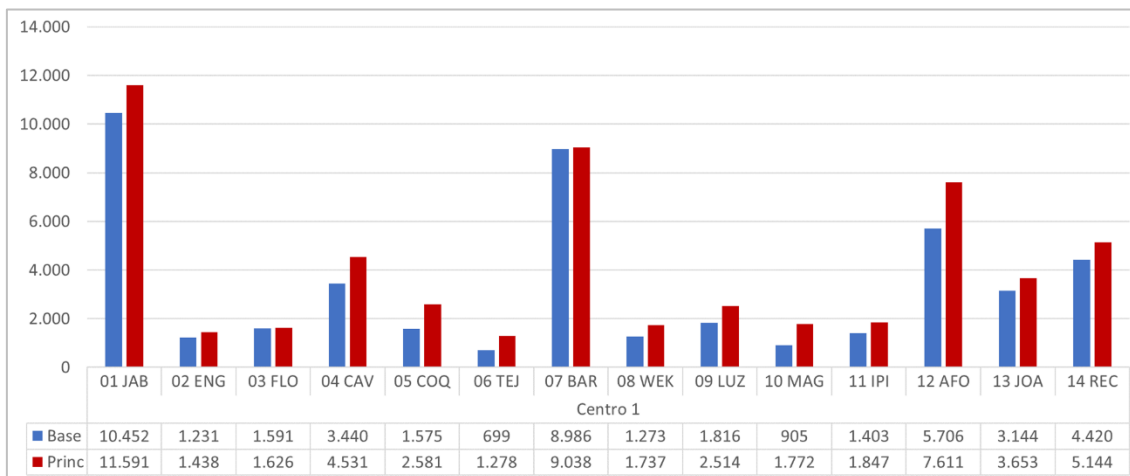
Figura 13-8 – VLT - Diretos x Transferidos – 2025 (dia útil) – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

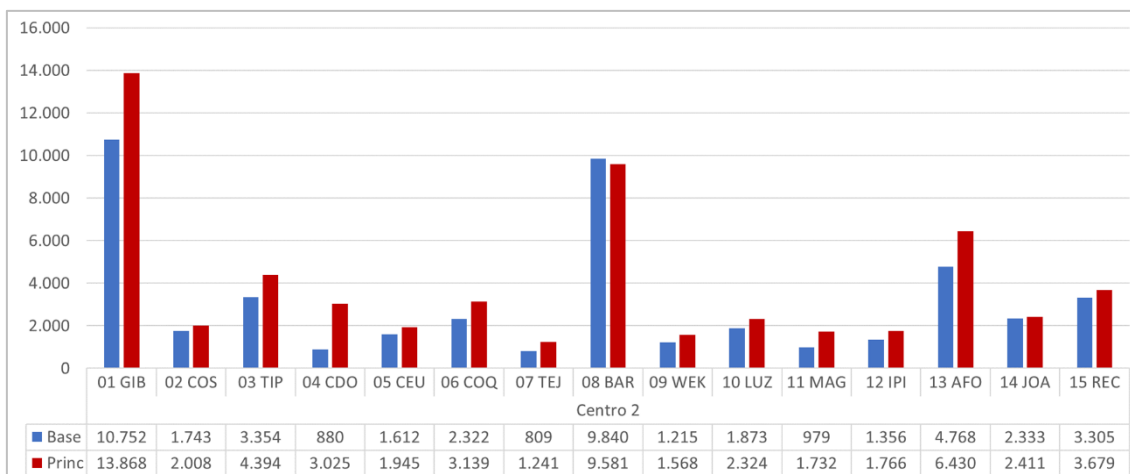
13.3.4 Embarques por linha e por estação – 2025 (Dia Útil)

Figura 13-9 – Metrô Centro 1 - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal



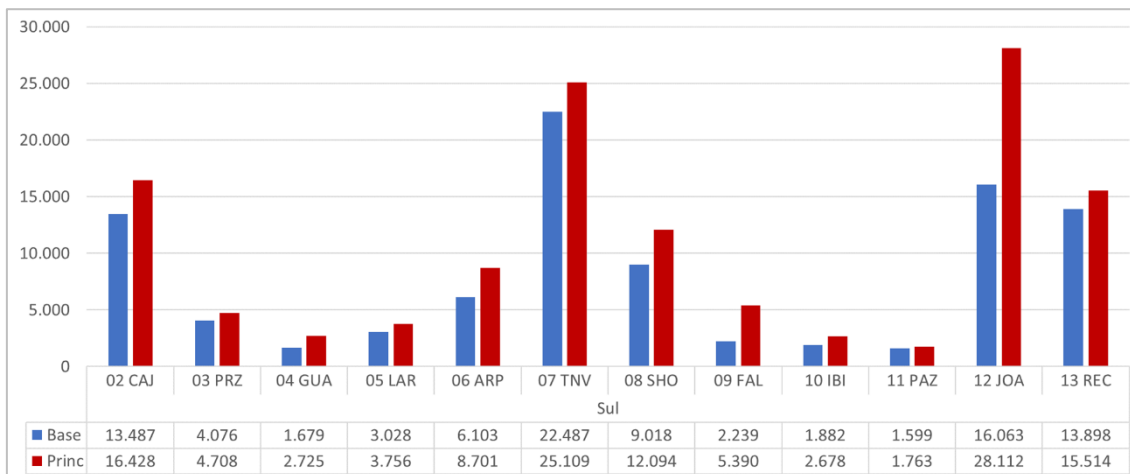
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 13-10 – Metrô Centro 2 - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal



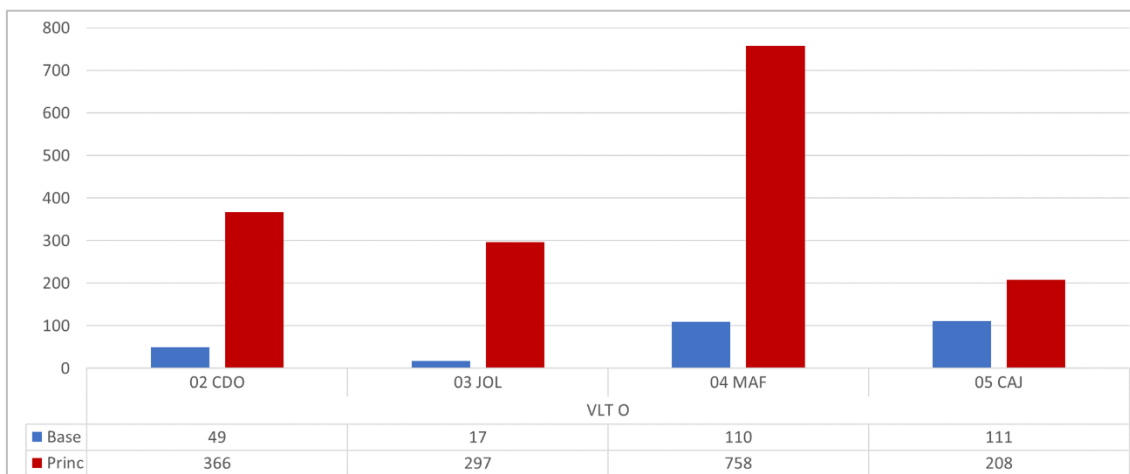
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 13-11 – Metrô Sul - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal



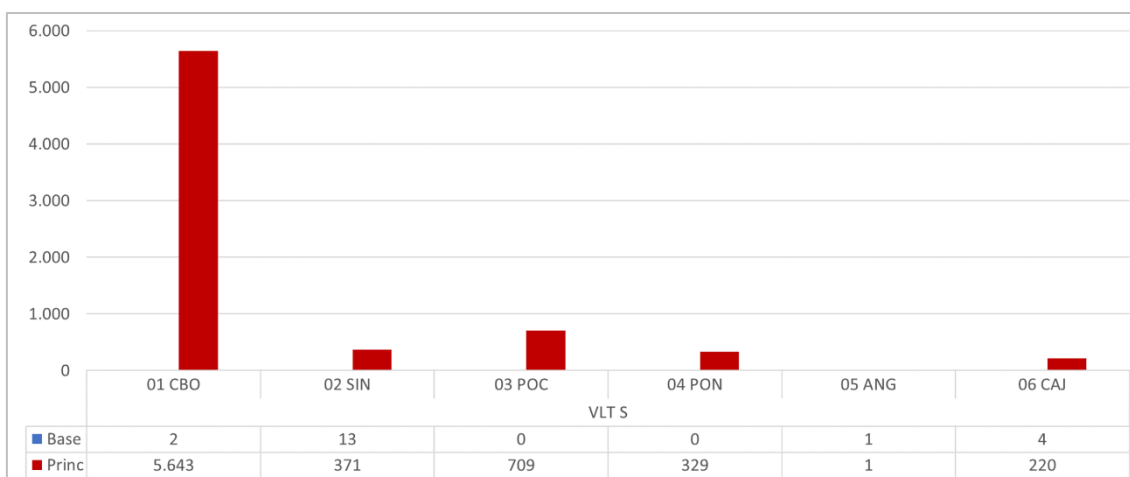
Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

Figura 13-12 – VLT Oeste - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

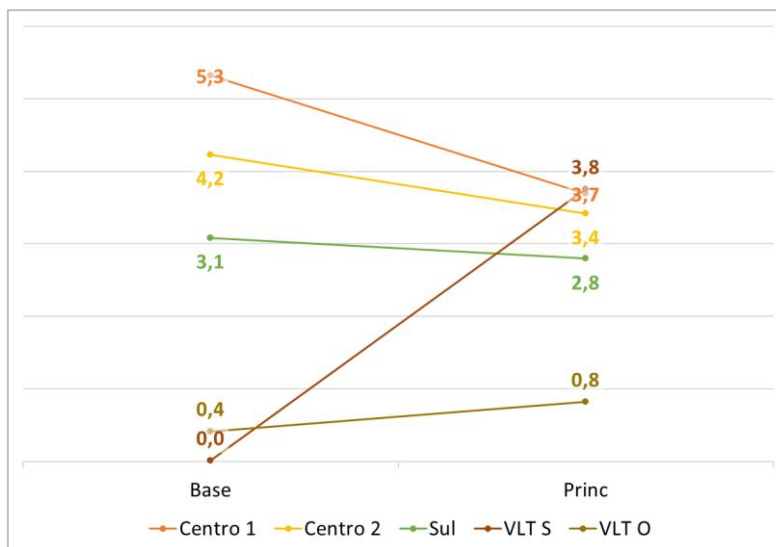
Figura 13-13 – VLT Sul - demanda por estação (dia útil) – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

13.3.5 Ocupação máxima no período de pico da manhã – 2025 (pax/m²)

Figura 13-14 – Ocupação máxima (PM, 5h00-7h59) – 2025 – Base x Principal



Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

13.3.6 Indicadores por linha e por cenário - anos horizontes

Tabela 13-4 Indicadores de demanda por linha e por ano: Base x Principal

Linha	Cenário	Ano	Trecho Crítico	Embarques PM	Embarques DU	Embarques Ano	Carr. Crítico PM	Ocupação (pax/m ²)
Centro 1	Base	2025	IPI → AFO	15.570	46.641	14.341.508	10.066	5,3
		2030	IPI → AFO	15.891	47.520	14.609.616	10.284	5,4
		2035	IPI → AFO	16.116	48.130	14.796.151	10.434	5,5
		2040	IPI → AFO	16.238	48.465	14.898.408	10.516	5,6
		2045	IPI → AFO	16.253	48.503	14.910.182	10.525	5,6
		2050	IPI → AFO	16.159	48.246	14.831.685	10.464	5,5
		2055	IPI → AFO	15.956	47.697	14.663.632	10.326	5,5
		2060	IPI → AFO	15.649	46.863	14.409.179	10.121	5,3
	Princ.	2025	IPI → AFO	18.620	56.362	17.379.537	11.427	3,7
		2030	IPI → AFO	19.023	57.475	17.720.682	11.690	3,8
		2035	IPI → AFO	19.307	58.263	17.962.483	11.876	3,8
		2040	IPI → AFO	19.463	58.690	18.093.448	11.977	3,9
		2045	IPI → AFO	19.482	58.741	18.109.227	11.989	3,9
		2050	IPI → AFO	19.360	58.410	18.007.489	11.909	3,8
		2055	IPI → AFO	19.108	57.712	17.793.478	11.746	3,8
		2060	IPI → AFO	18.721	56.639	17.464.559	11.492	3,7
Centro 2	Base	2025	IPI → AFO	14.413	47.142	14.633.686	8.007	4,2
		2030	IPI → AFO	14.672	47.976	14.890.930	8.147	4,3
		2035	WEK → LUZ	14.862	48.595	15.082.143	8.260	4,4
		2040	WEK → LUZ	14.966	48.936	15.187.293	8.324	4,4
		2045	WEK → LUZ	14.977	48.972	15.198.478	8.330	4,4
		2050	WEK → LUZ	14.899	48.713	15.118.640	8.283	4,4
		2055	IPI → AFO	14.728	48.160	14.947.906	8.183	4,3
		2060	IPI → AFO	14.480	47.361	14.701.058	8.044	4,3
	Princ.	2025	IPI → AFO	17.918	59.111	18.391.035	10.580	3,4
		2030	IPI → AFO	18.243	60.162	18.715.871	10.773	3,5
		2035	IPI → AFO	18.488	60.940	18.956.478	10.922	3,5
		2040	IPI → AFO	18.608	61.324	19.075.242	10.991	3,5
		2045	IPI → AFO	18.623	61.372	19.089.964	10.999	3,6
		2050	IPI → AFO	18.529	61.073	18.997.537	10.943	3,5
		2055	IPI → AFO	18.314	60.391	18.786.489	10.815	3,5
		2060	IPI → AFO	17.999	59.367	18.470.398	10.629	3,4
Sul	Base	2025	SHO → FAL	16.235	95.560	28.655.989	9.251	3,1
		2030	SHO → FAL	16.576	97.782	29.320.106	9.446	3,1
		2035	SHO → FAL	16.826	99.390	29.801.146	9.574	3,2
		2040	SHO → FAL	16.965	100.246	30.057.278	9.650	3,2
		2045	SHO → FAL	16.983	100.355	30.090.024	9.660	3,2
		2050	SHO → FAL	16.875	99.685	29.889.594	9.601	3,2
		2055	SHO → FAL	16.658	98.275	29.467.771	9.486	3,2
		2060	SHO → FAL	16.331	96.148	28.831.816	9.300	3,1

Linha	Cenário	Ano	Trecho Crítico	Embarques PM	Embarques DU	Embarques Ano	Carr. Crítico PM	Ocupação (pax/m ²)
	Princ.	2025	SHO → FAL	22.226	126.979	38.097.458	11.177	2,8
		2030	SHO → FAL	22.629	129.577	38.875.014	11.383	2,8
		2035	SHO → FAL	22.925	131.451	39.436.261	11.532	2,9
		2040	SHO → FAL	23.083	132.478	39.743.723	11.610	2,9
		2045	SHO → FAL	23.115	132.634	39.790.338	11.628	2,9
		2050	SHO → FAL	22.985	131.827	39.548.778	11.561	2,9
		2055	SHO → FAL	22.706	130.097	39.030.536	11.421	2,9
		2060	SHO → FAL	22.329	127.639	38.295.059	11.228	2,8
VLT S	Base	2025	PON → ANG	12	20	5.041	5	0,0
		2030	PON → ANG	13	21	5.356	5	0,0
		2035	PON → ANG	15	24	6.112	6	0,0
		2040	PON → ANG	18	28	7.108	8	0,0
		2045	PON → ANG	18	28	7.114	8	0,0
		2050	PON → ANG	18	27	6.846	7	0,0
		2055	PON → ANG	14	23	5.714	6	0,0
		2060	PON → ANG	13	20	5.159	5	0,0
	Princ.	2025	PON → ANG	2.870	7.272	1.932.517	2.701	3,8
		2030	PON → ANG	2.919	7.395	1.965.206	2.748	3,8
		2035	PON → ANG	2.956	7.487	1.989.573	2.782	3,9
		2040	PON → ANG	2.976	7.538	2.003.156	2.801	3,9
		2045	PON → ANG	2.979	7.545	2.005.100	2.804	3,9
		2050	PON → ANG	2.964	7.509	1.995.359	2.790	3,9
		2055	PON → ANG	2.929	7.420	1.971.669	2.757	3,8
		2060	PON → ANG	2.881	7.301	1.940.171	2.712	3,8
VLT O	Base	2025	MAF → JOL	117	287	69.515	75	0,4
		2030	MAF → JOL	133	319	77.368	84	0,5
		2035	MAF → JOL	154	361	87.451	94	0,5
		2040	MAF → JOL	167	387	93.744	101	0,6
		2045	MAF → JOL	170	391	94.750	102	0,6
		2050	MAF → JOL	158	369	89.335	96	0,5
		2055	MAF → JOL	141	336	81.359	88	0,5
		2060	MAF → JOL	117	288	69.783	75	0,4
	Princ.	2025	MAF → JOL	668	1.629	393.997	295	0,8
		2030	MAF → JOL	686	1.668	403.338	303	0,8
		2035	MAF → JOL	701	1.699	410.831	310	0,9
		2040	MAF → JOL	707	1.713	414.224	313	0,9
		2045	MAF → JOL	709	1.715	414.752	313	0,9
		2050	MAF → JOL	703	1.704	412.060	311	0,9
		2055	MAF → JOL	691	1.679	405.928	305	0,8
		2060	MAF → JOL	673	1.639	396.393	297	0,8

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

13.3.7 Embarques por linha e por cenário – Diretos e Transferidos - anos horizontes

Tabela 13-5: Embarques diretos e transferidos (PM, 5h00-7h59) – Nos anos horizonte

Linha	Cenário	Ano	Direto	Transferido	Total	% Direto	% Transferido
Centro 1	Base	2025	6287	9283	15570	40%	60%
		2030	6344	9547	15891	40%	60%
		2035	6387	9729	16116	40%	60%
		2040	6407	9831	16238	39%	61%
		2045	6410	9843	16253	39%	61%
		2050	6395	9764	16159	40%	60%
		2055	6357	9599	15956	40%	60%
		2060	6300	9349	15649	40%	60%
	Principal	2025	8563	10057	18620	46%	54%
		2030	8666	10357	19023	46%	54%
		2035	8739	10568	19307	45%	55%
		2040	8779	10684	19463	45%	55%
		2045	8784	10698	19482	45%	55%
		2050	8753	10607	19360	45%	55%
		2055	8687	10421	19108	45%	55%
		2060	8588	10133	18721	46%	54%
Centro 2	Base	2025	5899	8514	14413	41%	59%
		2030	5956	8715	14672	41%	59%
		2035	6000	8863	14862	40%	60%
		2040	6024	8942	14966	40%	60%
		2045	6026	8951	14977	40%	60%
		2050	6008	8891	14899	40%	60%
		2055	5969	8759	14728	41%	59%
		2060	5914	8566	14480	41%	59%
	Principal	2025	7807	10111	17918	44%	56%
		2030	7892	10352	18243	43%	57%
		2035	7951	10537	18488	43%	57%
		2040	7984	10624	18608	43%	57%
		2045	7988	10635	18623	43%	57%
		2050	7963	10566	18529	43%	57%
		2055	7909	10404	18314	43%	57%
		2060	7828	10171	17999	43%	57%
Sul	Base	2025	6553	9682	16235	40%	60%
		2030	6640	9937	16576	40%	60%
		2035	6705	10122	16826	40%	60%
		2040	6739	10226	16965	40%	60%
		2045	6743	10240	16983	40%	60%
		2050	6717	10159	16875	40%	60%
		2055	6659	9999	16658	40%	60%
		2060	6574	9757	16331	40%	60%
	Principal	2025	9141	13085	22226	41%	59%
		2030	9246	13383	22629	41%	59%
		2035	9328	13597	22925	41%	59%
		2040	9376	13707	23083	41%	59%
		2045	9382	13733	23115	41%	59%
		2050	9345	13640	22985	41%	59%
		2055	9268	13438	22706	41%	59%
		2060	9172	13157	22329	41%	59%

Linha	Cenário	Ano	Direto	Transferido	Total	% Direto	% Transferido
VLT O	Base	2025	72	45	117	62%	38%
		2030	86	47	133	65%	35%
		2035	107	47	154	70%	30%
		2040	120	48	167	72%	28%
		2045	122	47	170	72%	28%
		2050	111	47	158	70%	30%
		2055	94	47	141	67%	33%
		2060	72	45	117	61%	39%
	Principal	2025	564	104	668	84%	16%
		2030	580	107	686	84%	16%
		2035	592	109	701	84%	16%
		2040	597	110	707	84%	16%
		2045	598	110	709	84%	16%
		2050	594	109	703	84%	16%
		2055	584	107	691	84%	16%
		2060	568	105	673	84%	16%
VLT S	Base	2025	10	2	12	80%	20%
		2030	11	3	13	81%	19%
		2035	13	3	15	83%	17%
		2040	16	3	18	85%	15%
		2045	16	3	18	85%	15%
		2050	15	3	18	85%	15%
		2055	12	3	14	82%	18%
		2060	10	3	13	80%	20%
	Principal	2025	2787	82	2870	97%	3%
		2030	2835	84	2919	97%	3%
		2035	2870	86	2956	97%	3%
		2040	2890	86	2976	97%	3%
		2045	2893	86	2979	97%	3%
		2050	2878	86	2964	97%	3%
		2055	2844	85	2929	97%	3%
		2060	2798	83	2881	97%	3%

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de demanda do sistema metroferroviário do Recife/PE foi realizado de forma a avaliar o seu potencial de transporte e comparar diferentes opções de configuração de rede, trouxe fundamentos para as decisões que foram sendo tomada ao longo do estudo e servirá de auxílio para decisões futuras.

O documento reúne informações a respeito das metodologias adotadas para o modelo 4 etapas de geração e distribuição de viagens, divisão modal e alocação, bem como os dados e etapas utilizados para a construção do modelo de simulação.

A partir de um processo minucioso de coleta e tratamento de dados, foi apresentado o método de elaboração da matriz O-D a partir de dados de bilhetagem eletrônica (SBE) e dados GPS e de montagem da rede de simulação. O processo de calibração do modelo de alocação, aplicada para o ano base de 2023, demonstrou aderência entre os valores observados e modelados. Por meio da aplicação da projeção da demanda, foi possível gerar as matrizes O-D futuras, posteriormente usadas nas simulações dos anos horizontes.

Após a preparação do modelo, ocorreram dois momentos de simulações: as simulações dos Cenários Iniciais, que anteciparam análises de variações de oferta e demanda; e processo iterativo com Estado PE e União, fase de grande produção em que as principais análises e tomadas de decisão foram realizadas por parte do Estado PE. Nesse processo decisório, foram realizadas simulações progressivas, alimentadas por ponderações e conhecimentos locais do Estado PE e SEPPI, com a definição dos novos intervalos entre veículos do Metrô e do VLT.

Quanto à política tarifária, foi priorizada a solução com manutenção de tarifa pública unitária, ou seja, igual entre os modos ônibus e trilhos, e que propicia um equilíbrio entre a arrecadação tarifária e os impactos aos usuários. Instituiu-se, assim, o conceito de pagamento de um complemento tarifário no 2º modo da viagem nas integrações ônibus-trilhos e trilhos-ônibus. A configuração tarifária escolhida foi a tarifa única de R\$ 4,10, com complemento de R\$ 0,15.

Por fim, a partir da tomada de decisão, o Cenário Principal foi simulado para todos os anos horizontes do Estudo (2025 – 2060), de cinco em cinco anos, e seus resultados apresentados em comparação ao cenário Base. Foram apresentados resultados de embarques por cenário e por horizonte, desagregados por linha e estação, além dos embarques divididos em diretos e transferidos, o que possibilitou o cálculo da arrecadação teórica por serviço e que será insumo para o cálculo da arrecadação em produtos futuros.

Diante do exposto, o documento cumpre o propósito de estabelecer a demanda prevista para o sistema de trilhos da RM de Recife (PE) para os anos horizontes, fundamentado em um modelo sólido de demanda e em um processo técnico intenso de avaliações para a tomada de decisão. Esses resultados subsidiam os estudos de CAPEX e OPEX e demais detalhamentos a serem apresentados no RT06 – Estudo Técnico Operacional e no RT08 – Avaliação Econômico-Financeira.

15.ANEXOS

15.1 TERMINAIS DE INTEGRAÇÃO DISTRIBUÍDOS POR ANEL

Tabela 15-1 Linhas por Terminal de Integração

Terminal de Integração (TI)	Número de Linhas Anel A	Número de Linhas Anel B	Total de Linhas por TI
PELÓPIDAS	3	15	18
RIO DOCE		10	10
CABO		10	10
ABREU E LIMA	3	7	10
IGARASSU	1	4	5
MACAXEIRA	5	2	7
IGARASSU/MACAXEIRA		1	1
CAJUEIRO SECO	11	1	12
PE-15/ABREU E LIMA		1	1
RIO DOCE/PE-15		1	1
PELÓPIDAS/MACAXEIRA		1	1
PRAZERES	2	1	3
CAMARAGIBE	19	1	20
IGARASSU/ABREU E LIMA		1	1
RIO DOCE/CDU		1	1
PE-15	2	1	3
JABOATÃO	11	1	12
TIP/JABOATÃO	1		1
CAMARAGIBE/MACAXEIRA	1		1
AEROPORTO	3		3
CDU/CAXANGÁ	2		2
TANCREDO NEVES	12		12
CDU/JOANA BEZERRA	1		1
XAMBA/PE-15	1		1
COSME E DAMIÃO/CAXANGÁ	1		1
AEROPORTO/AFOGADOS	1		1
GETÚLIO VARGAS	6		6
CAXANGÁ	8		8
GETÚLIO VARGAS/CDU	1		1
TANCREDO NEVES/MACAXEIRA	2		2
AEROPORTO/JOANA BEZERRA	1		1
XAMBÁ/JOANA BEZERRA	1		1
AEROPORTO/PRAZERES	1		1
PELÓPIDAS/JOANA BEZERRA	1		1
BARRO	6		6
PELÓPIDAS/PE-15	2		2
BARRO/CAJUEIRO	1		1
RECIFE	4		4
JABOATÃO/CAVALEIRO	1		1
CAVALEIRO	4		4

Terminal de Integração (TI)	Número de Linhas Anel A	Número de Linhas Anel B	Total de Linhas por TI
JOANA BEZERRA	2		2
SANTA LUZIA	2		2
BARRO/MACAXEIRA	2		2
TANCREDO NEVES/AEROPORTO	1		1
BARRO/PRAZERES	1		1
TIP	10		10
CA	1		1
XAMBÁ	15		15
PE-15/AFOGADOS	1		1
XAMBÁ/LARGO DA PAZ	1		1
PE-15/JOANA BEZERRA	1		1
CDU	4		4
ABREU E LIMA/MACAXEIRA	1		1
Total Geral	161	59	220

Fonte: Base do GTFS, base de linhas que operam em maio/2023, Grande Recife. Elaboração: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

15.2 MODE TABLE

Tabela 15-2 Mode Table do modelo de alocação

ID	Nome do modo	Descrição	Tarifa Calibração	ImpWeight Calibração
1	WALK	Walk		1,00
10	TRILHOS	Metrô e VLT	4,25	1,00
20	TI_AnelA	Terminais de Integração Anel A	4,10	1,00
21	TI_AnelB	Terminais de Integração Anel B	4,10	1,00
22	INT_AnelA1	Linhas integradas do Anel A	4,10	1,00
23	INT_AnelA2	Linhas integradas do Anel A tarifa diferenciada	4,10	1,00
24	INT_AnelB	Linhas integradas do Anel B	5,60	1,00
25	INT_AnelG	Linhas integradas do Anel G	2,70	1,00
30	SEM_INT	Linhas sem integração	-	1,00
50	STCP	Complementar	4,10	1,00

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024

15.3 MODE TRANSFER TABLE

Tabela 15-3 Mode Transfer Table do modelo de alocação

FROM	FROM_NAME	TO	TO_NAME	COMPLEMENTO
10	TRILHOS	10	TRILHOS	0
10	TRILHOS	20	TI_AnelA	0
10	TRILHOS	21	TI_AnelB	0
10	TRILHOS	22	INT_AnelA1	0
10	TRILHOS	23	INT_AnelA2	1.35
10	TRILHOS	24	INT_AnelB	0
10	TRILHOS	25	INT_AnelG	0
20	TI_AnelA	10	TRILHOS	0
20	TI_AnelA	20	TI_AnelA	0
20	TI_AnelA	21	TI_AnelB	0
20	TI_AnelA	22	INT_AnelA1	0
20	TI_AnelA	23	INT_AnelA2	0
20	TI_AnelA	24	INT_AnelB	0
21	TI_AnelB	10	TRILHOS	1.5
21	TI_AnelB	20	TI_AnelA	0
21	TI_AnelB	21	TI_AnelB	0
21	TI_AnelB	22	INT_AnelA1	0
21	TI_AnelB	23	INT_AnelA2	0
21	TI_AnelB	24	INT_AnelB	0
22	INT_AnelA1	10	TRILHOS	0
22	INT_AnelA1	20	TI_AnelA	0
22	INT_AnelA1	21	TI_AnelB	0
22	INT_AnelA1	22	INT_AnelA1	0
22	INT_AnelA1	23	INT_AnelA2	0
22	INT_AnelA1	24	INT_AnelB	0
23	INT_AnelA2	10	TRILHOS	1.5
23	INT_AnelA2	20	TI_AnelA	0
23	INT_AnelA2	21	TI_AnelB	0
23	INT_AnelA2	22	INT_AnelA1	0
23	INT_AnelA2	23	INT_AnelA2	0
23	INT_AnelA2	24	INT_AnelB	0
24	INT_AnelB	10	TRILHOS	0
24	INT_AnelB	20	TI_AnelA	0
24	INT_AnelB	21	TI_AnelB	0
24	INT_AnelB	22	INT_AnelA1	0
24	INT_AnelB	24	INT_AnelB	0

Fonte: Consórcio GPO-SYSTRACESCON-RHEIN, 2024