

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA INJEÇÃO DE TRENS  
METROFERROVIÁRIOS UTILIZANDO ALGORITMO  
LÓGICO-INTERATIVO**

**LEONARDO MOY ALVES BERARDINELLI**

**ORIENTADOR: PASTOR WILLY GONZALES TACO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**BRASÍLIA-DF, FEVEREIRO DE 2018**

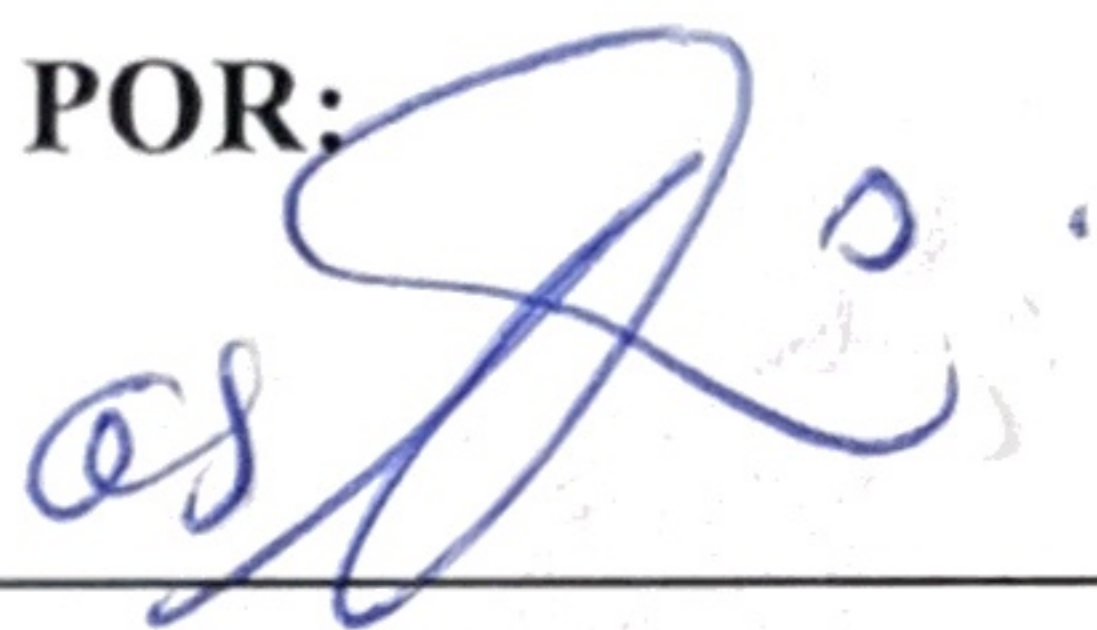
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA INJEÇÃO DE TRENS  
METROFERROVIÁRIOS UTILIZANDO ALGORITMO LÓGICO-  
INTERATIVO

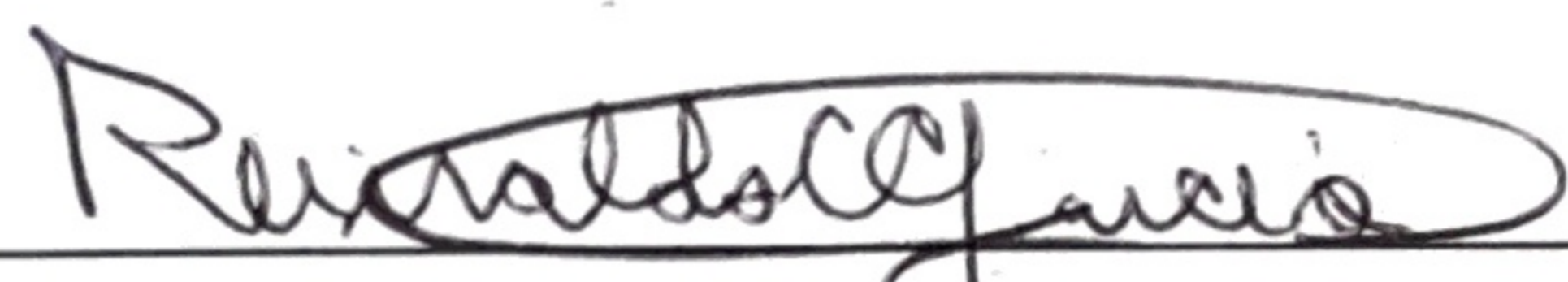
LEONARDO MOY ALVES BERARDINELLI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.

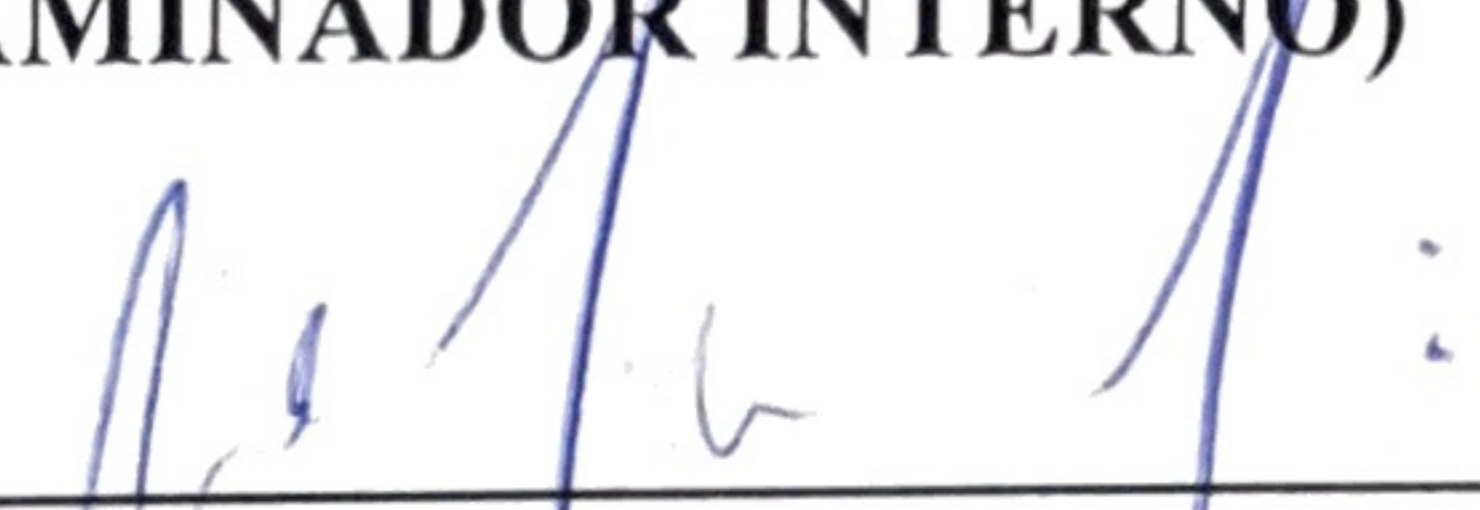
APROVADA POR:



Prof. PASTOR WILLY GONZALES TACO, Dr. (PPGT/UNB)  
(ORIENTADOR)



Prof. REINALDO CRISPINIANO GARCIA, Dr. (PPGT/UNB)  
(EXAMINADOR INTERNO)



Prof. ALEXANDRE HENRIQUE SILVA, Dr. (METRÔ-DF)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 02 de FEVEREIRO de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

BERARDINELLI, LEONARDO MOY ALVES

Método para Planejamento da Injeção de Trens Metroferroviários utilizando Algoritmo Lógico-Interativo. [Brasília, Distrito Federal] 2018. xv, 103p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de engenharia Civil e Ambiental.

- |                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Sistemas Metroferroviários  | 2. Planejamento da Injeção de Trens |
| 3. Algoritmo Logico-Interativo | 4. METRÔ-DF                         |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BERARDINELLI, L. M. A. (2018). Método para Planejamento da Injeção de Trens Metroferroviários utilizando Algoritmo Lógico-Interativo. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T.DM-04/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 103p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Leonardo Moy Alves Berardinelli.

TÍTULO: Método para Planejamento da Injeção de Trens Metroferroviários utilizando Algoritmo Lógico-Interativo.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Leonardo Moy Alves Berardinelli  
leo.moy@gmail.com

“Uma educação que não afetasse quem e o que você  
é seria ineficaz.”

Wayne C. Booth

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Maria do Carmo (*in memoriam*) e Ivan, pelos ensinamentos para toda a vida.

E, em especial, à minha esposa Aline, por todo apoio e paciência nesta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa Aline, cujo apoio e compreensão foram essenciais para trilhar esse caminho com crescimento e sucesso.

A minha família, por dar suporte em todas as etapas da minha vida.

Ao meu orientador professor Pastor, que balizou o caminho para mais essa realização.

Aos demais professores, que com toda a paciência e perseverança do mundo repassaram conhecimento e experiência durante essa jornada.

Ao METRÔ-DF, por fornecer os dados necessários para a realização da pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho Luciano e Rodrigo, me incentivando a todo tempo a lutar pelo sucesso.

E, por fim, aos demais colegas e amigos, que sempre estiveram ao meu lado para apontar os caminhos a serem seguidos, e ao mesmo tempo aceitaram meus inexperientes apontamentos, tornando a experiência do curso inigualável.

## RESUMO

Sistemas metroferroviários constituem os principais modos de transporte urbano de alta capacidade e atendem a um grande volume de usuários. Para atingir esse volume, é necessário realizar o Planejamento da Circulação de Trens (PCT), que determina como ocorrerá a efetiva operação do sistema, apontando horários e locais de prestação de serviço dos trens. Dentro do PCT, destaca-se o Planejamento da Injeção Inicial dos Trens (PIIT) que tem como função estabelecer precisamente o momento e local de injeção dos trens, a fim de distribuir a frota de forma ótima para prestação de serviço homogêneo em toda a extensão do sistema.

O presente trabalho tem como objetivo propor um método para o desenvolvimento do PIIT, e utiliza como premissa a possibilidade de execução manual, utilizando ferramentas computacionais simples e *softwares* comuns. Essa premissa foi estabelecida devido à dificuldade de implantação e manutenção de ferramentas complexas, por requererem equipamentos computacionais e *softwares* avançados, profissionais especializados ou mesmo por terem sido desenhados para sistemas metroferroviários específicos.

O método proposto foi desenhado utilizando um algoritmo genérico, que foi chamado de Algoritmo Moy, e foram apresentadas suas premissas, variáveis de entrada, de saída e indicadores de desempenho para permitir a comparação com o resultado do planejamento utilizando-se outros métodos.

Por fim, foi apresentado um estudo de caso no METRÔ-DF, onde o desenvolvimento do PIIT é realizado de forma empírica. Foram obtidos os dados necessários para a aplicação do método e foram identificados três cenários: Dias Úteis; Sábados; e Domingos e Feriados. No Cenário Dias Úteis, quando é utilizada o maior número de trens e de locais de injeção, o desempenho do método foi 132,4% superior ao planejamento realizado no METRÔ-DF, conforme o indicador Período de Injeções. Nos Cenários 2 e 3, utilizando a limitação de trens impostas pelo planejamento da empresa, o desempenho do método foi ligeiramente inferior, respectivamente 2,7% e 3,7% no mesmo indicador. Esse resultado pode ser atribuído a não utilização de todos os trens disponíveis nos estacionamentos, diminuindo a complexidade do trabalho, e o carrossel não se encontrava homogêneo no momento da injeção do último trem, levando cerca de 10min para sua completa regulação. Nos Cenários 2a e 3a, de forma otimizada e podendo utilizar todos os trens posicionados nos estacionamentos, o desempenho foi respectivamente 61,8% e 79,1% superior.

Palavras-chave: sistemas metroferroviários; planejamento da injeção de trens; algoritmo logico-interativo; METRÔ-DF.

## ABSTRACT

Underground rail systems are the main modes of urban transport of high capacity and serve a large volume of users. In order to reach this volume, it is necessary to carry out the Train Circulation Planning (TCP), which determines how the effective operation of the system will take place, indicating the schedules and entry locations of the trains. Within the TCP, we highlight the Planning of the Initial Injection of Trains (PIIT), whose function is to establish precisely the moment and location of the injection of the trains, in order to distribute the fleet in an optimal way to provide a homogeneous service fully of the system.

The present work aims to propose a method for the development of PIIT, and uses as a premise the possibility of manual execution, using simple computational tools and common software. This premise was established due to the difficulty of implementing and maintaining complex tools, because they require advanced computer equipment and software, specialized professionals or even because they have been designed for specific metro-rail systems.

The proposed method was designed using a logic-interactive algorithm, which was called the Moy Algorithm, and its premises, input variables, output variables and performance indicators were presented to allow comparison with the planning result using other methods.

Finally, a case study was presented at METRÔ-DF, where PIIT development is carried out manually. The necessary data for the application of the method were obtained and three scenarios were identified: Business Days; Saturdays; and Sundays and Holidays. In the Business Days Scenario, when using the largest number of trains and injection sites, the method performance was 132.4% higher than the METRÔ-DF, according to the Injection Period indicator. In Scenarios 2 and 3, using the train limitation imposed by the company's planning, the performance of the method was slightly lower, respectively 2.7% and 3.7% in the same indicator. This result can be attributed to the non-use of all the trains available in the parking lots, reducing the complexity of the work, and the carousel was not homogeneous at the moment of the last train, taking about 10 minutes for its complete regulation. In Scenarios 2a and 3a, in an optimized way and being able to use all the trains placed in the parking lots, the performance was respectively 61.8% and 79.1% higher.

Keywords: Underground rail systems; train injection planning; logic-interactive algorithm; METRÔ-DF.



# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Apresentação .....	1
1.2	Delimitação do Problema .....	2
1.3	Hipótese .....	4
1.4	Objetivos.....	4
1.5	Justificativa.....	5
1.6	Metodologia da Dissertação .....	7
1.7	Estrutura da Dissertação .....	7
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	10
2.1	Introdução.....	10
2.2	Conceitos Básicos dos Sistemas Metroviários .....	11
2.2.1	Sistemas de Controle e Proteção .....	11
2.2.2	Análise da Demanda Metroviária.....	12
2.2.3	Análise da Oferta Metroviária.....	13
2.2.4	Planejamento da Circulação de Trens .....	15
2.2.5	Programa Horário da Operação Metroviária .....	17
2.2.6	Avaliação do Desempenho.....	19
2.3	Métodos para de Programação dos Trens.....	20
2.3.1	Métodos de criação e otimização de tabela horária para atendimento da demanda buscando o menor tempo de viagem.....	21
2.3.2	Métodos de otimização energética, por meio de regeneração dinâmica e perfil de condução do trem .....	22
2.3.3	Métodos que priorizam Baldeações e Integrações com demais modos de transporte.....	24
2.3.4	Demais Métodos e Algoritmos observados na literatura .....	25
2.4	Tópico Conclusivo.....	27
3	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA INJEÇÃO DE TRENS METROVIÁRIOS UTILIZANDO ALGORITMO LÓGICO-INTERATIVO .....	28
3.1	Apresentação e Considerações .....	28
3.2	Linha Hipotética .....	29
3.3	Premissas para utilização do Método .....	30
3.4	Variáveis de Entrada.....	31
3.5	Variáveis de Saída .....	35
3.6	Processamento do Algoritmo Lógico-Interativo .....	36

3.6.1	Etapa 1 - Construção da Matriz Marcos/Locais de Entrada.....	37
3.6.2	Etapa 2 - Construção da Matriz Horários de Injeção .....	41
3.6.3	Etapa 3 - Interação para determinar os Locais e Horários de Injeção .....	45
3.7	Método de Avaliação do Processamento – Comparação por Indicadores de Desempenho .....	49
3.8	Tópico Conclusivo.....	54
4	APLICAÇÃO DO ALGORITMO MOY NA PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TRENS DO METRO DF .....	55
4.1	Introdução .....	55
4.2	METRÔ-DF.....	55
4.3	Cenários para Aplicação do Método Proposto .....	57
4.4	Aquisição e Preparação das Variáveis.....	59
4.5	Processamento do Algoritmo Moy .....	60
4.5.1	Cenário 1 – Dias Úteis .....	61
4.5.2	Cenário 2 – Sábados .....	65
4.5.3	Cenário 2a – Sábados (otimizado) .....	68
4.5.4	Cenário 3 – Domingos e Feriados .....	71
4.5.5	Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado).....	74
4.6	Cálculo dos Indicadores do Atual Planejamento no METRÔ-DF .....	76
4.7	Apresentação dos Resultados .....	79
4.8	Comparação dos Resultados .....	80
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	82
5.1	Introdução.....	82
5.2	Conclusões.....	82
5.3	Recomendações .....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
	APÊNDICE I – Listagem dos Sistemas Metroviários .....	89
	APÊNDICE II – Protocolo da Revisão da Literatura.....	94
	APÊNDICE III – Dados da Linha Hipotética de serviço metroviário .....	99
	APÊNDICE IV – Matriz Posição/Locais de Entrada.....	100

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Matriz Marcos/Tempo. ....	33
<b>Tabela 3.2</b> – Matriz Marcos/Locais de Entrada. ....	40
<b>Tabela 3.3</b> – Matriz de Horários de Injeção .....	45
<b>Tabela 3.4</b> – Matriz de Horários de Injeção Ordenada.....	46
<b>Tabela 3.5</b> – Processamento da Matriz de Horários de Injeção no Cenário a).....	47
<b>Tabela 3.6</b> – Processamento da Matriz de Horários de Injeção no Cenário b). ....	48
<b>Tabela 3.7</b> – Matriz de Injeção do Cenário a). ....	48
<b>Tabela 3.8</b> – Matriz de Injeção do Cenário b). ....	49
<b>Tabela 3.9</b> – Cálculo do Indicador Período de Injeções no Cenário a). ....	51
<b>Tabela 3.10</b> – Cálculo do Indicador Período de Injeções no Cenário b). ....	51
<b>Tabela 3.11</b> – Cálculo do Indicador Frequência de Injeções no Cenário a). ....	53
<b>Tabela 3.12</b> – Cálculo do Indicador Frequência de Injeções no Cenário b). ....	53
<b>Tabela 4.1</b> – Matriz Marcos/Locais de Entrada do Cenário 1 – Dias Úteis .....	62
<b>Tabela 4.2</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 1 – Dias Úteis Ordenada.....	63
<b>Tabela 4.3</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 1 – Dias Úteis Processada.....	64
<b>Tabela 4.4</b> – Matriz de Injeções do Cenário 1 – Dias Úteis e Indicadores .....	65
<b>Tabela 4.5</b> – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 2 – Sábados .....	66
<b>Tabela 4.6</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2 – Sábados Ordenada .....	66
<b>Tabela 4.7</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2 – Sábados Processada .....	67
<b>Tabela 4.8</b> – Matriz de Injeções do Cenário 2 – Sábados e Indicadores .....	68
<b>Tabela 4.9</b> – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 2a – Sábados (otimizado).....	69
<b>Tabela 4.10</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2a – Sábados (otimizado) Ordenada..	69
<b>Tabela 4.11</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2a – Sábados (otimizado) Processada	70
<b>Tabela 4.12</b> – Matriz de Injeções do Cenário 2a – Sábados (otimizado) e Indicadores .....	71
<b>Tabela 4.13</b> – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 3 – Domingos e Feriados .....	72
<b>Tabela 4.14</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3 – Domingos e Feriados Ordenada ..	72
<b>Tabela 4.15</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3 – Domingos e Feriados Processada	73
<b>Tabela 4.16</b> – Matriz de Injeções do Cenário 3 – Domingos e Feriados e Indicadores .....	73
<b>Tabela 4.17</b> – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) .....	74
<b>Tabela 4.18</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) Ordenada .....	75
<b>Tabela 4.19</b> – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) Processada .....	75
<b>Tabela 4.20</b> – Matriz de Injeções do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) e Indicadores .....	76
<b>Tabela 4.21</b> – Matriz de Injeções do Cenário 1 – Dias Úteis utilizada no METRÔ-DF e Cálculo dos Indicadores .....	77

<b>Tabela 4.22</b> – Matriz de Injeções do Cenário 2 – Sábados utilizada no METRÔ-DF e Cálculo dos Indicadores.....	78
<b>Tabela 4.23</b> – Matriz de Injeções do Cenário 3 – Domingos e Feriados utilizada no METRÔ-DF e Cálculo dos Indicadores .....	79

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Etapas do Planejamento da Circulação de Trens.....	2
<b>Figura 1.2</b> – Fluxo de Trabalho da Dissertação. ....	9
<b>Figura 2.1</b> – Sistema de controle de velocidade em bloco fixo (modificado - Hoel <i>et al.</i> , 2011).....	12
<b>Figura 2.2</b> – Determinação do maior volume ao longo do serviço (Vuchic, 2005).....	14
<b>Figura 2.3</b> – Variação do <i>headway</i> em comparação com a demanda (Sun <i>et al.</i> , 2014). ....	15
<b>Figura 2.4</b> – Níveis de Planejamento Ferroviário (Tazoniero, 2007). ....	17
<b>Figura 2.5</b> – Fluxo da criação e monitoramento do programa horário (modificado - Goverde, 2005).....	18
<b>Figura 2.6</b> – Método para simulação de otimização energética (Su <i>et al.</i> , 2016). ....	23
<b>Figura 3.1</b> – Posição do PIIT dentro do PCT. ....	29
<b>Figura 3.2</b> – Lógica de Execução do Método Proposto. ....	29
<b>Figura 3.3</b> – Linha Hipotética, a ser utilizada na demonstração de aplicação do Método.....	29
<b>Figura 3.4</b> – Premissas e Variáveis de Entrada do Método.....	35
<b>Figura 3.5</b> – Variáveis de Entrada e Saída do Método.....	36
<b>Figura 3.6</b> – Demonstração do Cálculo da Ordem. ....	38
<b>Figura 3.7</b> – Demonstração do Cálculo dos Locais de Entrada. ....	39
<b>Figura 3.8</b> – Diagrama de Blocos dos Passos da Etapa 2.....	42
<b>Figura 3.9</b> – Definição da Matriz Trem/Marcos. ....	43
<b>Figura 3.10</b> – Diagrama de Blocos dos Passos da Interação para determinar os Locais e Horários de Injeção. ....	47
<b>Figura 3.11</b> – Indicadores de Desempenho. ....	50
<b>Figura 4.1</b> – Linhas do METRÔ-DF (METRÔ-DF, 2017). ....	56
<b>Figura 4.2</b> – Pátios e Estacionamento do METRÔ-DF (modificado - METRÔ-DF, 2017). ..	57
<b>Figura 1</b> – Distribuição dos artigos em 30 anos.....	97
<b>Figura 2</b> – Distribuição dos artigos nos grupos de pesquisa. ....	98

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> – Elementos e Características consideradas no desenvolvimento do Programa Horário. ....	19
<b>Quadro 2.2</b> – Indicadores de qualidade de serviço metroviário (Andrade, 2009). ....	20
<b>Quadro 2.3</b> – Listagem dos algoritmos .....	25
<b>Quadro 4.1</b> – Parâmetros Operacionais do METRÔ-DF .....	59
<b>Quadro 4.2</b> – Listagem das Variáveis de Entrada.....	60
<b>Quadro 4.3</b> – Cenários Processados utilizando o Algoritmo Moy.....	61
<b>Quadro 4.4</b> – Comparação dos resultados entre a programação utilizada no METRÔ-DF e o resultado do processamento do Algoritmo Moy. ....	80
<b>Quadro 1</b> – Termos e Combinações de pesquisa .....	95
<b>Quadro 2</b> – Resultado da Pesquisa nas Bases de Dados. ....	96
<b>Quadro 3</b> – Classificação dos Métodos observados na Literatura. ....	97

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 3.1</b> - Quantitativo de Trens.....	31
<b>Equação 3.2</b> - Headway.....	31
<b>Equação 3.3</b> - Matriz Posição/Tempo .....	32
<b>Equação 3.4</b> - Horário de Início da Operação .....	34
<b>Equação 3.5</b> - Quantitativo de Trens em Cada Local de Entrada .....	34
<b>Equação 3.6</b> - Intervalo entre Injeções nos Locais de Entrada .....	34
<b>Equação 3.7</b> - Intervalo entre Injeções pelo Operador.....	34
<b>Equação 3.8</b> - Matriz de Injeções .....	35
<b>Equação 3.9</b> - Matriz Posição/Locais de Entrada.....	37
<b>Equação 3.10</b> - Matriz Trem/Posição.....	41
<b>Equação 3.11</b> - Matriz Posição/Locais de Entrada.....	44
<b>Equação 3.12</b> - Horário de Injeção.....	44
<b>Equação 3.13</b> - Indicador Período de Injeções.....	50
<b>Equação 3.14</b> - Indicador Frequência de Injeções - Média.....	52
<b>Equação 3.15</b> - Indicador Frequência de Injeções – Desvio Padrão .....	52

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

Os sistemas metroferroviários são um dos principais elementos de mobilidade urbana das grandes cidades. De forma estrutural, esses sistemas são dimensionados para atender a um grande volume de usuários visando solucionar o desafio de mobilidade das metrópoles, somando tecnologias de engenharia com a integração de outros modos de transporte. Para Brinco (2012), o sistema metroviário “é um modal que, nas faixas mais elevadas de capacidade de transporte oferecida, não tem competidor”<sup>1</sup>.

Para atingir o volume de usuários transportados que os sistemas metroviários se propõem, o planejamento operacional é uma das principais atividades executadas, em especial o Planejamento da Circulação de Trens (PCT), que determina como ocorrerá a efetiva operação do sistema, apontando horários e locais de prestação de serviço dos trens.

Para Meng *et al.* (2011), o PCT é o principal elemento para a gestão da operação metroviária, que determina, entre outros pontos, os momentos de entrada e saída dos trens da via principal e o tempo de prestação de serviço nas estações.

Esse planejamento busca determinar a configuração ótima da circulação dos trens para atendimento da demanda de viagens dos usuários, por meio da caracterização da oferta e do sistema metroviário, utilizando *inputs* como quantitativo dos trens, atributos da via e sistemas de controle, posição dos pátios e estacionamento para entrada e saída de trens, entre outras variáveis. Também são consideradas premissas como horário de funcionamento do sistema e nível de qualidade de prestação de serviço (tempo de espera e usuários por metro quadrado).

Dentre as atividades relacionadas ao desenvolvimento do PCT, destaca-se o Planejamento da Injeção Inicial dos Trens (PIIT). A função do PIIT é estabelecer precisamente o momento e local de injeção dos trens, a fim de distribuir a frota de forma ótima para prestação de serviço homogêneo em toda a extensão do sistema.

---

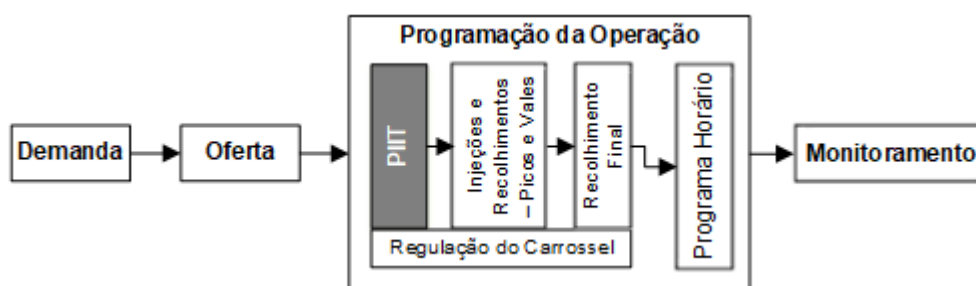
<sup>1</sup> Capacidade do transporte metroviário no limite inferior entre 20.000 e 40.000 pass/hora/sentido e limite superior em 80.000 pass/hora/sentido, em comparação com o sistema de ônibus com limite superior em 32.000 pass/hora/sentido (melhor condição: via dupla por sentido e segregada) e VLT com limite superior em 40.000 pass/hora/sentido.



## 1.2 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O PCT está dividido, essencialmente, em quatro etapas: na avaliação da demanda de passageiros, no dimensionamento da oferta, na programação da operação e no seu monitoramento com parâmetros quantificadores para controle, como pode ser observado na Figura 1.1 (Novaes, 1986; Ferraz e Torres, 2004; Vuchic, 2005; Hoel *et al.*, 2011).

O PIIT está inserido na etapa de Programação da Operação, em conjunto com as Injeções e Recolhimentos os Picos e Vales, Recolhimento Final e Regulação do Carrossel. Esses componentes derivam no Programa Horário, que sintetiza como a operação comercial deve ser conduzida.



**Figura 1.1** – Etapas do Planejamento da Circulação de Trens.

O estudo da demanda de viagens nos sistemas metroferroviários refere-se à obtenção e formatação dos dados de desejo de viagem, que podem ter origem em projeções ou em observação *in loco* (contagem). Os dados obtidos são formatados como matrizes origem/destino por recorte de tempo, a fim de possibilitar o processamento do carregamento dos trens em circulação.

O estudo da oferta utiliza como dados de entrada as características da via e dos trens e os níveis de prestação de serviço esperados (tempos máximos de espera e densidade de usuários nas plataformas e trens), além das matrizes de origem/destino da primeira etapa. O processamento desses dados resulta na determinação dos horários de pico/vale, intervalo entre trens e oferta hora/sentido, além da possível demanda reprimida. Os dados apurados são utilizados na etapa seguinte e também norteiam estudos para modernização do sistema e ampliação da frota de trens.

A etapa de programação de trens tem como objetivo determinar os momentos e locais de entrada e saídas dos trens na operação, bem como a regulação do carrossel, para atender a demanda de transporte. Para isso, utilizam-se os atributos da via e dos trens, posição dos pontos de entrada e saída, horários de pico/vale e intervalos entre trens. De forma ideal, o processamento utiliza ferramentas de cálculo matemático, algoritmos e simulações para obter

a configuração ótima da programação. Como resultado desse processamento tem-se o Programa Horário, pronto para ser utilizado na operação comercial.

Nessa etapa do planejamento, que se insere o PIIT, o resultado ótimo desta injeção pode contribuir como a economia de energia, manutenção do sistema e permite melhor organização da equipe operacional.

A última etapa, que aborda o monitoramento do sistema, refere-se à observação da circulação de trens após a implantação do programa horário, com o objetivo de apurar indicadores de serviço, permitindo o acompanhamento preciso do serviço prestado. Esse acompanhamento possibilita identificar pontos que podem ser reinseridos nas etapas anteriores, balizando ajustes apropriados a uma melhor prestação de serviço.

Uma diferenciação importante para o PCT é a forma de gestão dos serviços prestados, que pode ser: a) por carrossel, que é a determinação do headway (intervalo entre trens) e manutenção dessa distância temporal ao longo do dia e; b) por despacho, que é a determinação de partida de cada trem em horário pré-determinado do ponto inicial da viagem, independentemente da posição dos demais trens ao longo da via.

Dentro da problemática de programação dos trens, foi verificado na revisão da literatura, detalhada no Capítulo 3, que os estudos realizados se concentram no desenvolvimento do programa horário nos seguintes focos: a) na programação horária dos trens, com base na demanda e/ou nas restrições técnicas do sistema; b) em otimização dos horários de partida e chegada para a máxima eficiência do sistema de regeneração elétrica<sup>2</sup>; e c) na definição dos horários dos trens para otimizar as baldeações e integrações em sistemas complexos<sup>3</sup>. A utilização desses métodos é de difícil aplicação prática, seja porque eles são desenhados para sistemas metroferroviários específicos ou porque requerem pessoal especializado, *softwares* exclusivos e equipamentos com grande capacidade computacional, pois demandam trabalho de programação e avaliação contínua dos resultados obtidos (Tazoniero, 2007; Xu *et al.*, 2013; Pereira, 2015).

Devido à complexidade das soluções disponíveis, Pereira (2015) ressalta que muitos operadores metroferroviários ainda fazem a programação dos trens por despachadores experientes, o que pode levar a soluções que não aproveitam ao máximo a capacidade do sistema.

---

<sup>2</sup> Sistemas metroviários utilizam tração elétrica e possuem sistema de freios dinâmicos, ou seja, durante a frenagem, os motores elétricos produzem energia elétrica a partir da energia cinética do trem, podendo ser reaproveitada para tracionar outro trem na região.

<sup>3</sup> Sistema complexos possuem, em uma mesma linha, diversas vias férreas, permitindo estratégias como trens expressos. Exemplo: Metrô de Nova York.

Nessa linha, o autor do presente trabalho coordenou ou esteve envolvido com a realização do PCT no METRÔ-DF no período entre 2007 e 2015. Nesses anos, foram verificadas alternativas para realização do planejamento, buscando, no mercado, ferramentas ou soluções comerciais.

Dentre as alternativas pesquisadas, pode-se mencionar: OpenTrack, da Simulation of Railway Networks; Railway Systems, da MathWorks; Railway Operation Simulator, por Albert Ball; Arena Simulation, da Rockwell Automation; entre outras.

Contudo, não se obteve êxito nas tentativas de aquisição ou uso dessas ferramentas. O insucesso pode ser atribuído à indisponibilidade de alternativas adaptadas às necessidades do METRÔ-DF, pois as ferramentas encontradas por vezes atendiam apenas parte do trabalho ou constituíam soluções muito complexas, com alto custo de aquisição, implantação e operação, inviabilizando suas adoções.

Acresce-se ao problema que, em vários operadores metroferroviários, estão disponíveis para o desenvolvimento do PCT apenas ferramentas computacionais comuns, como computadores de uso administrativo e suíte de software básico (editores de texto, planilhas eletrônicas, entre outros).

Desta forma, observa-se uma lacuna entre os estudos na área de planejamento metroferroviário e a aplicação prática por parte dos operadores, em que os supracitados recursos necessários para a adoção das soluções apresentadas na literatura não estão disponíveis no mercado, o que pode ensejar em uma prestação de serviço a quem da demanda dos usuários.

A partir dessa observação, pode-se levantar a seguinte questão: **É possível desenvolver um método que defina a injeção de trens no início da operação comercial, e que seja de simples operação e utilize ferramentas computacionais comuns?**

### **1.3 HIPÓTESE**

Entende-se que é possível desenvolver um método que defina a injeção de trens no início da operação comercial, e que seja de simples operação e utilize ferramentas computacionais comuns.

### **1.4 OBJETIVOS**

O objetivo geral dessa dissertação é desenvolver um método para planejamento da injeção de trens metroviários utilizando algoritmo lógico-iterativo que permitirá o aperfeiçoamento do PIIT dos sistemas metroviários.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar a circulação de trens nos sistemas metroferroviários para a realização do planejamento;
- Desenvolver o método para o PIIT, apresentando as premissas, variáveis de entrada, de saída, processamento e indicadores de desempenho, validando-o por meio de um cenário hipotético;
- Aplicar o método desenvolvido, utilizando como objeto a circulação de trens do METRÔ-DF;
- Comparar, por meio dos indicadores de desempenho Período de Injeções e Frequência de Injeções, a eficiência do resultado do PIIT realizado pelo método proposto, com o planejamento em vigor no METRÔ-DF.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

O PIIT é parte fundamental da racionalização dos recursos materiais e humanos a disposição do operador para o ótimo atendimento da demanda de viagens em um sistema metroviário.

Na definição do objetivo do estado de prever e prover, a implantação de novos sistemas metroviários tem um custo muito elevado, e deve-se levar em consideração a oportunidade e atratividade do empreendimento (Brinco, 2012). Nessa linha, tem-se uma abordagem alternativa desse objetivo: prever e otimizar, ou seja, analisar a necessidade, avaliar os recursos disponíveis e adotar medidas a fim de melhor atender a demanda de transporte.

Nessa linha, o PIIT é uma tarefa recorrente nos sistemas metroviários: é executado sempre que é demandado um novo PCT, e este ocorre em função de alterações na demanda de serviços de transporte ou nas características físicas ou tecnológicas do metrô, que podem ser devido as: alteração da demanda de viagens, decorrente, por exemplo, de novos empreendimentos em regiões atendidas pelo sistema; eventos pontuais, como competições esportivas ou espetáculos; alterações nos sistemas, como modernização ou ampliação da frota de trens; entre outros motivos. Desta forma, estudos relacionados ao aprofundamento do planejamento metroferroviário trazem alternativas aos operadores, levando a um aperfeiçoamento da prestação de serviço.

Dentre as vantagens que podem ser percebidas com a utilização do algoritmo para injeção dos trens, a principal é o aprimoramento dos horários de entrada para a prestação de serviço, esperando, assim, reduzir o consumo de energia e diminuir o custo de manutenção dependente da quilometragem percorrida, além de permitir melhor aproveitamento das escalas de trabalho dos condutores dos trens.

O ambiente do estudo de caso, METRÔ-DF, segundo a Lei Distrital 513/1993 e alterações, tem por finalidade “planejar, projetar, construir, operar e manter os sistemas de transporte público coletivo sobre trilhos no Distrito Federal”.

Porém, nessa empresa, o desenvolvimento do PIIT é realizado sem um método estruturado, contando apenas com o conhecimento empírico dos empregados responsáveis (METRÔ-DF, 2017). Apesar de na prática se observar a eficácia do trabalho, em que os trens são injetados e o serviço de transporte é ofertado, a otimização da circulação de trens pode não ser a ideal.

Ressalta-se, ainda, que a empresa está sujeita a vulnerabilidade do serviço público, em que cargos e funções dependem da esfera política e os empregados especializados na execução do serviço podem ser substituídos sem haver a passagem do conhecimento ou forma de trabalho, podendo dissipar-se o conhecimento adquirido e as evoluções alcançadas.

Desta forma, a adoção do método proposto no METRÔ-DF irá aperfeiçoar o PCT, e poderá reduzir o consumo energético e a manutenção do sistema, que são dependentes da circulação de trens. Permitirá, ainda, a otimização das escalas dos condutores dos trens e garantirá a continuidade do serviço de planejamento, mesmo que ocorram mudanças na equipe responsável.

Em complementação à pesquisa, foi realizada um levantamento dos operadores metroferroviários em diversos países, a fim de identificar outros ambientes passíveis de aplicação do método aqui proposto. Foram identificados 174 operadores, listados no APÊNDICE I – Listagem dos Sistemas Metroviários.

Desse universo de operadoras, observa-se que 88 delas administram sistemas com até duas linhas de serviço, grupo que se insere o METRÔ-DF. Estas representam 50,6% do total de empresas identificado e referem-se a apenas 18,3% da extensão total de linha férrea e 9,8% do total de passageiros transportados. Desta forma, conclui-se que são empresas relativamente pequenas, se comparadas com sistemas notoriamente conhecidos por extensão ou volume de passageiros transportados, como os metrô das cidades de Nova York, Cidade do México, São Paulo, Paris, Londres, Tóquio, Seul, Pequim, Xangai, entre outros.

Esse grupo de operadores menores pode se deparar com os mesmos obstáculos enfrentadas no METRÔ-DF, entre eles a dificuldade de formação e manutenção de profissionais especializados no PCT e a impossibilidade de aquisição de ferramentas específicas para a atividade, devido ao seu alto custo de aquisição e operação. Logo, pode-se inferir que essas empresas podem se beneficiar do método aqui proposto.

No contexto do tema, a pesquisa se justifica pela necessidade de ferramentas de fato aplicáveis aos operadores metroviários, a fim de otimizar a injeção dos trens na operação comercial.

No contexto da gestão dos operadores metroferroviários, esta pesquisa contribuirá para a eficiência dos serviços de transporte prestados pelos operadores metroferroviários.

No contexto do Programa de Pós-graduação em Transporte na UNB, este estudo pretende contribuir para a pesquisa e modernização de métodos e ferramentas para o planejamento do transporte metroferroviário, abrindo uma nova vertente na linha de pesquisa Métodos de Planejamento de Transportes da área de concentração Planejamento.

## **1.6 METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO**

A fim de alcançar os objetivos propostos nesse trabalho, as seguintes etapas serão seguidas:

Etapa 1: descrição do tema, com apresentação dos objetivos e justificativa. Método: Revisão bibliográfica;

Etapa 2: pesquisa e apresentação dos métodos e algoritmos disponíveis na literatura especializada. Método: Revisão bibliográfica;

Etapa 3: desenvolvimento do método proposto.

Etapa 4: aquisição dos parâmetros a serem utilizados no algoritmo junto ao METRÔ-DF. Método: Consulta à companhia para obtenção dos dados;

Etapa 5: aplicação do algoritmo com os parâmetros adquiridos. Método: inserção de dados levantados em sistemas computacionais;

Etapa 6: avaliação dos resultados. Método: comparação entre valores obtidos e valores considerados satisfatórios, segundo indicadores de desempenho selecionados a partir da revisão bibliográfica;

Etapa 7: conclusão do trabalho, com apresentação das considerações finais. Método: descrição textual.

## **1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação propõe um método que utiliza algoritmo lógico-iterativo, desenvolvido para solucionar o problema da definição dos pontos de entrada e horários da injeção dos trens, com base nos parâmetros de entrada definidos e critérios característicos do operador metroviário, tendo como resultado a programação de injeção de trens para prestação de serviços de transporte, atendendo assim as necessidades do PIIT na operação comercial.

O método foi desenhado para permitir montagem do carrossel de forma ótima, com o menor tempo possível entre o primeiro trem injetado e o horário de início da operação, ou seja, busca-se a melhor configuração dos pontos de entrada para atender ao posicionamento dos trens na operação comercial, considerando as características e restrições do operador metroviário. A compactação da injeção dos trens poderá, ainda, reduzir os custos relacionados com a circulação dos trens, em especial o consumo de energia e manutenção do sistema, além de permitir a otimização das escalas de trabalho dos condutores.

Desta forma, a apresentação do trabalho será dividida em cinco capítulos, a saber:

O Capítulo 1 trará a Introdução, apresentando a ideia do trabalho de pesquisa, bem como os elementos Problema, Hipótese, Objetivos, Justificativa, Metodologia e Estrutura da Dissertação.

O Capítulo 2 trará a Revisão da Literatura, evidenciando os estudos relacionados com o tema.

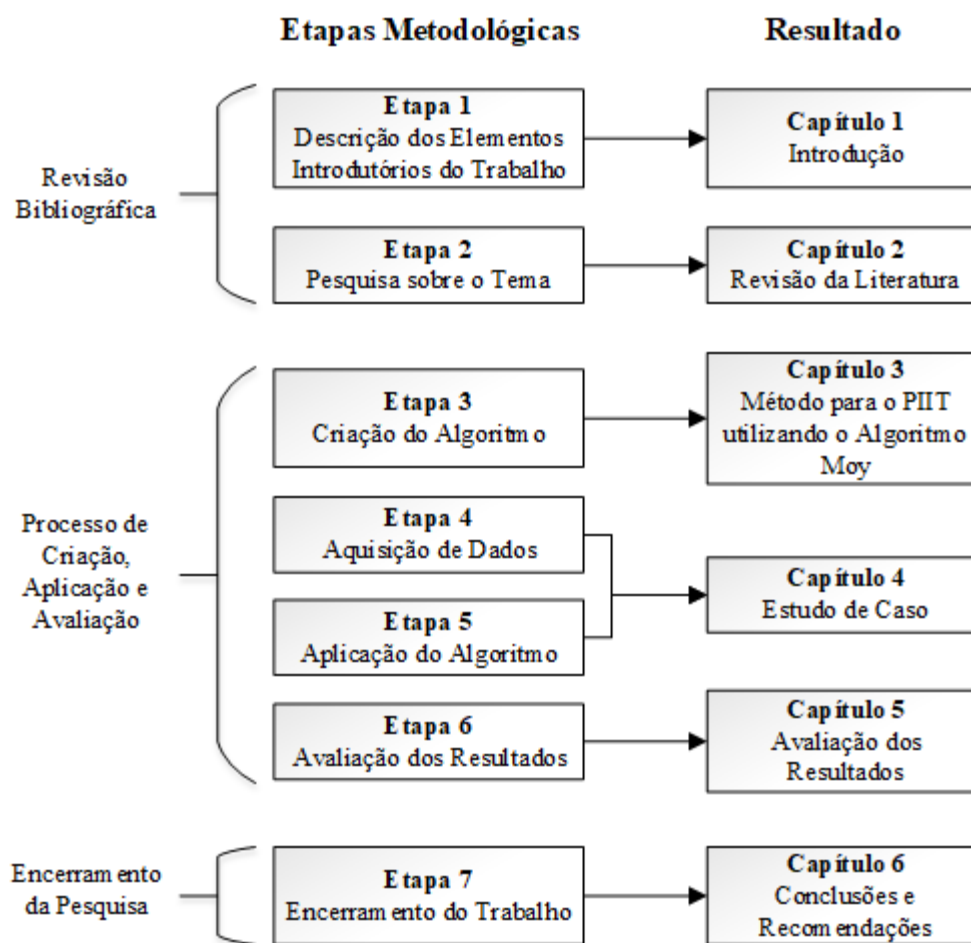
O Capítulo 3 apresentará o desenvolvimento do método proposto, apontando as etapas e forma de aplicação, utilizando uma Linha Hipotética criada para melhor demonstrar os procedimentos envolvidos.

O Capítulo 4 apresentará o estudo de caso, com base nos dados obtidos junto ao METRÔ-DF.

O Capítulo 5 apresentará a avaliação dos resultados, trazendo comparações acerca dos dados gerados.

O Capítulo 6 apresentará a conclusão do trabalho, com a indicação dos resultados da pesquisa e sugerirá tópicos a serem objeto de estudo complementar.

Para demonstrar a ligação entre as Etapas e Capítulos, apresenta-se na Figura 1.2 o Fluxo de Trabalho da Dissertação:



**Figura 1.2** – Fluxo de Trabalho da Dissertação.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Para a verificação da literatura sobre o tema proposto, foi realizada a Revisão Sistemática da Literatura. Porém, o resultado da revisão trouxe um número reduzido de trabalhos, que serão apresentados a seguir.

Inicialmente, serão apresentados os conceitos básicos acerca dos sistemas metroviários, apontando suas principais características, elementos físicos, infraestrutura, sistemas de controle e trens, em especial aquelas que se relacionam com o tema.

Para Hoel *et al.* (2011), os elementos físicos do sistema de transporte abrangem principalmente a infraestrutura, veículos e sistemas de controle. A avaliação desses elementos nos sistemas metroviários fornecerá dados sobre as características de transporte, como tempos de viagem, capacidade de transporte e limitantes de segurança, subsidiando a avaliação da oferta de serviço.

Em seguida, serão apresentados os estudos relacionados com o tema, trazendo um resumo de suas características e aplicações. Na análise dos trabalhos localizados, foi possível identificar três principais linhas de pesquisa: métodos de regeneração de energia, métodos que priorizam as baldeações e integrações e métodos para atendimento da demanda de transportes.

Os métodos de regeneração de energia apresentam foco no rearranjo da circulação de trens a fim de fazer proveito da capacidade de regeneração elétrica dos freios dinâmicos, que transforma a energia cinética do movimento do trem em energia elétrica e a devolve para o sistema de alimentação da via, para ser consumida por outro trem.

Os métodos que priorizam as baldeações e integração com os demais modos de transporte apresentam estudos que destacam o problema de transposição dos usuários, levando em consideração os horários de prestação de serviço e tempo de traslado entre as plataformas ou pontos de serviço dos sistemas de transporte.

Os métodos para atendimento da demanda buscam entender as características da demanda de viagens e da capacidade de oferta dos operadores, propondo métodos e algoritmos para permitir o melhor equilíbrio entre a oferta e demanda, atendendo as necessidades dos usuários no menor tempo possível.

Também serão apresentados, de forma sucinta, os estudos que apresentam algoritmos relacionados com a circulação de trens, porém sem ligação direta com o problema de pesquisa. Esses estudos demonstram que os métodos propostos são sempre aplicados a situações específicas, sendo de difícil aplicação em outros sistemas.

Por fim, será apresentado um tópico conclusivo acerca da literatura revisada, a fim de demonstrar o resultado da pesquisa.

## **2.2 CONCEITOS BÁSICOS DOS SISTEMAS METROVIÁRIOS**

### **2.2.1 SISTEMAS DE CONTROLE E PROTEÇÃO**

Para garantir a segurança na circulação de trens na via férrea, tem-se o Sistema de Segurança e Controle de Movimentação dos Trens, que são equipamentos instalados na via, nas estações e nos trens com o objetivo de certificar a distância segura e o controle de velocidade, garantido a circulação com segurança (METRÔ-DF, 2017).

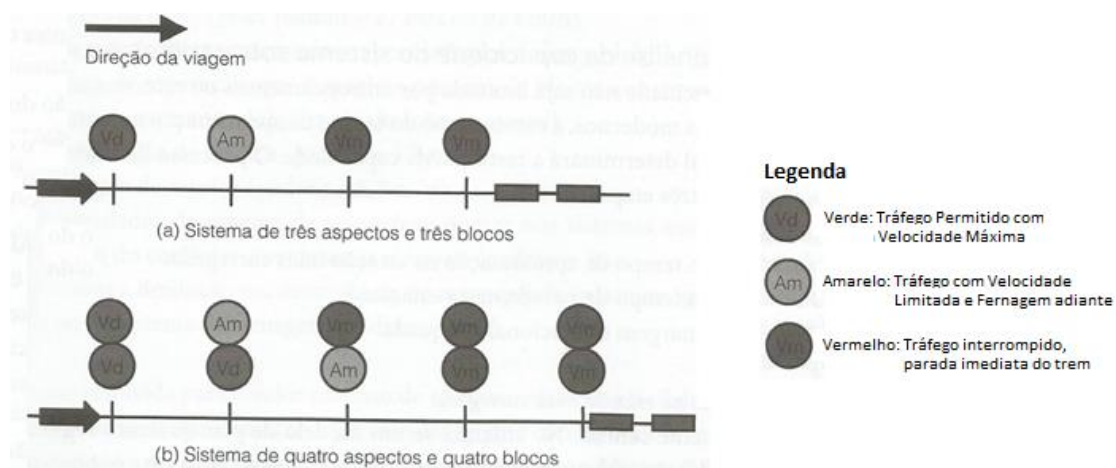
De forma geral, existem dois sistemas de controle: bloco fixo e bloco móvel, ambos com o objetivo de garantir a distância segura entre os trens, levando-se em consideração a velocidade máxima, capacidade de frenagem (mesmo em situações de falha) e geografia da via.

O sistema de controle por bloco fixo consiste na divisão da via férrea em trechos eletricamente isolados e controlados por uma baixa corrente elétrica. Quando existe um trem na região, a corrente emitida pelo sistema sofre interferência, que é detectada pelos equipamentos instalados ao longo da via, identificando assim a presença daquele trem. Essa corrente também tem a função de transmitir informações básicas ao trem, como a velocidade permitida naquela sessão.

O bloco móvel, por sua vez, utiliza transmissão de rádio instalado ao longo da via, e depende da resposta do trem para identificar a sua presença em determinada região. Os sistemas de bloco móvel podem ser considerados uma evolução do bloco fixo, pois possuem equipamentos mais modernos e maior capacidade de processamento, permitindo maior flexibilidade no sistema como um todo.

Em ambos os sistemas, o controle da movimentação dos trens ocorre de forma automática e segura, pois uma vez conhecida a posição dos trens, determina-se as condições de circulação, como velocidade e pontos de parada, evitando tráfego muito próximo ou em sentidos opostos.

Hoel *et al.* (2011) explicam que os sistemas de bloco fixo utilizam aspectos na entrada de cada bloco, e estes recebem autorizações de prosseguimento conforme a ocupação do trecho imediatamente a frente. Desta forma, no caso de presença de um trem a frente, o bloco imediatamente atrás possui indicação de parada e o anterior possui indicação de restrição de velocidade. Os sistemas podem assumir diversas configurações, conforme exemplificado na Figura 2.1:



**Figura 2.1** – Sistema de controle de velocidade em bloco fixo (modificado - Hoel *et al.*, 2011).

Além disso, os sistemas também determinam o sentido e manobras dos trens na via férrea. Nas regiões onde ocorre a mudança de via, a movimentação dos trens ocorre com uma atenção especial à segurança: essas regiões de mudança de via (AMV) são protegidas por dispositivos especiais de controle e segurança, para garantir a transposição segura entre vias.

Além da segurança, outro fator importante que o sistema de controle e proteção exerce é no gerenciamento dos trens em circulação. Com base na posição dos trens, é possível efetuar o controle dos horários e despachos dos trens, seguindo a programação horária e o *headway* (intervalo entre os trens).

O *headway* é a frequência dos trens em circulação no sistema metroviário. Essa frequência é calculada com base na extensão da linha, velocidade comercial, número de trens e tempo de prestação de serviço nas estações (METRÔ-SP, 2005). Além dessas variáveis, devem ser consideradas restrições impostas pela segurança do sistema: áreas de manobra dos trens nos terminais e regiões próximas a pátios e estacionamento podem apresentar restrições de velocidade e distância entre trens, devendo receber atenção especial durante o desenvolvimento do planejamento.

Desta forma, os sistemas de controle e proteção garantem a circulação segura dos trens e permite ainda o gerenciamento da prestação de serviço, possibilitando a execução do PCT e, conseqüentemente, a execução do PIIT.

## 2.2.2 ANÁLISE DA DEMANDA METROVIÁRIA

A demanda de viagem é o fator que justifica a operação do sistema de transporte como um todo. Para Ortuzar e Willumsen (2011), a demanda de transporte é derivada, e as viagens ocorrem para satisfazer necessidades como trabalho, educação, saúde e lazer. Assim como um bom sistema de transporte permite as pessoas satisfazerem seus desejos, um sistema ineficiente cria barreiras e limita o desenvolvimento.

Os estudos de demanda ocorrem a partir de pesquisas e observações com o objetivo de identificar o desejo de viagens dos habitantes de uma determinada região. Uma vez determinada a necessidade de mobilidade, estudos complementares buscam meios de satisfazer a demanda (Hoel *et al.*, 2011).

Um dos principais resultados da análise da demanda é a Matriz Origem-Destino (matriz OD), que é desenvolvida a partir de pesquisas<sup>4</sup> que identificação da origem das viagens e seu destino, por meio de agregamento de áreas<sup>5</sup> de uma cidade para fins de simplificação, tomando-se como base o horário de maior carregamento observado.

Além da matriz OD, o estudo de demanda pode concluir que, em determinado eixo de transporte, somente modos de alta capacidade como os sistemas metroviários podem atender a demanda dos usuários. Desta forma, os estudos podem determinar a implantação novas linhas de metrô ou mesmo ampliação daquelas já existentes.

Para o planejamento da circulação de trens, que utiliza intervalos que podem chegar a 3 minutos, a escala de tempo a ser utilizada deve ser a menor possível, a fim de identificar com precisão os horários de pico e vale da demanda. Uma forma de obter essa informação é por meio da Pesquisa da Variação da Demanda ao Longo do Dia, que ocorre por meio de contagem visual em diversos pontos durante todo o período desejado, obtendo-se assim os dados necessários para a identificação da demanda. Existem também métodos matemáticos que auxiliam na obtenção dessas informações a partir de dados indiretos, porém perde-se precisão no processo (Ferraz e Torres, 2004).

Outra forma de obter esse detalhamento é através da obtenção dos dados a partir dos modernos sistemas de bilhetagem automática, com uso de *smartcard*, realizando a coleta e processamento desses dados. Desta forma, é possível levantar a demanda temporal de viagem dos usuários com precisão, e, a partir desses dados, desenvolver as matrizes O-D com identificação dos diversos horários de carregamento. (Sun *et al.*, 2014)

Com base nos dados da matriz O-D e com a variação da demanda ao longo do dia, pode-se avançar no planejamento para determinação da oferta dos serviços.

### **2.2.3 ANÁLISE DA OFERTA METROVIÁRIA**

O estudo da oferta tem como objetivo prover o serviço de transporte para atender a demanda de viagens dos usuários. Esse estudo depende da análise da demanda propriamente dita e da

---

<sup>4</sup> As pesquisas podem ser efetuadas por meio de entrevistas ou por monitoramento eletrônico, como o uso dos dados obtidos por meio de *smartphones*.

<sup>5</sup> O Plano de Desenvolvimento de Transporte Sobre Trilhos (PDTT-DF), por exemplo, subdividiu o Distrito Federal em 428 zonas a serem utilizadas na sua Matriz Origem-Destino (METRÔ-DF, 2017).

capacidade de transporte do sistema, e o seu resultado é a determinação do quantitativo de trens necessários e do *headway* a ser cumprido.

Assim como a demanda é diversificada ao longo do dia, a oferta deve acompanhar essa variação, para otimizar o uso dos recursos do sistema metroviário. Conforme apresentado no item anterior, os dados relativos a variação da demanda vai subsidiar a determinação da oferta, porém, devido as características dos sistemas metroviários, a alteração do número de trens em circulação é um processo complexo, pois adota-se, em regra, a utilização de um *headway* homogêneo entre os trens (Ferraz e Torres, 2004).

Diante dessa dificuldade, busca-se então cobrir as principais variações da demanda: horários de pico da manhã, vale diurno, pico da tarde/noite e vale noturno. Em algumas linhas específicas de sistemas metroviários, pode-se observar um maior carregamento ao meio dia, cabendo a verificação da necessidade de maior oferta.

Para determinar os horários de pico e vale, Ferraz e Torres (2004) aponta que utiliza-se o processo de “cobertura”, ou seja, ajusta-se a demanda dentro dos períodos de pré-estabelecidos e obtém-se a duração e o momento de transição entre esses horários.

Uma vez estabelecido os horários de pico e vale, Vuchic (2005) explica que é necessário determinar, a partir da demanda estabelecida (matriz O-D ajustada ao horário), o volume máximo demandado no sistema, conforme ilustrado na Figura 2.2, para permitir o dimensionamento da frota necessária.

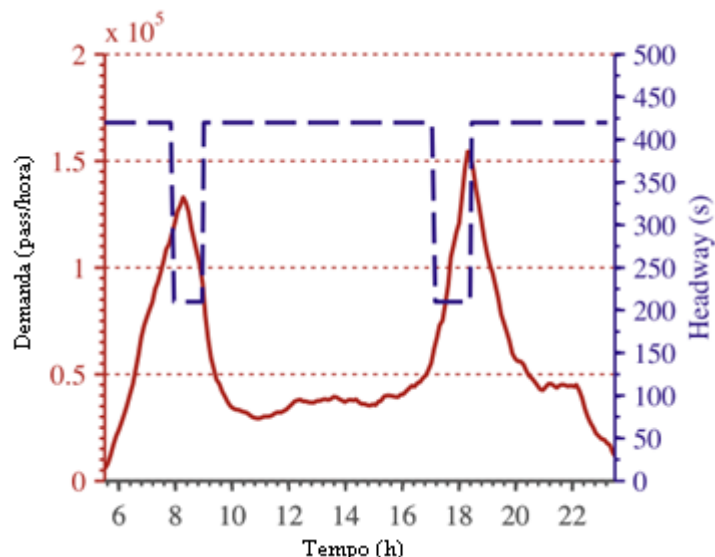


**Figura 2.2** – Determinação do maior volume ao longo do serviço (Vuchic, 2005).

Para determinar o quantitativo de trens para atendimento da demanda em cada horário de pico e vale, é necessário conhecer a capacidade nominal do trem. Essa informação é obtida a partir das características do trem a ser utilizado na linha. Em sequência, divide-se o maior volume obtido na análise anterior pela capacidade nominal do trem, resultando no quantitativo de trens necessários para o atendimento daquela demanda. Essa informação irá subsidiar o planejamento do quadro operacional e das rotinas de manutenção, pois determina o quantitativo de trens em operação necessários em cada período estabelecido.

A partir do quantitativo de trens, é possível calcular o *headway*, que será utilizado tanto pelo gerenciamento operacional quanto pela divulgação da prestação de serviços aos usuários. Sun

*et al.* (2014) indicam que em serviços metroviários confiáveis, o *headway* deve ser constante em todas as estações, atendendo a demanda de forma homogênea, conforme ilustrado na Figura 2.3:



**Figura 2.3** – Variação do *headway* em comparação com a demanda (Sun *et al.*, 2014).

Verifica-se, então, que o estudo da oferta determina o quantitativo de trens necessário para atendimento da demanda, bem como calcula o *headway*, que é utilizado no PCT e variável de entrada do PIIT.

## 2.2.4 PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS

O PCT é uma atividade essencial para a operação do transporte público metroviário. Ele é realizado desde a concepção do projeto da linha, quando são realizados os estudos iniciais de demanda e definidas as diretrizes para o dimensionamento a oferta, até o momento da operação comercial, quando são necessárias as ações de resposta imediata durante a prestação de serviço.

Para Maroti (2006), o planejamento da circulação de trens de passageiros em ferrovias<sup>6</sup> acontecem em quatro momentos distintos:

- Planejamento estratégico, com foco no plano de linhas, dimensionando a capacidade para atendimento da demanda no horizonte de vários anos (longo prazo);

---

<sup>6</sup> O autor trabalha com o conceito de ferrovias interestaduais da Alemanha. Apesar do planejamento da presente dissertação se referir à circulação de trens em sistemas metroviários urbanos, o trabalho apresenta semelhanças nos elementos utilizados para o desenvolvimento do planejamento.

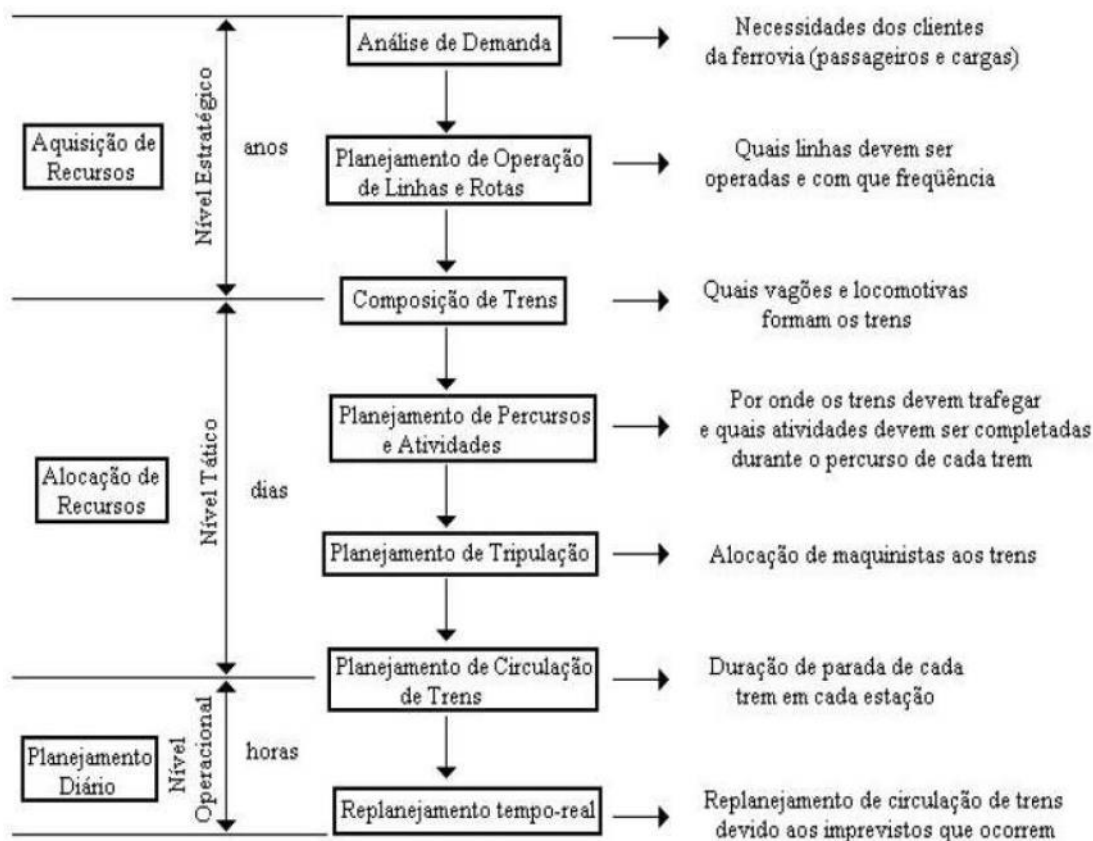
- Planejamento tático, com foco na alocação de recursos para prover a capacidade de transporte em um horizonte de dois meses a um ano (médio prazo);
- Planejamento operacional, com detalhamento do plano para a efetiva circulação dos trens na operação comercial, atendendo um horizonte de três dias a dois meses (curto prazo); e
- Planejamento imediato, que lida com a operação comercial propriamente dita, controlando a circulação de trens conforme o planejamento e atuação em ocorrências no sistema.

Nesse esquema de planejamento, o autor foca na circulação de trens assumindo que a oferta está equilibrada com a demanda. Essa linha de pesquisa faz sentido no planejamento ferroviário de passageiros *locus* de sua pesquisa, pois os tickets comercializados referem-se a assentos pré-determinados, ou seja, não haverá mais passageiros a serem transportados do que a capacidade nominal dos trens.

Tazoniero (2007) apresenta uma abordagem diferenciada para o planejamento da circulação, dividida em três níveis:

- Nível Estratégico: Análise da demanda e planejamento das linhas;
- Nível Tático: Planejamento dos percursos e tripulação;
- Planejamento Diário: Planejamento e replanejamento da circulação dos trens.

A **Figura 2.4** apresenta a sequência dos níveis apresentadas por Tazoniero (2007):



**Figura 2.4** – Níveis de Planejamento Ferroviário (Tazoniero, 2007).

O planejamento exposto pelo autor tem uma abordagem voltada para a avaliação da demanda e alocação de recursos, como trens e maquinistas. Apesar do foco do estudo apresentado pelo autor ser relativo a um sistema ferroviário interestadual, contando com via unária e baixo número de viagens (até uma viagem por hora), o PCT segue a lógica de dimensionamento da oferta com base na demanda e nas características do sistema, além de apresentar medidas para ajustes em caso de imprevistos durante a circulação dos trens.

### 2.2.5 PROGRAMA HORÁRIO DA OPERAÇÃO METROVIÁRIA

Programa Horário é o resultado do PCT. Nesse documento são registrados os pontos e horários de entrada e saída dos trens na operação comercial, orientando o corpo operacional sobre as estratégias de prestação de serviço.

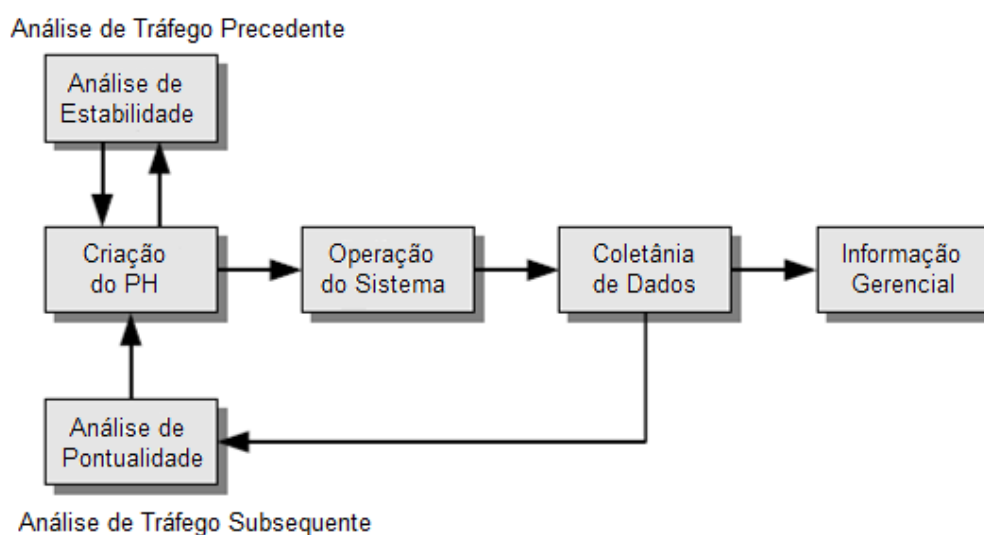
Para Meng *et al.* (2011), a programação horária é o principal elemento para a gestão da operação metroviária, que determina, principalmente, os momentos de entrada e saída dos trens na via principal e a sua permanência nas estações. O modelo de otimização da programação horária proposto pelos autores busca a definição ótima de entrada e saída de



trens com tempos de parada nas estações, gerando menor tempo de viagem e melhor nível de prestação de serviço.

Além da utilidade apontada para a operação comercial, o programa horário norteia diversos outras atividades, como: dimensionamento e escala de pessoal (operadores de trens, estações e controle); definição da disponibilidade de horários e equipamentos para atuação da manutenção; definição dos momentos críticos para acompanhamento da gerência; entre outros.

Goverde (2005) aponta que o planejamento reflete diretamente na pontualidade e estabilidade da circulação de trens. Nessa linha, é proposto um fluxo de realimentação (*feedback*) para o planejamento da circulação de trens. A Figura 2.5 apresenta o fluxo de criação e monitoramento do programa horário apresentado pelo autor:



**Figura 2.5** – Fluxo da criação e monitoramento do programa horário (modificado - Goverde, 2005).

Em complementação, Peeters (2003) indica que, devido a sua natureza complexa, o trabalho de planejamento da circulação de trens para a operação era realizado manualmente, com o suporte de *softwares* de esquematização (*design*).

Várias abordagens para a desenvolvimento do programa horário foram apresentadas ao longo do tempo, combinando fatores relevantes para o estudo de caso. As principais características dos sistemas metroferroviários consideradas para o desenvolvimento do programa horário são apresentados no Quadro 2.1:

**Quadro 2.1** – Elementos e Características consideradas no desenvolvimento do Programa Horário.

<b>Elemento</b>	<b>Características</b>
Via férrea	Via singela ou via dupla
Estações e pontos de prestação de serviço	Acesso sequencial (modelo metroviário) ou caminhos alternativos (modelo ferroviário interestadual);
Trens	Capacidade e Desempenho
Viagem	Viagens de curta duração ou urbanas e viagens de média e longa duração ou interestaduais e internacionais

Com relação ao objetivo do programa horário, estes se relacionam com o nível de serviço e custo da operação e podem ser destacados: Otimização do tempo de viagem; Otimização do tempo de espera nas estações ou baldeação; Otimização da eficiência energética; Otimização do uso dos trens; Otimização do percurso percorrido.

Desta forma, pode-se observar a importância do programa horário, que determina como a operação comercial irá ocorrer, além de nortear os trabalhos de planejamento de pessoal e manutenção do sistema metroviários.

### **2.2.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO**

O sistema metroviário, com suas características particulares, também é objeto de estudo com relação à avaliação de seu desempenho operacional e qualidade de serviço.

Para Yin *et al.* (2016), a qualidade da operação metroviária envolve uma série de indicadores para o gerenciamento do tráfego, incluindo o tempo total de atrasos, consumo e eficiência energética, conforto na viagem, entre outros.

Goverde (2005) informa que a associação de indicadores de desempenho pode permitir a identificação dos pontos críticos dos processos relativos a circulação de trens. Essa abordagem é atendida pelo sistema PETER (*Performance Evaluation of Timed Events in Railways* - Avaliação da Performance de Eventos Temporizados nas Ferrovias), que apresenta uma árvore de decisão com o objetivo de subsidiar os tomadores de decisão no aperfeiçoamento da programação dos trens e até mesmo na infraestrutura do sistema.

Wu *et al.* (2015) propõem indicadores de desempenho para permitir a medição da qualidade das soluções indicadas em seu trabalho. Os principais indicadores propostos são: Qualidade

no Ajuste da Programação, que compara o tempo total da programação em uso e aquela proposta pelo seu método; Tempo Médio de Espera, que indica o tempo entre as transferências no sistema; Dissimilaridade do Maior Tempo de Espera, que monitora o balanceamento dos maiores tempos de espera no sistema como um todo; e Indicador de Variância de Espera, que representa o nível do tempo de espera enfrentado pelos usuários.

Xin *et al.* (2014) estabelecem que a indicadores de desempenho também podem ser aplicados em sistemas simulados, antes de levar as soluções para a operação real. Nessa linha, os autores apontam que vários indicadores podem ser calculados, como tempo de viagem e consumo de energia, monitorando elementos como regimes de aceleração, de cruzeiro, de passagem e de frenagem, além de outros elementos como o desempenho da infraestrutura.

Andrade (2009) justifica a avaliação por meio de indicadores operacionais devido a necessidade de prestação de serviço de transporte de qualidade. Além disso, indicadores que buscam refletir a realidade da circulação de trens possibilitam a melhoria contínua da qualidade da prestação de serviço. Nessa linha, o autor propõe quatro grupos e subdivisões de indicadores, que são quantificáveis por medição direta, conforme o Quadro 2.2:

**Quadro 2.2** – Indicadores de qualidade de serviço metroviário (Andrade, 2009).

<b>DISPONIBILIDADE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integração com outros modais</li> <li>• Transferências dentro da rede</li> <li>• Freqüência do serviço</li> </ul>
<b>TEMPO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aderência à programação</li> <li>• Tempo de viagem</li> </ul>
<b>CONFORTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assentos e espaço pessoal</li> </ul>
<b>SEGURANÇA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Segurança contra acidentes</li> <li>• Segurança contra crimes</li> </ul>

Observa-se então que, para avaliação da prestação de serviço de transporte metroviário, pode ser selecionado indicadores a partir daqueles apresentados pela literatura, avaliando a eficiência do planejamento e desempenho do sistema.

### 2.3 MÉTODOS PARA DE PROGRAMAÇÃO DOS TRENS

Nessa sessão serão apresentados os estudos relacionados com o tema, trazendo um resumo de suas características e aplicações. Na análise dos trabalhos localizados, foi possível identificar três principais linhas de pesquisa: métodos de criação e otimização de tabela horária para atendimento da demanda buscando o menor tempo de viagem; modelos de otimização energética, por meio de regeneração dinâmica e perfil de condução do trem; e modelos que priorizam baldeações e integrações com demais modos de transporte.

Também serão apresentados outros estudos que tratam da circulação de trens, porém sem ligação direta com sistemas metroviários que funcionam com carrossel. Esses estudos demonstram que as soluções são desenhadas para sistemas específicos, sendo de difícil aplicação em outros operadores.

### **2.3.1 MÉTODOS DE CRIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE TABELA HORÁRIA PARA ATENDIMENTO DA DEMANDA BUSCANDO O MENOR TEMPO DE VIAGEM**

Para Goverde *et al.* (2016), o desempenho do sistema metroferroviário é altamente depende da qualidade do planejamento da circulação de trens e aponta que, apesar dos avanços matemático-computacionais no desenvolvimento do programa horário e diversas frentes de estudos acadêmicos, observa-se que, na prática, não há uma adoção generalizada dessas soluções. No seu estudo os autores apresentam uma estrutura de três níveis de planejamento e simulação do sistema metroferroviário:

- Nível microscópico, que busca precisão no detalhamento de tempo, velocidade e posição, considerando a dinâmica do trem, características de via e sistema de sinalização, e tem como objetivo avaliar a viabilidade e estabilidade da circulação de trens;
- Nível macroscópico, que analisa a rede de forma agregada, apresentando apenas os elementos que compõem a programação horário dos trens (estações e trechos entre estações), e tem como objetivo avaliar e otimizar o tempo de viagem na rede como um todo; e
- Nível mesoscópico, que considera um detalhamento intermediário, que simplifica a dinâmica do trem, considerando apenas sua posição em função do tempo, e tem como objetivo a otimização da circulação entre as estações.

A partir dessa estrutura, os autores propõem um algoritmo iterativo que suporta todos os níveis apresentados, obtendo resultados a serem utilizados na programação da circulação dos trens.

Por outro lado, Sels (2016) direciona sua pesquisa para a solução do *Train Timetabling Problem* (TTP) a nível macroscópico, cujo objetivo é determinar o tempo de chegada e partida de cada trem em cada estação do sistema, em toda rede metroferroviária belga. O autor aponta que sistemas comerciais não suportam a rede necessária e que trabalhos acadêmicos anteriores poderiam realizar a tarefa, porém sem o detalhamento necessário e não contemplavam pequenos e recorrentes atrasos. Desta forma, foi proposto um modelo computacional robusto, que permitiu calcular 196 horas de planejamento do sistema ferroviário da Bélgica em aproximadamente 2 horas de processamento, com redução do tempo de espera dos passageiros em 3,8%.

Já Wang e Goverde (2016) pontuam que a otimização da circulação de trens deve procurar obter o perfil de velocidade ideal para a operação segura, pontual e confortável dos trens. Seu trabalho estuda a circulação de trens considerando as restrições gerais de operação, bem como as restrições de segurança impostas pela sinalização da via.

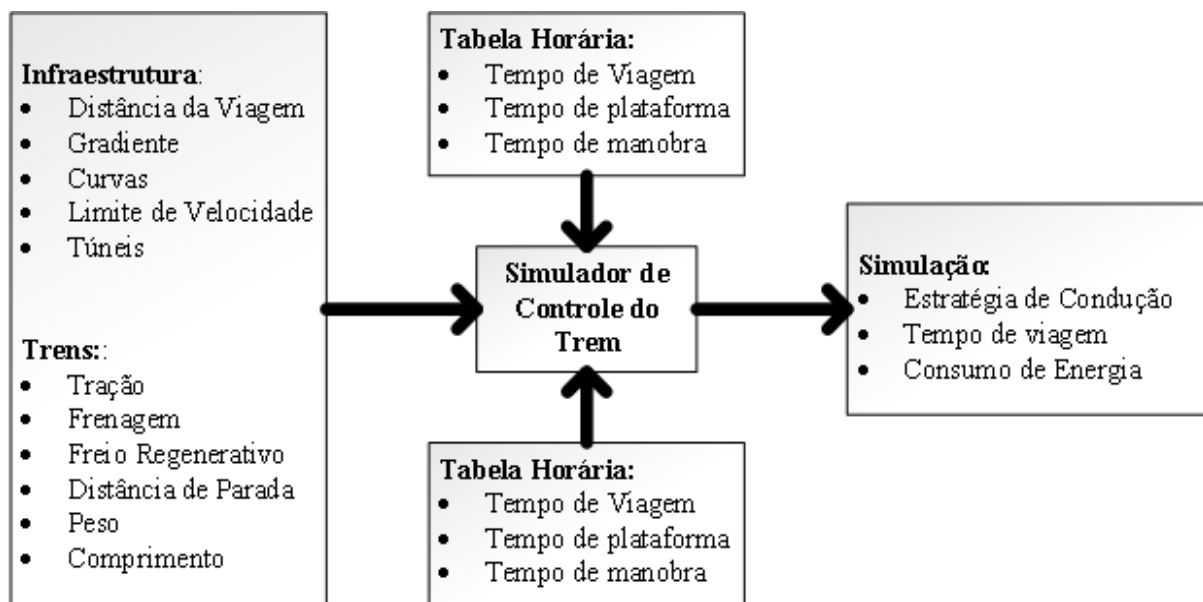
Sun *et al.* (2014) assumem que, devido aos recentes sistemas de bilhetagem automática, com uso de *smartcard*, é possível levantar a demanda temporal de viagem dos usuários com precisão, e, a partir desses dados, promover um planejamento mais eficiente ao longo do dia, melhor identificando os horários de pico e vale da operação. Desta forma, o autor propôs três métodos de otimização: a) o primeiro método para o desenvolvimento de tabelas-horária dinâmica (utilizando os dados do sistema de bilhetagem automática); b) o segundo método como uma extensão do primeiro, incluindo restrições de operação do sistema, como a capacidade dos trens; e c) o terceiro método é o desenvolvimento de tabela horária responsiva a demanda dos horários de pico e vale.

Conforme apresentado, os métodos de planejamento otimizam a circulação de trens, por meio da avaliação dos tempos de percurso e parada nas estações para a prestação de serviço, buscando o menor tempo de viagem e com atendimento das necessidades de viagem dos usuários. Para tanto, os autores realizaram estudos, em vários níveis de detalhamento (micro, meso e macroscópico) e utilizando diversas fontes de informação (características da via e dos trens, demanda de usuários, entre outras) a fim de obter o melhor desempenho dos sistemas.

### **2.3.2 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA, POR MEIO DE REGENERAÇÃO DINÂMICA E PERFIL DE CONDUÇÃO DO TREM**

Para Liu *et al.* (2017), a conservação de energia se tornou prioridade no sistema de transporte urbano sobre trilhos, visto que o custo da energia representa cerca de 50% do custo total da operação. A energia cinética dos trens pode ser convertida em energia elétrica por meio de freios regenerativos e retransmitida a rede do sistema metroviário para ser utilizada na tração dos demais trens, e os autores propuseram um algoritmo que procura sincronizar o momento de frenagem de um trem próximo a uma estação com a partida de outro trem, otimizando o aproveitamento da energia regenerada.

Em complementação, Su *et al.* (2016) afirmam que parte da energia regenerada pelo sistema de freio dinâmica pode ser utilizada pelo próprio trem, armazenada em sistemas específicos a bordo, e parte transmitida de volta para ser aproveitada por outros trens. No seu trabalho, os autores apresentaram um método que consistiu em um algoritmo combinado com simulação que considera várias as características da infraestrutura, dos trens, da tabela horária que atenda a demanda e do carregamento dos trens, trazendo como resultado as estratégias a serem tomadas, bem como o consumo de energia e o tempo de viagem, conforme apresentado na Figura 2.6:



**Figura 2.6** – Método para simulação de otimização energética (Su *et al.*, 2016).

Na mesma linha, Huang *et al.* (2016) apontam que, devido à elevação do custo da energia, existe um crescente esforço para otimizar a circulação de trens em função do consumo energético. A sua pesquisa é direcionada para métodos que reduzem o gasto de energia que, além de considerar a regeneração de energia pelo sistema de freio dinâmico, também estuda outros componentes, como o fluxo de passageiros e sistemas auxiliares.

Su *et al.* (2013) também afirmam que o aumento do custo da energia elétrica e das preocupações ambientais leva aos operadores de sistemas metroviários a adotar técnicas que reduzem os custos e consumo de energia. Porém, seu trabalho tem como foco a avaliação dos níveis de aceleração e velocidade, levando em consideração aspectos técnicos como variação do relevo e distância do alimentador. Desta forma, os autores apresentam um algoritmo que propõem um perfil de condução do trem, otimizando a velocidade e aceleração a fim de promover a redução do consumo energético.

A partir das pesquisas levantadas, verifica-se que é crescente a preocupação com o consumo energético dos sistemas de transporte sobre trilhos. A principal frente de trabalho é a otimização da circulação de trens para permitir o aproveitamento ideal da energia regenerada a partir do sistema de freio dinâmico. Além disso, também é considerada a otimização do modo de condução de trens e sistemas auxiliares. Desta forma, verifica-se que a otimização dos sistemas pode trazer benefícios no consumo energético das operadoras metroferroviárias.

### 2.3.3 MÉTODOS QUE PRIORIZAM BALDEAÇÕES E INTEGRAÇÕES COM DEMAIS MODOS DE TRANSPORTE

Com o crescimento dos aglomerados urbanos, os sistemas de transporte tendem a ficar cada vez mais complexos, com diversas linhas na rede metroferroviária, e que possuem sua capilaridade expandida por ônibus ou transporte ativo.

Huang *et al.* (2017) explicam que as transferências entre linhas são o gargalo dos sistemas metroferroviários, oferecendo riscos de segurança e ineficiência na operação. Desta forma, os autores propõem um método usando algoritmo heurístico que otimizam a chegada e partida das estações, sincronizando-os conforme as necessidades de baldeação, considerando inclusive o tempo de deslocamento dos usuários entre as plataformas. No seu estudo de caso, em um sistema com cinco linhas e treze estações de baldeação, a aplicação do método resultou em uma melhora na eficiência nas baldeações na ordem de 22%.

Para Guo *et al.* (2017), a programação horária deve ser realizada de modo a sincronizar os tempos de chegada dos trens nas estações para permitir a conexão entre as linhas. Seu estudo apresenta um algoritmo focado na transição entre os horários de pico e vale, quando o intervalo entre trens é alterado e a demanda de viagens dos usuários varia de forma significativa. O método proposto utiliza programação não-linear inteira para gerar as tabelas horárias e *Particle Swarm Optimization and Simulated Annealing* (PSO-SA) para obter soluções otimizadas. Os autores também realizam um estudo de caso na rede metroviária de Pequim para avaliar a eficácia do método em situações reais, obtendo-se como resultado a diminuição do tempo de viagens dos usuários.

Já Kang e Zhu (2016) apresentam estudo sobre um algoritmo para a programação dos últimos trens em serviço, com o objetivo de permitir uma eficiente baldeação dos usuários no final na operação do sistema. Para atingir esse objetivo, os autores propuseram métodos que minimizam o tempo e otimizam as baldeações nos últimos trens, usando algoritmo heurístico para solucionar o problema. Foi realizado um estudo de caso no metro da cidade de Pequim, a aplicação dos métodos propostos resultou em uma melhora de 9,9% na velocidade das viagens dos últimos trens daquele sistema.

Com outro foco, Shen e Wang (2016) abordam a baldeação entre o sistema metroviário e ônibus alimentadores. Seu trabalho consiste na apresentação de um algoritmo que, a partir dos tipos de chegada na estação e do programa horário existente para os trens, define os horários dos ônibus para otimização da integração dos sistemas.

De forma mais específica Wang *et al.* (2013) apresentam, em seu estudo, um método para determinar a migração de usuários em serviços de baldeação em uma plataforma. Os autores utilizaram o software Anylogic para simular o comportamento das transferências e

concluíram que o número de usuários realizando a baldeação cai a cada 30 segundo de espera, até atingir o seu mínimo após 150 segundo de espera.

Com base nos estudos identificados, verifica-se a atenção dispensada nos sistemas metroviários complexos, que possuem rede com diversas linhas de serviços e integradas com outros modos de transporte. Nessa linha, para melhorar a eficiência dos sistemas metroviários, os estudos propõem métodos para otimizar o tempo de baldeação entre linhas metroferroviárias e outros modos alimentadores.

### 2.3.4 DEMAIS MÉTODOS E ALGORITMOS OBSERVADOS NA LITERATURA

Além dos trabalhos analisados, o Quadro 2.3 apresenta outros que, apesar de trazerem algoritmos relativo à circulação de trens, não estão vinculados com o tema, pois tratam de sistemas ferroviários em via singela ou de baixa frequência, não relacionados com metrô urbanos.

**Quadro 2.3** – Listagem dos algoritmos

<b>Autor</b>	<b>Método</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Resumo</b>	<b>Comentários</b>
Anderegg <i>et al.</i> , 2003	Algoritmo para minimizar o número de trens dado um cronograma de circulação, considerando as viagens com passageiros e viagens de manutenção.	Sistema ferroviário interestadual, com estudo de caso para aplicação na companhia ferroviária Deutsche Bahn e Swiss Federal Railway.	Existem diversos métodos matemáticos para a finalidade, porém nenhum com aplicação prática, devido ao número de variáveis e tempo de processamento. O algoritmo proposto é intermediário e semiautomático, que simplifica as variáveis ao ponto de torna-las processáveis, porém com flexibilidade para ajustes.	O algoritmo proposto tem como objeto sistemas ferroviários com serviço já determinado nas estações.
Peeters, 2003	Modelo matemático para construção de tabela horária para trens com horários fixos (30min, 1h, 2h, etc.).	Sistema ferroviário interestadual e internacional europeu.	O autor propõe um método matemático para otimização do programa horário para sistemas ferroviários cíclicos, com o objetivo de tornar o sistema robusto e previsível para os usuários.	O método proposto é direcionado às ferrovias com intervalo alto e viagens longas, e apresenta premissas sobre infraestrutura e trens.



<b>Autor</b>	<b>Método</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Resumo</b>	<b>Comentários</b>
Tazoniero, 2007	Algoritmos para o planejamento de trens ferroviários em tempo real.	Sistemas ferroviários de via singela, calculando, em tempo real, alternativas para interferências que alterem a programação original.	O trabalho propõe algoritmos para o planejamento em tempo real, para a decisão de preferência dos trens em circulação em uma via singela.	O algoritmo se aplica ao planejamento em via singela e apresenta níveis de planejamento de curto, médio e longo prazos.
Li <i>et al.</i> , 2013	Algoritmo não linear de programação construção de modelo de roteamento de trens.	Sistema ferroviário interestadual no leste chinês.	O artigo propõe um algoritmo matemático para o roteamento de trens em uma rede com diversos caminhos possíveis, para atender a uma demanda pré-definida. O artigo compara o tempo de processamento com outros algoritmos propostos em estudos anteriores.	O algoritmo se aplica em roteamento de trens em uma rede com diversos caminhos alternativos.
Pereira, 2015	Modelo matemático para circulação de trens em uma ferrovia de via singela.	Ferrovia Centro Atlântica (FCA).	Com o aumento da demanda de transporte ferroviário de cargas e o alto custo de implantação e ampliação das linhas existentes, a otimização da malha existente é uma alternativa para acompanhar a crescente demanda. O modelo proposto utiliza algoritmo para reduzir o <i>transit time</i> dos trens na via.	O algoritmo se aplica ao planejamento de trens de carga em via singela.
Pouryousef e Lautala 2015	Abordagem híbrida utilizando o RTC, software de simulação desenvolvido na Europa.	Sistema ferroviário norte-americano.	O RTC foi criado para otimizar o uso da malha ferroviária europeia, porém o autor investiga se a abordagem desse software se aplica a malha ferroviária menos estruturada existente no EUA.	A abordagem refere-se à aplicação de métodos para sistemas ferroviários a nível nacional.

Desta forma, resta demonstrado a especialização dos estudos realizados, que apresentam métodos desenhados conforme a necessidade específica do estudo de caso, tornando complexa a aplicação da solução em outros ambientes.

## 2.4 TÓPICO CONCLUSIVO

Conforme apresentado na revisão da literatura, os sistemas metroviários são complexos, possuindo diversos subsistemas, que devem ser considerados no planejamento da sua prestação de serviço de transporte.

A revisão do material identificado apontou que, apesar dos trabalhos apresentarem soluções eficientes para a definição da circulação de trens, o foco é variado e os métodos estudados são de difícil aplicação, pois demandam pessoal especializado e/ou equipamentos e softwares específicos. Além disso, ajustes nos métodos ou variáveis de entrada são sempre necessários, pois os estudos de caso são realizados em sistemas específicos, que trazem uma complexidade ainda maior na sua aplicação.

Desta forma, os autores apontaram que os trabalhos disponíveis não são aplicáveis diretamente em sistemas metroviários que necessitam otimizar sua operação, o que leva operadores a adotar soluções com base na experiência de seus profissionais.

Em conclusão, a pesquisa demonstrou a lacuna entre os estudos e sua aplicação em situações reais, justificando o presente trabalho. Além disso, os trabalhos nortearam o desenvolvimento do método, auxiliando a discriminação das variáveis de entrada e saída, premissas e avaliação dos resultados.

### **3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA INJEÇÃO DE TRENS METROVIÁRIOS UTILIZANDO ALGORITMO LÓGICO-INTERATIVO**

#### **3.1 APRESENTAÇÃO E CONSIDERAÇÕES**

O método proposto foi desenvolvido a partir da necessidade de aperfeiçoamento da injeção de trens em sistemas metroviários que utilizam a gestão por carrossel, com base na experiência do autor na execução do serviço e no resultado da pesquisa aqui realizada.

O objetivo do método é a montagem do carrossel de forma ótima, com o menor tempo possível entre o primeiro trem injetado e o horário de início da operação, conforme as características físicas do sistema, apresentadas no nível mesoscópico, a demanda de viagem dos usuários e as restrições e particularidades do operador.

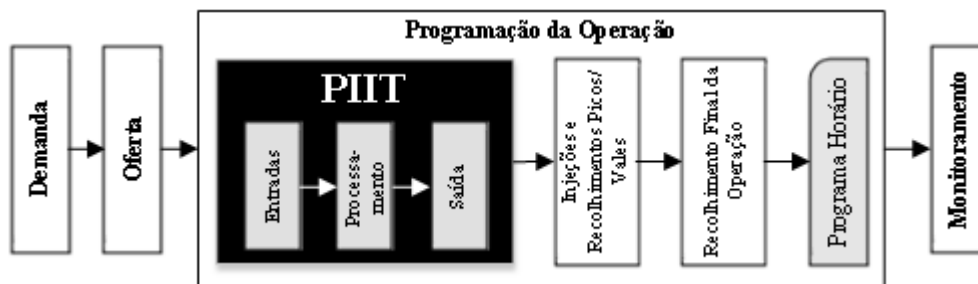
A partir da utilização do método, espera-se uma melhora no nível de serviço prestado pelo operador metroviário, pois poderá ser observada o atendimento dos parâmetros operacionais como número de trens em circulação e *headway* de forma otimizada.

As premissas que nortearam o desenvolvimento do método foram: i) procedimento simplificado, que não requer pessoal especializado e poderá ser utilizado a partir da leitura do método; e ii) a utilização de ferramentas computacionais simples, como planilhas eletrônicas em seu nível básico.

Serviram como inspiração para a criação do algoritmo os trabalhos lógicos interativos de Clark-Wright, que tem como objetivo o aperfeiçoamento da roteirização logística, e de Floyd-Warshall, que busca o caminho mínimo entre os pares de vértices em uma rede. Os trabalhos mencionados não foram objeto de aplicação direta devido a não especialização dos mesmos ao problema em questão.

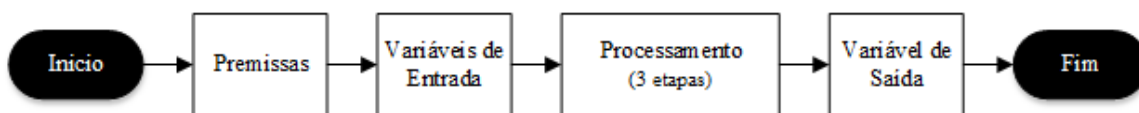
Ressalta-se que o método aqui apresentado pode ser aplicado a diversos sistemas metroferroviários ou mesmo em outros sistemas de transporte, desde que utilizem a circulação em carrossel e *headway* fixo.

Conforme apresentado no Capítulo 1, o PIIT está contido no PCT e, juntamente com o planejamento das demais fases da operação, compõem o Programa Horário, conforme apresentado na Figura 3.1:



**Figura 3.1** – Posição do PIIT dentro do PCT.

Neste capítulo, serão apresentadas as premissas para utilização do método, que é composto por: observação das premissas; variáveis de entrada; variável de saída e processamento do algoritmo, a fim de atender a lógica de execução, conforme apresentado na Figura 3.2:

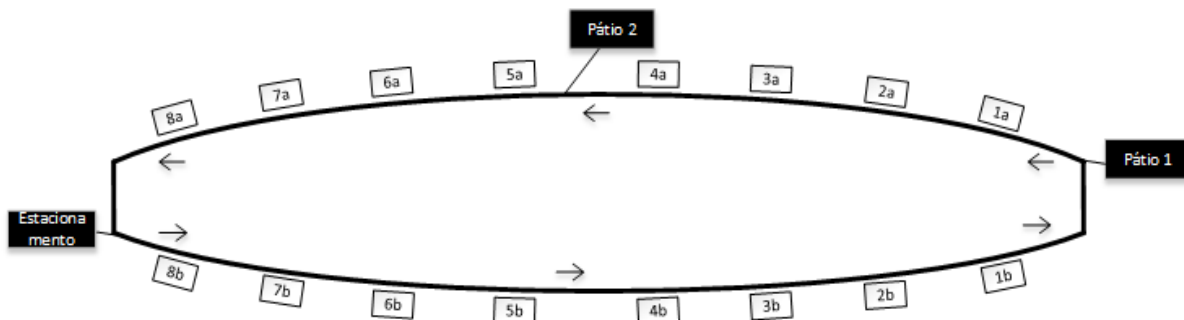


**Figura 3.2** – Lógica de Execução do Método Proposto.

Além disso, será apresentada uma forma de avaliação por meio de indicadores de desempenho, a fim de permitir a comparação da matriz de injeção de trens resultante do processamento do método com outras propostas de injeção de trens.

### 3.2 LINHA HIPOTÉTICA

Para demonstrar a utilização do método, foi criada uma Linha Hipotética de serviço metroviário, com dados fictícios, permitindo uma melhor compreensão da execução da lógica do algoritmo, conforme demonstrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** – Linha Hipotética, a ser utilizada na demonstração de aplicação do Método.

A Linha Hipotética conta com 8 estações, dois pátios, situados antes da estação 1 e da estação 5, e um estacionamento limitado a dois trens, situado em paralelo à área de manobra da estação 8. Os demais dados a serem utilizados são apresentados no APÊNDICE III – Dados da Linha Hipotética de serviço metroviário.

### 3.3 PREMISSAS PARA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO

A fim de permitir a utilização do método, são necessários resultados de estudos prévios ao PCT, entre eles i) Avaliação da Demanda e Ajuste da Oferta, ii) Análise Mesoscópica e iii) Critérios do Operador do sistema.

#### i) Avaliação da Demanda e Ajuste da Oferta

Os estudos relativos à demanda, apresentados no item 2.2.2, consistem de pesquisas e observações com o objetivo de identificar o quantitativo de viagens dos habitantes de uma determinada região.

Uma vez estabelecida a demanda, passa-se ao estudo da oferta, discutidos no item 2.2.3, quando são consideradas as características do sistema metroviário, a fim de determinar os parâmetros que alimentaram o algoritmo proposto.

#### ii) Análise Mesoscópica

Também é considerada como premissa a análise mesoscópica da circulação de trens, para que seja possível determinar a posição do carrossel e as distâncias dos pontos do sistema em relação aos locais de estacionamento, em escala de tempo.

O resultado da análise mesoscópica a ser utilizado é a Matriz Posição/Tempo, que apresenta, de forma sintetizada, o descolamento de uma viagem, registrando-se os tempos na passagem do trem de cada marco da via (estações, pontos de referência e de parada, locais de entrada e saída dos estacionamentos, entre outros). Vale ressaltar que, para manter uma determinada precisão e permitir o processamento do PIIT, o tempo registrado não deve se apresentar de forma superior a um terço do menor *headway* determinado no estudo de oferta.

A obtenção desses dados pode ocorrer por meio de coleta de dados *in loco*, observando-se a posição do trem na via, conforme a escala de tempo e com base em uma viagem típica, registrando-se a Matriz Posição/Tempo. Esses mesmos dados também podem ser adquiridos por meio de resultado de simulação, utilizando-se os valores determinados em estudos relativos ao desenho do sistema de controle e proteção, conforme apresentado no item 2.2.1.

### iii) Critérios do Operador

Os Critérios do Operador são premissas determinadas pelo conjunto de características da empresa, entre elas: horário de início da operação, quantitativo de trens em cada ponto de entrada e outros critérios de operação, que podem ser incluídos sob demanda, como por exemplo intervalo entre injeções nos pontos de entrada e pelo operador. Esses intervalos consideram que, devido ao desenho do sistema, não é possível injetar trens simultaneamente pelo mesmo local ou que o operador realize a comunicação com múltiplos trens ao mesmo tempo.

Ressalta-se que o método foi desenhado para considerar os limites do operador, pois esse conjunto de critérios impacta diretamente no resultado do planejamento resultante.

A partir dessas informações, passa-se a descrever as variáveis de entrada e seu formato, a fim de alimentar o presente algoritmo.

## 3.4 VARIÁVEIS DE ENTRADA

As variáveis de entrada são as informações que alimentarão o processamento do algoritmo, e devem ser apresentadas com formatação adequada para sua utilização.

A partir dos estudos de demanda e oferta se extrai o **Quantitativo de Trens**, que indica o número de trens necessários para atender ao desejo de viagem dos usuários, conforme demonstrado na Equação 3.1:

$$Q_T = f(D) \quad 3.1$$

Onde:

$Q_T$ : Quantitativo de Trens;

$D$ : Demanda de viagens

O **Headway** é o intervalo entre os trens em serviço, sendo obtido a partir do Quantitativo de Trens e do Tempo de Viagem, conforme demonstrado na Equação 3.2:

$$H = f(Q_t, TV) \quad 3.2$$

Onde:

$H$ : Headway;

$Q_t$ : Quantitativo de Trens;

$TV$ : Tempo de Viagem, que apresenta o tempo total de percurso até o ponto de partida, completando um ciclo no sistema.

A partir do resultado da análise mesoscópica, tem-se a **Matriz Posição/Tempo**, que representa os marcos e tempo ao longo da via. Essa matriz representa, de forma linear, o tempo em função da posição do trem na via férrea, conforme os marcos considerados, conforme demonstrado na Equação 3.3. Importante ressaltar que essa matriz deve formar um *loop* pela via férrea, ou seja, apresentar todo o caminho que o trem percorrerá até chegar ao ponto de partida:

$$M^{P,t}_{0..n} = \begin{bmatrix} P_0 & T_0 \\ P_1 & T_1 \\ \dots & \dots \\ P_n & T_n \end{bmatrix} \quad 3.3$$

Onde:

$M^{P,t}$ : Matriz Posição/Tempo;

$P_n$ : Posição  $n$  do trem na via férrea;

$T_n$ : Tempo entre o ponto  $(n - 1)$  e o ponto  $n$ .

Apresenta-se a **Tabela 3.1**, para demonstrar o formato da Matriz Posição/Tempo a partir dos dados da Linha Hipotética:

**Tabela 3.1** – Matriz Marcos/Tempo.

Marcos	Tempo (seg)
<b>Pátio 1</b>	
Marco 1	0
Estação 1a	70
Marco 2	65
Estação 2a	45
Marco 3	75
Estação 3a	55
Marco 4	70
Estação 4a	55
Marco 5	60
<b>Pátio 2</b>	
Estação 5a	55
Marco 6	50
Estação 6a	65
Marco 7	50
Estação 7a	55
Marco 8	60
Estação 8a	45
Marco 9	60
<b>Estacionamento</b>	
Estação 8b	65
Marco 10	70
Estação 7b	45
Marco 11	60
Estação 6b	50
Marco 12	65
Estação 5b	75
Marco 13	55
Estação 4b	60
Marco 14	65
Estação 3b	60
Marco 15	65
Estação 2b	60
Marco 16	55
Estação 1b	60
Marco 1	75

Onde:

*Marcos*: é o marco ao longo da via férrea. A listagem de marcos deve formar um *loop* pela via férrea, contemplando todo caminho a ser percorrido pelo trem;

*Tempo*: é o tempo que um trem leva para percorrer o espaço entre o Marco anterior e o Marco atual, expresso em segundos;

A partir dos parâmetros de prestação de serviço adotados pelo operador, tem-se as variáveis **Horário de Início da Operação** e **Quantitativo de Trens em Cada Local de Entrada**, apresentadas nas Equações 3.4 e 3.5, respectivamente:



$$H_{io} = f(P_o) \quad 3.4$$

Onde:

$H_{io}$ : Horário de Início da Operação;

$P_o$ : Parâmetro do Operador.

$$Q_T^{LE} = f(P_o) \quad 3.5$$

Onde:

$Q_T^{LE}$ : Quantitativo de Trens em cada Local de Entrada;

$P_o$ : Parâmetro do Operador.

Além dessas variáveis, também se tem os critérios de operação que serão adotados: **Intervalo entre Injeções nos Locais de Entrada** e **Intervalo entre Injeções pelo Operador**, apresentadas nas Equações 3.6 e 3.7 respectivamente:

$$I_{LE} = f(P_o) \quad 3.6$$

Onde:

$I_{LE}$ : Intervalo entre Injeções nos Locais de Entrada;

$P_o$ : Parâmetro do Operador.

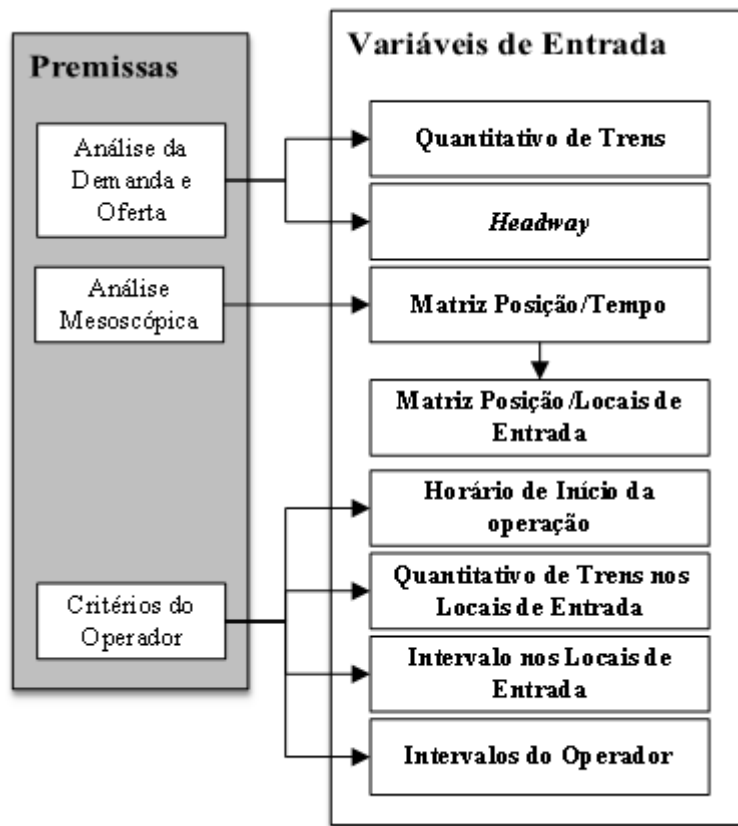
$$I_o = f(P_o) \quad 3.7$$

Onde:

$I_o$ : Intervalo entre Injeções pelo Operador;

$P_o$ : Parâmetro do Operador.

Desta forma, tem-se um conjunto de variáveis a serem utilizadas, a partir das premissas descritas, e está representado de forma esquematizada na Figura 3.4:



**Figura 3.4** – Premissas e Variáveis de Entrada do Método.

### 3.5 VARIÁVEIS DE SAÍDA

Como resultado do algoritmo, tem-se a **Matriz de Injeções**, composta por Identificação do Trem, Horários e Locais de Entrada. Essa matriz indica de qual local e a que momento o trem deve ser injetado, a fim de atender a demanda de viagens dos usuários, conforme demonstrado na Equação 3.8:

$$M^{T,H,LE}_{0..n} = \begin{bmatrix} T_0 & H_0 & LE_0 \\ T_1 & H_1 & LE_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ T_n & H_n & LE_n \end{bmatrix} \quad 3.8$$

Onde:

$M^{T,H,LE}$ : Matriz Marcos/Tempo;

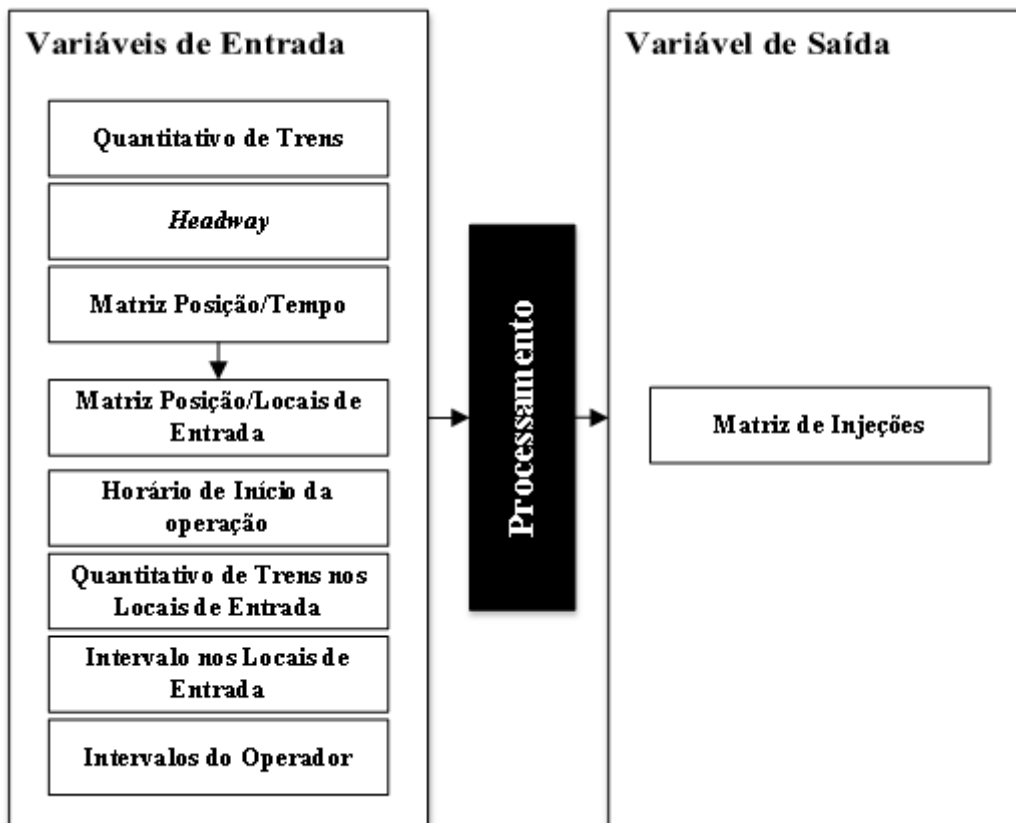
$T_n$ : Identificação do Trem  $n$ .

$H_n$ : Horário de injeção do Trem  $n$ .

$LE_n$ : Local de Entrada do Trem  $n$ ;

Essa matriz contém as informações que deverão ser agregadas ao Programa Horário, que indicará toda a estratégia da operação comercial, e norteará o trabalho de planejamento das escalas de pessoal e da manutenção dos sistemas, conforme apresentado no item 2.2.5.

Tem-se, então, o conjunto de variáveis de entrada e saída do algoritmo, representadas de forma esquematizada na Figura 3.5:



**Figura 3.5** – Variáveis de Entrada e Saída do Método.

### 3.6 PROCESSAMENTO DO ALGORITMO LÓGICO-INTERATIVO

O processamento do algoritmo ocorre em três etapas:

- Etapa 1. Construção da Matriz Marcos/Locais de Entrada;
- Etapa 2. Construção da Matriz Horários de Injeção; e
- Etapa 3. Interação para determinar os Locais e Horários de Injeção.

### 3.6.1 ETAPA 1 - CONSTRUÇÃO DA MATRIZ MARCOS/LOCAIS DE ENTRADA

A **Matriz Marcos/Locais de Entrada** é construída a partir da Matriz Marcos/Tempo e apresenta: a) o tempo entre cada marco considerado em relação aos locais de entrada; e b) a indicação da ordem das regiões atendidas pelos locais de entrada.

Os locais de entrada são pontos na via onde os trens permanecem até serem injetados para a prestação de serviço de transporte, e podem ser apresentar como pátios, estacionamentos ou prolongamentos de via.

A esquematização da Matriz Marcos/Locais de Entrada é demonstrada na Equação 3.9:

$$M^{P,LE_1,LE_2..LE_m}_{0..n} = \begin{bmatrix} P_0 & O^{LE} & t^{LE_1}_{P_0} & t^{LE_2}_{P_0} & \dots & t^{LE_m}_{P_0} \\ P_1 & O^{LE} & t^{LE_1}_{P_1} & t^{LE_2}_{P_1} & \dots & t^{LE_m}_{P_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_n & O^{LE} & t^{LE_1}_{P_n} & t^{LE_2}_{P_n} & \dots & t^{LE_m}_{P_n} \end{bmatrix} \quad 3.9$$

Onde:

$M^{P,LE_1,LE_2..LE_m}$ : Matriz Marcos/Locais de Entrada;

$LE_m$ : Local de Entrada  $m$ ;

$P_n$ : Marco  $n$  do trem na via férrea;

$O^{LE}$ : Ordem do Local de Entrada;

$t^{LE_m}_{P_n}$ : Tempo entre o Local de Entrada  $m$  e o Marcos  $n$  do trem na via férrea.

A coluna Ordem do Local de Entrada é a indicação da ordem de prioridade no atendimento da região entre os locais de entrada. As regiões são o espaço compreendido entre os locais de entrada adjacentes, sendo calculado como a distância temporal entre os pontos de entrada e saída, somando-se o tempo de cada Marco na região, conforme exemplificado na Figura 3.6:

Matriz Marcos/Locais de Entrada		
Marcos	Ordem	Tempo (seg)
<b>Pátio 1</b>		
Marco 1		0
Estação 1a		70
Marco 2		65
Estação 2a		45
Marco 3	2	75
Estação 3a		55
Marco 4		70
Estação 4a		55
Marco 5		60
<b>Pátio 2</b>		
Estação 5a		55
Marco 6		50
Estação 6a		65
Marco 7	3	50
Estação 7a		55
Marco 8		60
Estação 8a		45
Marco 9		60
<b>Estacionamento</b>		
Estação 8b		65
Marco 10		70
Estação 7b		45
Marco 11		60
Estação 6b		50
Marco 12		65
Estação 5b		75
Marco 13	1	55
Estação 4b		60
Marco 14		65
Estação 3b		60
Marco 15		65
Estação 2b		60
Marco 16		55
Estação 1b		60
Marco 1		75

**Figura 3.6** – Demonstração do Cálculo da Ordem.

O conteúdo de cada uma das colunas  $t^{LEm}_{P_n}$  é o tempo que um trem leva para percorrer o espaço entre o Marco daquela linha e o Pátio ou Estacionamento. Tem-se, como resultado, a distância temporal dos Locais de Entrada até cada Marco na via, conforme exemplificado na **Figura 3.7**:

Matriz Marcos/Locais de Entrada					
Marcos	Ordem	Tempo (seg)	Pátio 1 (seg)	Pátio 2 (seg)	Estac. 1 (seg)
<b>Pátio 1</b>					
Marco 1		0	0		
Estação 1a		70	70	0+70=70	
Marco 2		65	135		
Estação 2a		45	180	135+45=180	
Marco 3		75	255		
Estação 3a		55	310		
Marco 4		70	380		
Estação 4a		55	435		
Marco 5		60	495		
<b>Pátio 2</b>					
Estação 5a		55	550	55	
Marco 6		50	600	105	55+50=105
Estação 6a		65	665	170	
Marco 7		50	715	220	170+50=220

**Figura 3.7** – Demonstração do Cálculo dos Locais de Entrada.

Apresenta-se a Tabela 3.2, para exemplificar a Matriz Marcos/Locais de Entrada preenchida, a partir dos dados da Linha Hipotética:

**Tabela 3.2 – Matriz Marcos/Locais de Entrada.**

Marcos	Ordem	Tempo (seg)	Pátio 1 (seg)	Pátio 2 (seg)	Estac. 1 (seg)
<b>Pátio 1</b>					
Marco 1	2	0	0	1425	985
Estação 1a	2	70	70	1495	1055
Marco 2	2	65	135	1560	1120
Estação 2a	2	45	180	1605	1165
Marco 3	2	75	255	1680	1240
Estação 3a	2	55	310	1735	1295
Marco 4	2	70	380	1805	1365
Estação 4a	2	55	435	1860	1420
Marco 5	2	60	495	1920	1480
<b>Pátio 2</b>					
Estação 5a	3	55	550	55	1535
Marco 6	3	50	600	105	1585
Estação 6a	3	65	665	170	1650
Marco 7	3	50	715	220	1700
Estação 7a	3	55	770	275	1755
Marco 8	3	60	830	335	1815
Estação 8a	3	45	875	380	1860
Marco 9	3	60	935	440	1920
<b>Estacionamento</b>					
Estação 8b	1	65	1000	505	65
Marco 10	1	70	1070	575	135
Estação 7b	1	45	1115	620	180
Marco 11	1	60	1175	680	240
Estação 6b	1	50	1225	730	290
Marco 12	1	65	1290	795	355
Estação 5b	1	75	1365	870	430
Marco 13	1	55	1420	925	485
Estação 4b	1	60	1480	985	545
Marco 14	1	65	1545	1050	610
Estação 3b	1	60	1605	1110	670
Marco 15	1	65	1670	1175	735
Estação 2b	1	60	1730	1235	795
Marco 16	1	55	1785	1290	850
Estação 1b	1	60	1845	1350	910
Marco 1	1	75	1920	1425	985

Onde na Matriz Marcos/Tempo:

*Marcos:* é o marco ao longo da via férrea. A listagem de marcos deve formar um *loop* pela via férrea, contemplando todo caminho a ser percorrido pelo trem;

*Ordem:* É a ordem do Local de Entrada;

*Tempo:* é o tempo que um trem leva para percorrer o espaço entre o Marco anterior e o Marco atual, expresso em segundos;

E na Matriz Marcos/Locais de Entrada:

*Pátio 1, Pátio 2 e Estacionamento 1:* É o tempo que um trem leva para percorrer o espaço entre o Marco atual e o Pátio ou Estacionamento da coluna, expresso em segundos.

### 3.6.2 ETAPA 2 - CONSTRUÇÃO DA MATRIZ HORÁRIOS DE INJEÇÃO

A construção da Matriz Horários de Injeção é realizada por meio da Distribuição do Carrossel e do cálculo dos Locais de Entrada:

#### Distribuição do Carrossel

A Distribuição do Carrossel tem como objetivo dispor os trens na via uniformemente, a partir da **Matriz Marcos/Tempo** e com base nas variáveis **Quantitativo de Trens** e **Headway**, obtendo-se assim a **Matriz Trem/Marcos**, que corresponde ao carrossel para atendimento da demanda.

A criação da Matriz Trem/Marcos se dá por meio dos seguintes passos:

- Passo 1) Aloca-se o primeiro trem em uma estação inicial.
- Passo 2) Identifica o marco próximo do marco a partir do marco do trem anterior somado ao *headway*;
- Passo 3) Aloca-se trem seguinte no marco identificado no Passo 2).
- Passo 4) Repete-se o Passo 2) até atingir o número total de trens a serem utilizados, conforme o Quantitativo de Trens informado

Além da descrição textual, apresenta-se a formulação matemática da matriz, apresentada na Equação 3.10, e o Diagrama de Blocos, a fim de demonstrar esquematicamente o processamento dos passos, exposto na Figura 3.8.

$$M^{T,P}_{0..n} = \begin{bmatrix} T_0 & P_0 & O_0 \\ T_1 & P_1 & O_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ T_n & P_n & O_n \end{bmatrix} \quad 3.10$$

Onde:

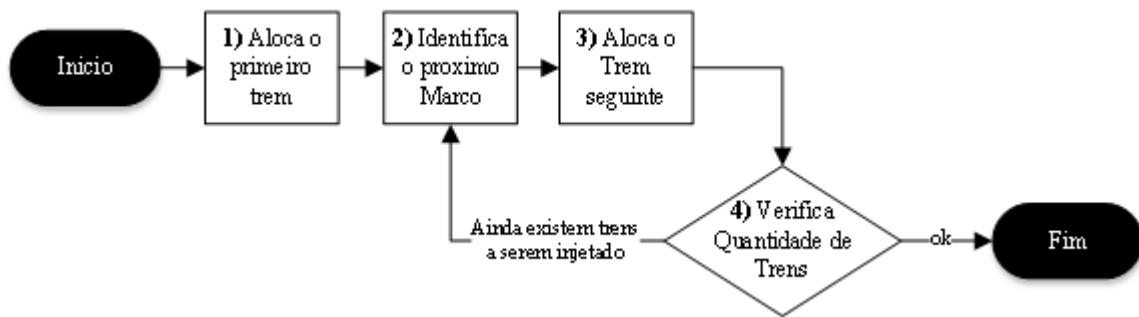
$M^{T,P}$ : Matriz Trem/Marcos;

$T_n$ : Identificação do Trem  $n$ .

$P_n$ : Marco do Trem  $n$  na via férrea.

$O_n$ : Ordem do Local de entrada.





**Figura 3.8** – Diagrama de Blocos dos Passos da Etapa 2.

Ao final da distribuição, pode-se realizar ajustes pontuais em determinados trens a fim de cumprir requisitos de prestação de serviço. Como exemplo, pode-se alocar um trem a uma estação de grande volume cujo distribuição o posicionou em um marco imediatamente a frente. Tem-se uma pequena diferença na homogeneidade do carrossel, mas atendendo a demanda de forma mais eficiente.

Apresenta-se a Figura 3.9 para demonstrar a definição da Matriz Trem/Marcos a partir da Matriz Marcos/Tempo, a partir dos dados da Linha Hipotética:

Matriz Marcos/Tempo				
Marcos	Ordem	Tempo (seg)	Acumulado (seg)	Id do Trem
Marco 1	2	0	0	
Estação 1a	2	70	70	1
Marco 2	2	65	135	
Estação 2a	2	45	180	
Marco 3	2	75	255	
Estação 3a	2	55	310	2
Marco 4	2	70	380	
Estação 4a	2	55	435	
Marco 5	2	60	495	
Estação 5a	3	55	550	3
Marco 6	3	50	600	
Estação 6a	3	65	665	
Marco 7	3	50	715	
Estação 7a	3	55	770	4
Marco 8	3	60	830	
Estação 8a	3	45	875	
Marco 9	3	60	935	
Estação 8b	1	65	1000	5
Marco 10	1	70	1070	
Estação 7b	1	45	1115	
Marco 11	1	60	1175	
Estação 6b	1	50	1225	6
Marco 12	1	65	1290	
Estação 5b	1	75	1365	
Marco 13	1	55	1420	
Estação 4b	1	60	1480	7
Marco 14	1	65	1545	
Estação 3b	1	60	1605	
Marco 15	1	65	1670	
Estação 2b	1	60	1730	8
Marco 16	1	55	1785	
Estação 1b	1	60	1845	
Marco 1	1	75	1920	

Matriz Trem/Marcos		
Id do Trem	Ordem	Marcos
1	2	Estação 1a
2	2	Estação 3a
3	3	Estação 5a
4	3	Estação 7a
5	1	Estação 8b
6	1	Estação 6b
7	1	Estação 4b
8	1	Estação 2b

**Figura 3.9** – Definição da Matriz Trem/Marcos.

Considerando os seguintes dados:

*Quantidade de Trens:* 8;

*Headway:* 300 segundos.

Onde na Matriz Marcos/Tempo:

*Marcos:* é o marco ao longo da via férrea;

*Ordem:* É a ordem do Local de Entrada;

*Tempo:* é o tempo que um trem leva para percorrer o espaço entre o Marco anterior e o Marco atual, expresso em segundos;

*Acumulado:* é o tempo acumulado do trem ao percorrer a via;

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado, conforme dados da Linha Hipotética;

E na Matriz Marcos/Locais de Entrada:

*Id do Trem*: é a identificação do trem a ser injetado;

*Ordem*: É a ordem do Local de Entrada;

*Marcos*: é o marco ao longo da via férrea onde o trem deve estar posicionado, conforme o carrossel.

Desta forma, obtêm-se a **Matriz Trem/Marcos**, a ser utilizado na etapa seguinte.

### Cálculo dos Locais de Entrada

O Cálculo dos Locais de Entrada tem como objetivo determinar o horário de injeção dos trens listados na **Matriz Trem/Marcos** para cada local de entrada constante na **Matriz Marcos/Locais de Entrada**, a fim de atender ao **Horário de Início da Operação**.

Tem-se como resultado a **Matriz de Horários de Injeção**, que consta na sua primeira coluna a lista de trens a serem injetados, na sua primeira linha os locais de entrada e o horário ideal de injeção nas células de intercessão, conforme demonstrado na Equação 3.11.

$$M^{T,P,HI^{LE},HI^{LE}_2..HI^{LE}_m}_{0..n} \quad 3.11$$

$$= \begin{bmatrix} T_0 & P_{T0} & O^{LE} & HI^{LE_1}_{P_{T0}} & HI^{LE_2}_{P_{T0}} & \dots & HI^{LE_m}_{P_{T0}} & M^{HI} \\ T_1 & P_{T1} & O^{LE} & HI^{LE_1}_{P_{T1}} & HI^{LE_2}_{P_{T1}} & \dots & HI^{LE_m}_{P_{T1}} & M^{HI} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_n & P_{Tn} & O^{LE} & HI^{LE_1}_{P_{Tn}} & HI^{LE_2}_{P_{Tn}} & \dots & HI^{LE_m}_{P_{Tn}} & M^{HI} \end{bmatrix}$$

Onde:

$M^{T,P,HI^{LE},HI^{LE}_2..HI^{LE}_m}$ : Matriz Marcos/Locais de Entrada;

$T_n$ : Identificação do Trem  $n$ ;

$O^{LE}$ : Ordem do Local de Entrada;

$P_n$ : Marco do Trem  $n$  na via férrea;

$HI^{LE_m}_{P_{Tn}}$ : Horário de injeção do Trem  $n$  pelo Local de Entrada  $m$ ;

$M^{HI}$ : Maior valor dentre os Horário de Injeção da linha.

O valor de cada Horário de Injeção  $HI^{LE_m}_{P_{Tn}}$  é calculado a partir da Equação 3.12:

$$HI^{LE}_{P_T} = Hio - Tempo P: LE \quad 3.12$$

Onde:

$HI_{LE}$ : Horário de Injeção do Trem por aquele Local de Entrada.

$Hio$ : Horário de Início da Operação.

$Tempo P: LE$ : Tempo oriundo da Matriz Marcos/Locais de Entrada, referente à intercessão do Marco do Trem (linha) e Local de Entrada (coluna).

Desta forma, o resultado é a **Matriz de Horários de Injeção**, conforme demonstrado na **Tabela 3.3**, a partir dos dados da Linha Hipotética:

**Tabela 3.3** – Matriz de Horários de Injeção

Id do Trem	Ordem	Marcos	Pátio 1	Pátio 2	Estac. 1	Maior
1	2	Estação 1a	05:58:50	05:35:05	05:42:25	05:58:50
2	2	Estação 3a	05:54:50	05:31:05	05:38:25	05:54:50
3	3	Estação 5a	05:50:50	05:59:05	05:34:25	05:59:05
4	3	Estação 7a	05:47:10	05:55:25	05:30:45	05:55:25
5	1	Estação 8b	05:43:20	05:51:35	05:58:55	05:58:55
6	1	Estação 6b	05:39:35	05:47:50	05:55:10	05:55:10
7	1	Estação 4b	05:35:20	05:43:35	05:50:55	05:50:55
8	1	Estação 2b	05:31:10	05:39:25	05:46:45	05:46:45

Considerando os seguintes dados:

*Horário de Início da Operação:* 06:00:00.

Onde:

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Marcos:* é o marco ao longo da via férrea onde o trem deve estar posicionado, conforme a distribuição do carrossel;

*Pátio 1, Pátio 2 e Estacionamento 1:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco determinado no Horário de Início da Operação;

*Maior:* Maior valor dentre os horários de injeção daquela linha.

### 3.6.3 ETAPA 3 - INTERAÇÃO PARA DETERMINAR OS LOCAIS E HORÁRIOS DE INJEÇÃO

A interação para determinar os locais de entrada e horários de injeção tem como objetivo percorrer a Matriz de Horários de Injeção a fim de determinar qual é a melhor combinação de injeções de trens, respeitando o **Quantitativo de Trens nos Locais de Entrada** e considerando os critérios **Intervalo entre Injeções nos Locais de Entrada** e **Intervalo entre Injeção pelo Operador**.

Inicialmente, ordena-se a Matriz Horários de injeção pelas colunas Ordem e Maior, na direção ascendente, obtendo-se a matriz conforme apresentado na Tabela 3.4:

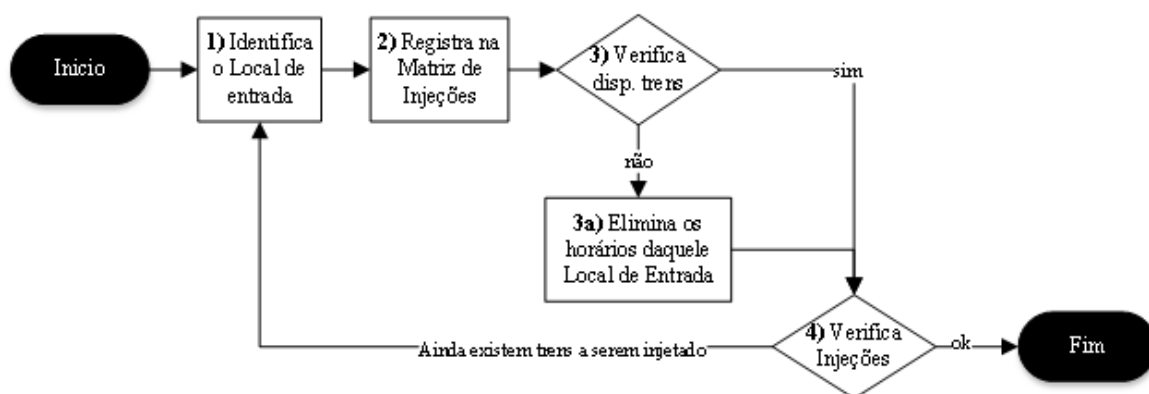
**Tabela 3.4** – Matriz de Horários de Injeção Ordenada

Id do Trem	Ordem	Marcos	Pátio 1	Pátio 2	Estac. 1	Maior
8	1	Estação 2b	05:31:10	05:39:25	05:46:45	05:46:45
7	1	Estação 4b	05:35:20	05:43:35	05:50:55	05:50:55
6	1	Estação 6b	05:39:35	05:47:50	05:55:10	05:55:10
5	1	Estação 8b	05:43:20	05:51:35	05:58:55	05:58:55
2	2	Estação 3a	05:54:50	05:31:05	05:38:25	05:54:50
1	2	Estação 1a	05:58:50	05:35:05	05:42:25	05:58:50
4	3	Estação 7a	05:47:10	05:55:25	05:30:45	05:55:25
3	3	Estação 5a	05:50:50	05:59:05	05:34:25	05:59:05

Quando o processo de interação é realizado, percorre-se a matriz ordenada partir da primeira linha, cumprindo os seguintes passos:

- Passo 1) Identifica o Local de Entrada relativo ao valor da coluna Maior;
- Passo 2) Registra, na Matriz de Injeções:
  - a. A identificação do Trem;
  - b. O Local de Entrada;
  - c. O Horário de Injeção.
    - i. Verifica os critérios de intervalos entre injeções nos locais de entrada e pelo operador, realizando os ajustes necessários no valor do Horário de Injeção;
- Passo 3) Verifica, a partir da contagem de injeções do Local de Injeção, se existem mais trens disponíveis:
  - a. Se não existem mais trens disponíveis para injeção, elimina-se todos os horários relativos àquele local de injeção (coluna).
- Passo 4) Se ainda existem trens a serem injetados, repete-se o processamento a partir do **Passo 1**.

Além da descrição textual, apresenta-se o Diagrama de Blocos, a fim de demonstrar esquematicamente o processamento dos passos, exposto na Figura 3.10:



**Figura 3.10** – Diagrama de Blocos dos Passos da Interação para determinar os Locais e Horários de Injeção.

Para ilustrar o desenvolvimento dessa etapa, foi realizado o processamento do algoritmo em dois cenários distintos, Cenários a) e b), demonstrados nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6, respectivamente:

- a) A partir de todos os dados da Linha Hipotética
- b) Sem a disponibilidade de trens no estacionamento próximo à estação 8.

**Tabela 3.5** – Processamento da Matriz de Horários de Injeção no Cenário a).

Id do Trem	Ordem	Marcos	Pátio 1	Pátio 2	Estac. 1	Maior
8	1	Estação 2b	05:31:10	05:39:25	<b>05:46:45</b>	05:46:45
7	1	Estação 4b	05:35:20	05:43:35	<b>05:50:55</b>	05:50:55
6	1	Estação 6b	05:39:35	<b>05:47:50</b>	05:55:10	05:55:10
5	1	Estação 8b	05:43:20	<b>05:51:35</b>	05:58:55	05:58:55
2	2	Estação 3a	<b>05:54:50</b>	05:31:05	05:38:25	05:54:50
1	2	Estação 1a	<b>05:58:50</b>	05:35:05	05:42:25	05:58:50
4	3	Estação 7a	05:47:10	<b>05:55:25</b>	05:30:45	05:55:25
3	3	Estação 5a	05:50:50	<b>05:59:05</b>	05:34:25	05:59:05

Onde:

*Id do Trem*: é a identificação do trem a ser injetado;

*Ordem*: é a ordem do Local de Entrada;

*Marcos*: é o marco ao longo da via férrea onde o trem deve estar posicionado, conforme a distribuição do carrossel;

*Pátio 1, Pátio 2 e Estacionamento 1*: É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco determinado no Horário de Início da Operação;

*Maior*: É o maior valor dentre os horários de entrada daquela linha.

**Tabela 3.6** – Processamento da Matriz de Horários de Injeção no Cenário b).

Id do Trem	Ordem	Marcos	Pátio 1	Pátio 2	Estac. 1	Maior
8	1	Estação 2b	05:31:10	<b>05:39:25</b>	[sem trens]	05:39:25
7	1	Estação 4b	05:35:20	<b>05:43:35</b>		05:43:35
6	1	Estação 6b	05:39:35	<b>05:47:50</b>		05:47:50
5	1	Estação 8b	05:43:20	<b>05:51:35</b>		05:51:35
2	2	Estação 3a	<b>05:54:50</b>	05:31:05		05:54:50
1	2	Estação 1a	<b>05:58:50</b>	05:35:05		05:58:50
4	3	Estação 7a	05:47:10	<b>05:55:25</b>		05:55:25
3	3	Estação 5a	05:50:50	<b>05:59:05</b>		05:59:05

Onde:

*Id do Trem*: é a identificação do trem a ser injetado;

*Ordem*: é a ordem do Local de Entrada;

*Marcos*: é o marco ao longo da via férrea onde o trem deve estar posicionado, conforme a distribuição do carrossel;

*Pátio 1, Pátio 2 e Estacionamento 1*: É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco determinado no Horário de Início da Operação;

*Maior*: É o maior valor dentre os horários de entrada daquela linha.

Como resultado do processamento, tem-se a Matriz de Injeções, conforme explanado no item 3.5. Na matriz resultante consta a relação dos trens, seu local de entrada e horário, a fim de compor o programa horário e atender a demanda de viagens dos usuários.

Para demonstrar o formato do resultado, apresenta-se nas Tabela 3.7 e Tabela 3.8 as Matrizes de Injeções dos Cenários a) e b), que pode ser ordenada pelo local de entrada ou horário, conforme padronização do operador:

**Tabela 3.7** – Matriz de Injeção do Cenário a).

Id do Trem	Local de Entrada	Horário*
8	Estac. 1	<b>05:46:45</b>
6	Pátio 2	<b>05:47:50</b>
7	Estac. 1	<b>05:50:55</b>
5	Pátio 2	<b>05:51:35</b>
2	Pátio 1	<b>05:54:50</b>
4	Pátio 2	<b>05:55:25</b>
1	Pátio 1	<b>05:58:50</b>
3	Pátio 2	<b>05:59:05</b>

\* Ordenamento crescente

Onde:

*Id do Trem*: é a identificação do trem a ser injetado.

*Local de Entrada*: é o local de entrada que o trem deve estar posicionado para ser injetado;

*Horário*: é o horário de injeção do trem, a fim de montar o carrossel.

**Tabela 3.8** – Matriz de Injeção do Cenário b).

Id do Trem	Local de Entrada	Horário*
8	Pátio 2	05:39:25
7	Pátio 2	05:43:35
6	Pátio 2	05:47:50
5	Pátio 2	05:51:35
2	Pátio 1	05:54:50
4	Pátio 2	05:55:25
1	Pátio 1	05:58:50
3	Pátio 2	05:59:05

\* Ordenamento crescente

Onde:

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado.

*Local de Entrada:* é o local de entrada que o trem deve estar posicionado para ser injetado;

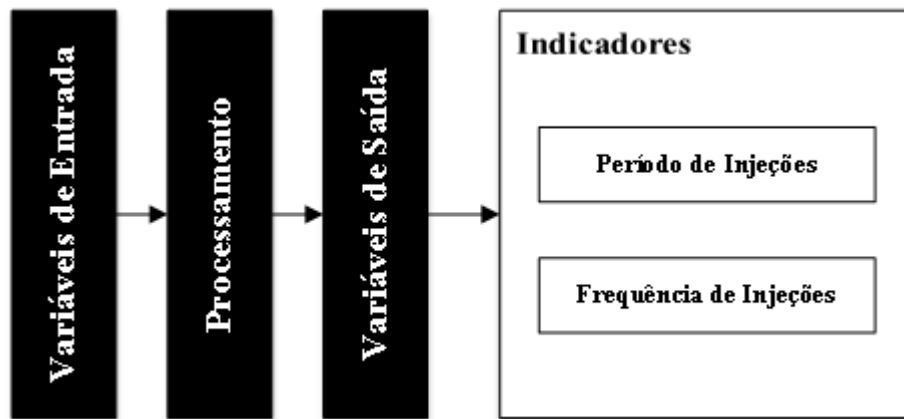
*Horário:* é o horário de injeção do trem, a fim de montar o carrossel.

### **3.7 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO – COMPARAÇÃO POR INDICADORES DE DESEMPENHO**

A fim de permitir a avaliação do resultado do processamento do algoritmo, foram selecionados, a partir da literatura apresentada no item 2.2.6, os Indicadores i) Período de Injeções e ii) Frequência de Injeções, baseados no Indicador de Disponibilidade – Frequência de Serviço, conforme apresentado na Figura 3.11.

A seleção desses indicadores foi determinada pela possibilidade de cálculo a partir do formato do resultado do algoritmo, sendo que sua utilização possibilitará estabelecer de forma objetiva a diferença entre o resultado do processamento do algoritmo em comparação com o resultado utilizando-se outros métodos de planejamento da injeção, como o planejamento realizado manualmente pelos operadores, concluindo se o algoritmo acarretará em uma melhor prestação de serviço e economia de recursos.





**Figura 3.11** – Indicadores de Desempenho.

i) Indicador Período de Injeções

O indicador Período de Injeções consiste no cálculo do tempo total entre a primeira e a última injeção de cada método de planejamento, conforme demonstrado na Equação 3.13.

Esse indicador demonstra quão compacto está o procedimento de injeção, ou seja, um tempo menor de montagem do carrossel pode permitir uma melhor gestão das escalas de trabalho do pessoal operacional e também espera-se observar uma diminuição da quilometragem dos trens, gerando economia no consumo de energia elétrica e na manutenção do sistema.

$$I_{PI} = M_{HI} - m_{HI} \quad 3.13$$

Onde:

$I_{PI}$ : Indicador Período de Injeções;

$M_{HI}$ : Maior Horário de Injeção, obtido na Matriz de Injeções;

$m_{HI}$ : Menor Horário de Injeção, obtido na Matriz de Injeções.

Para exemplificar a apuração do Indicador Período de Injeção nos Cenários a) e b), apresenta-se as Tabela 3.9 e Tabela 3.10.

**Tabela 3.9** – Cálculo do Indicador Período de Injeções no Cenário a).

Id do Trem	Local de Entrada	Horário*
8	Estac. 1	05:46:45
6	Pátio 2	05:47:50
7	Estac. 1	05:50:55
5	Pátio 2	05:51:35
2	Pátio 1	05:54:50
4	Pátio 2	05:55:25
1	Pátio 1	05:58:50
3	Pátio 2	05:59:05

\* Ordenamento crescente

Onde:

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado.

*Local de Entrada:* é o local de entrada que o trem deve estar posicionado para ser injetado;

*Horário:* é o horário de injeção do trem, a fim de montar o carrossel.

**Tabela 3.10** – Cálculo do Indicador Período de Injeções no Cenário b).

Id do Trem	Local de Entrada	Horário*
8	Pátio 2	05:39:25
7	Pátio 2	05:43:35
6	Pátio 2	05:47:50
5	Pátio 2	05:51:35
2	Pátio 1	05:54:50
4	Pátio 2	05:55:25
1	Pátio 1	05:58:50
3	Pátio 2	05:59:05

\* Ordenamento crescente

Onde:

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado.

*Local de Entrada:* é o local de entrada que o trem deve estar posicionado para ser injetado;

*Horário:* é o horário de injeção do trem, a fim de montar o carrossel.

Verifica-se, a partir do Indicador Período de Injeções, que no Cenário a) a injeção ocorre em 12m20seg e no Cenário b) ocorre em 19m40seg, uma diferença de 37,3% na eficiência do trabalho. Além disso, a primeira injeção no Cenário a) ocorre as 05:46:45, 7m20seg após a primeira injeção do Cenário b), tempo este que pode ser utilizado para aperfeiçoar as escalas de trabalho.

ii) Indicador Frequência de Injeções

O indicador de Frequência de Injeções consiste no cálculo da média e desvio padrão dos tempos entre as injeções dos trens, conforme demonstrado nas Equações 3.14 e 3.15, respectivamente.

Esse indicador demonstra quão regular está o trabalho de planejamento, ou seja, uma menor média indica que a injeção está compacta e um menor desvio padrão indica que a injeção está mais regular. Vale ressaltar que esse indicador tem menor relevância em comparação com o Período de Injeção, mas pode servir para nortear a tomada de decisão em caso semelhança nos valores apurados no primeiro indicador.

$$I_{FI-\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N HI_i \quad 3.14$$

Onde:

$I_{FI-\mu}$ : Indicador Frequência de Injeções – Média;

$N$ : Número de Injeções;

$HI$ : Horário de Injeção.

$$I_{FI-\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(HI_i - \mu)^2}{N} \quad 3.15$$

Onde:

$I_{FI-\sigma}$ : Indicador Frequência de Injeções – Desvio Padrão;

$N$ : Número de Injeções;

$HI$ : Horário de Injeção;

$\mu$ : Média dos Horários de Injeção ( $I_{FI-\mu}$ );

Para exemplificar a apuração do Indicador Período de Injeção nos Cenários a) e b), apresenta-se as Tabela 3.9 e Tabela 3.10.

**Tabela 3.11** – Cálculo do Indicador Frequência de Injeções no Cenário a).

<b>Id do Trem</b>	<b>Local de Entrada</b>	<b>Horário*</b>	<b>Diferença</b>
8	Estac. 1	05:46:45	
6	Pátio 2	05:47:50	00:01:05
7	Estac. 1	05:50:55	00:03:05
5	Pátio 2	05:51:35	00:00:40
2	Pátio 1	05:54:50	00:03:15
4	Pátio 2	05:55:25	00:00:35
1	Pátio 1	05:58:50	00:03:25
3	Pátio 2	05:59:05	00:00:15

\* Ordenamento crescente

Média: 00:01:46  
Desv. Padrão: 00:01:25

Onde:

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado.

*Local de Entrada:* é o local de entrada que o trem deve estar posicionado para ser injetado;

*Horário:* é o horário de injeção do trem, a fim de montar o carrossel.

*Diferença:* é a diferença entre o Horário de Injeção do trem atual em relação ao trem anterior.

**Tabela 3.12** – Cálculo do Indicador Frequência de Injeções no Cenário b).

<b>Id do Trem</b>	<b>Local de Entrada</b>	<b>Horário*</b>	<b>Diferença</b>
8	Pátio 2	05:39:25	
7	Pátio 2	05:43:35	00:04:10
6	Pátio 2	05:47:50	00:04:15
5	Pátio 2	05:51:35	00:03:45
2	Pátio 1	05:54:50	00:03:15
4	Pátio 2	05:55:25	00:00:35
1	Pátio 1	05:58:50	00:03:25
3	Pátio 2	05:59:05	00:00:15

\* Ordenamento crescente

Média: 00:02:49  
Desv. Padrão: 00:01:41

Onde:

*Id do Trem:* é a identificação do trem a ser injetado.

*Local de Entrada:* é o local de entrada que o trem deve estar posicionado para ser injetado;

*Horário:* é o horário de injeção do trem, a fim de montar o carrossel.

*Diferença:* é a diferença entre o Horário de Injeção do trem atual em relação ao trem anterior.

Verifica-se, a partir do Indicador Frequência de Injeções, que no Cenário a) a média da diferença das injeções é 1m46seg e no Cenário b) a média é 2m49seg, uma diferença de 1m3seg ou 37,3% na eficiência do trabalho. Além disso, o desvio padrão das diferenças entre os Cenários a) e b) é de 16seg ou 15,5%, o que indica que a distribuição das injeções durante o período de trabalho é mais homogênea no Cenário a).

Desta forma, observa-se que os indicadores permitem uma comparação direta entre Cenários processados utilizando-se o Algoritmo Moy e também com outros métodos de processamento, como aquele realizado manualmente pelo operador, definindo qual planejamento deverá ser utilizado para uma melhor prestação de serviço.

### **3.8 TÓPICO CONCLUSIVO**

Conforme apresentado no capítulo, foram descritas as premissas, variáveis de entrada, de saída, processamento e cálculo dos indicadores do método proposto, sendo aplicável a todos os operadores metroferroviários cujo sistemas utilizam carrossel, ou seja, *headway* homogêneo entre os trens.

Com base nos dados de uma linha hipotética, observou-se a confirmação da aplicabilidade do método, que resultou na Matriz de Injeções e Indicadores de Desempenho conforme desenvolvido no capítulo anterior.

Por fim, o algoritmo utilizado no processamento do método proposto será designado como Algoritmo Moy, e essa nomenclatura será utilizada nos capítulos seguintes.

## **4 APLICAÇÃO DO ALGORITMO MOY NA PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TRENS DO METRÔ DF**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

A fim de avaliar o método proposto, foi realizado um estudo de caso com base nos dados e planejamento do METRÔ-DF, que foram atualizados em 2015 e estão atualmente em uso na operação comercial.

Inicialmente, será apresentada a descrição do sistema METRÔ-DF, com o objetivo de contextualizar a aplicação do método. Em seguida, serão apresentados os Cenários considerados para o estudo, contemplando as injeções iniciais dos a) Dias Úteis, b) Sábados e c) Domingos e feriados.

Também será apresentada avaliação das premissas consideradas bem como as variáveis de entrada e saída, com as formatações necessárias para o estudo. Com base nos dados fornecidos pelo METRÔ-DF, serão apresentados os resultados dos processamentos, bem como comentários sobre a efetiva aplicação do método proposto.

Uma vez aplicado o Algoritmo Moy aos dados obtidos e calculados os indicadores a partir das matrizes atualmente em uso no do METRÔ-DF, passa-se a comparar os resultados obtidos. Os resultados foram confrontados com base nos indicadores de desempenho Período de Injeções e Frequência de Injeções, conforme explanado no item 3.7.

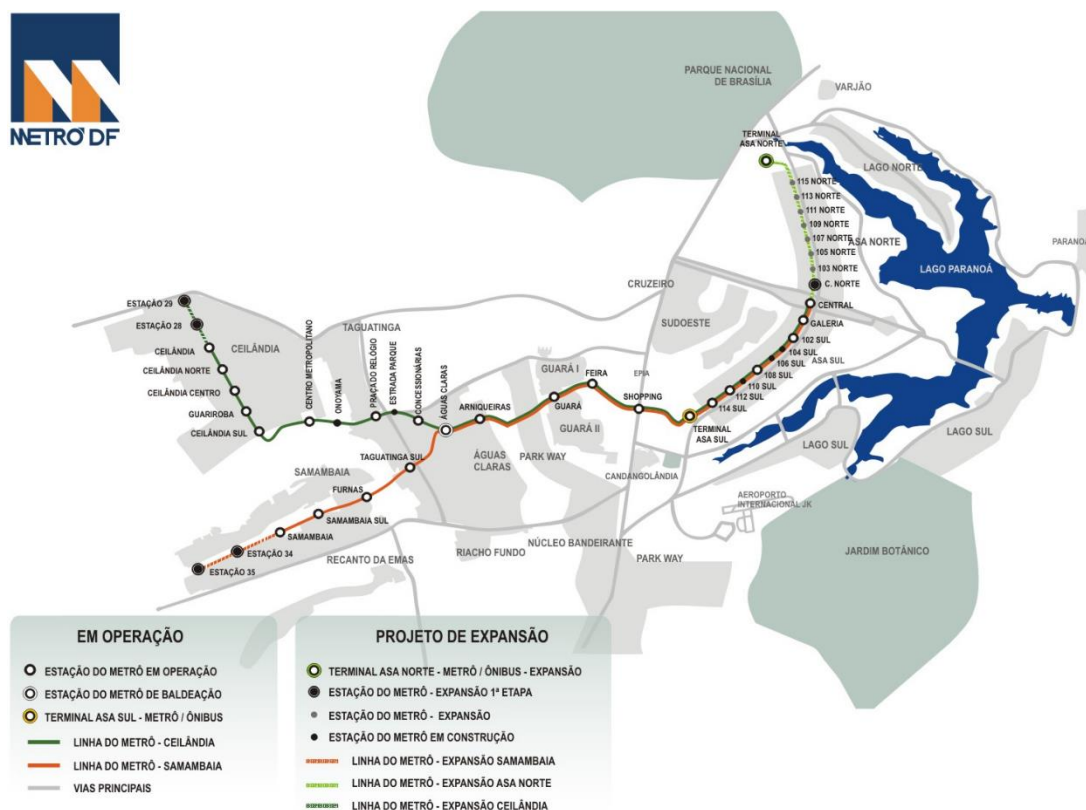
Será apresentado um quadro comparativo entre os resultados nos cenários abordados, a fim de permitir a visualização dos dados. Por fim, será realizada análise comparativa dos dados e comentários sobre os achados na pesquisa.

### **4.2 METRÔ-DF**

METRÔ-DF foi projetado em 1991, com a formação de grupos de trabalho com o objetivo de realizar os estudos sobre o impacto ambiental e gerenciar a construção do metropolitano de Brasília. O traçado escolhido foi o eixo oeste, que já naquele ano correspondia a 60% do deslocamento no DF, e correspondia, em uma extremidade o Plano Piloto e na outra as cidades de Ceilândia e Samambaia. No trecho intermediário estaria localizada uma nova região administrativa, a atual RA XX – Águas Claras, além do Guará e a região onde encontra-se o Park Shopping (METRÔ-DF, 2017).

Atualmente, o METRÔ-DF possui em funcionamento 24 das 29 estações do projeto inicial. Possui via com extensão de 42,38 km em forma de Y ligando a região administrativa de

Brasília às cidades satélites de Ceilândia e Samambaia, conforme apresentado na Figura 4.1, transportando diariamente 160 mil usuários por dia (METRÔ-DF, 2017).



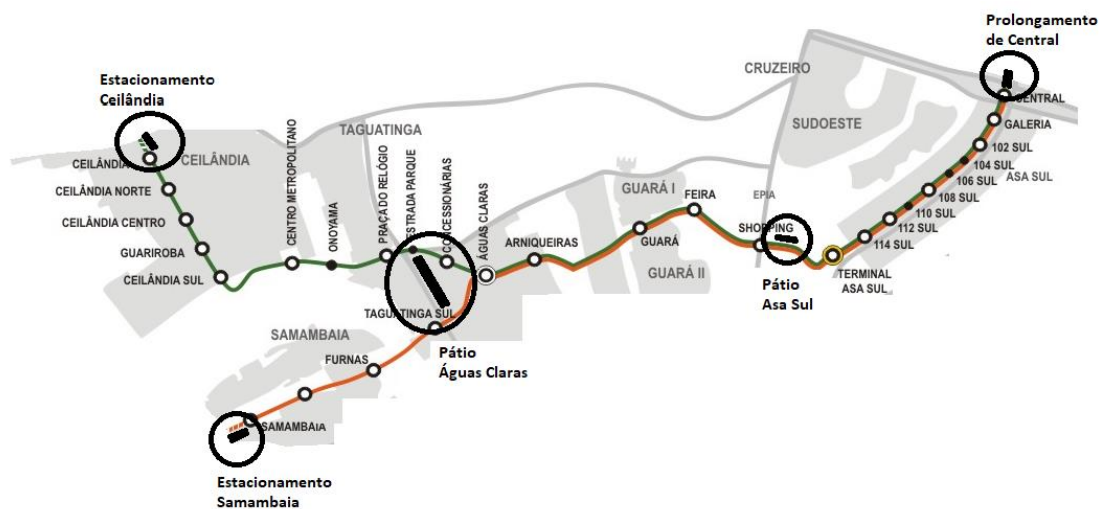
**Figura 4.1** – Linhas do METRÔ-DF (METRÔ-DF, 2017).

O trecho Tronco corresponde ao segmento entre a estação Central, localizada na rodoviária do Plano Piloto e a Estação Águas Claras, localizada no centro de Águas Claras. O trecho Ceilândia corresponde ao segmento entre a estação Concessionárias, localizada em Águas Claras, e a Estação Ceilândia, localizada no centro de Ceilândia. O trecho Samambaia corresponde ao segmento entre a estação Taguatinga Sul, localizada em Taguatinga, e a Estação Samambaia, localizada no centro de Samambaia.

O sistema possui dois pátios e três estacionamentos de trens, dispostos conforme demonstrado na Figura 4.2 e descrito a seguir:

- Pátio Águas Claras (PAC): Principal pátio de estacionamento e manutenção de trens, com capacidade de abrir toda a frota da empresa. Está localizado em Águas Claras, possuindo as seguintes ligações com via principal:
  - Zona de Transferência 1 (TF-1): Liga o PAC à via principal entre as estações Taguatinga Sul e Águas Claras, sentido Brasília.

- Zona de Transferência 2 (TF-2): Liga o PAC à via principal entre as estações Estrada Parque e Praça do Relógio, sentido Ceilândia;
- Zona de Transferência 3 (TF-3): Liga o PAC à via principal entre as estações Taguatinga Sul e Águas Claras, sentido Samambaia.
- Pátio Asa Sul (PAS): Pátio de estacionamento localizado no Setor de Múltiplas Atividades Sul (SMAS), próximo a Rodoviária Interestadual, com capacidade de acondicionamento de 12 trens, e possui as seguintes ligações com via principal:
  - Zona de Transferência 4 (TF-4): Liga o PAS à via principal entre as estações Shopping e Asa Sul, sentido Brasília.
  - Zona de Transferência 5 (TF-5): Liga o PAS à via principal entre as estações Shopping e Asa Sul, sentido Ceilândia/Samambaia;
- Prolongamento de Central (PRC): Prolongamento de via no túnel Asa Sul, após a estação Central, com capacidade de acondicionamento de dois trens;
- Estacionamento de Ceilândia (ECE): Estacionamento localizado após a estação Ceilândia, com capacidade de acondicionamento de cinco trens; e
- Estacionamento de Samambaia (ESM): Estacionamento localizado após a estação Samambaia, com capacidade de acondicionamento de cinco trens.



**Figura 4.2** – Pátios e Estacionamento do METRÔ-DF (modificado - METRÔ-DF, 2017).

### 4.3 CENÁRIOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

A operação comercial no METRÔ-DF ocorre de forma diferenciada durante os dias úteis, sábados, domingos e feriados, devido a demanda em função das viagens de trabalho, escolar e de lazer. Os dados obtidos referem-se ao planejamento atualmente em vigor no METRÔ-DF, e sua última revisão ocorreu em março/2015.



A operação dos dias úteis (segunda a sexta-feira) ocorre entre 06h00 e 23h30, com o máximo de 24 trens nos horários de pico utilizando a estratégia Y2, em que são despachados dois trens para Ceilândia e um trem para Samambaia, devido à maior demanda observada nas regiões Taguatinga e Ceilândia. Já no horário de vale, usados 15 trens e a estratégia Y1, em que são despachados trens para Ceilândia e Samambaia com a mesma frequência. Porém, a distribuição de trens no início dos dias úteis ocorre utilizando-se a estratégia Y1, e somente após as 06h20 inicia-se a estratégia Y2.

A operação aos sábados ocorre entre 06h00 e 23h30, com 15 trens nos horários de pico e 12 trens no horário de vale. Nesse dia é utilizado a estratégia Y1 em todo horário operacional. A operação aos domingos ocorre entre 07h00 e 19h00, com 8 trens e estratégia Y1 em todo horário operacional.

Para demonstrar as informações em cada operação, apresenta-se o Quadro 4.1, com a estratégia, quantitativo de trens e *headway* para cada horário operacional:

**Quadro 4.1 – Parâmetros Operacionais do METRÔ-DF**

Horário	Segunda à sexta-feira			Sábados			Domingos e Feriados		
	Estratégia	Trens	Headway	Estratégia	Trens	Headway	Estratégia	Trens	Headway
Pico da Manhã 06h00 às 08h45	Y2	24	Tronco: 3m35segs Ceilândia: 3m35segs 7m10segs Samambaia: 10m45segs	Y1	15	Tronco: 5m44segs Ceilândia: 11m28segs Samambaia: 12m28segs	Y1	8	Tronco: 10m45segs Ceilândia: 23m15segs Samambaia: 21m30segs
Vale Diurno 08h45 às 17h00	Y1	15	Tronco: 5m44segs Ceilândia: 11m28segs Samambaia: 12m28segs	Y1	12	Tronco: 7m10segs Ceilândia: 14m20segs Samambaia: 15m05segs			
Pico da Tarde 17h00 às 19h00	Y2	24	Tronco: 3m35segs Ceilândia: 3m35segs 7m10segs Samambaia: 10m45segs	Y1	15	Tronco: 5m44segs Ceilândia: 11m28segs Samambaia: 12m28segs			
Vale Noturno 19h00 às 23h30	Y1	10	Tronco: 8m36segs Ceilândia: 17m12segs Samambaia: 17m12segs	Y1	10	Tronco: 8m36segs Ceilândia: 17m12segs Samambaia: 17m12segs			

Como as operações listadas possuem quantitativo de trens e *headway* próprios, e, conseqüentemente, estratégias de circulação diferentes, pode-se definir cada uma como Cenário a serem aplicado o método proposto:

- Cenário 1. Segunda a sexta-feira;
- Cenário 2. Sábados;
- Cenário 3. Domingos e Feriados.

#### 4.4 AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DAS VARIÁVEIS

As variáveis de entrada foram adquiridas a partir de consulta ao METRÔ-DF, que forneceu as informações conforme apresentadas no Quadro 4.2:

**Quadro 4.2 – Listagem das Variáveis de Entrada**

Variáveis de Entrada	Dias Úteis	Sábados	Domingos e Feriados
Quantitativo de Trens	24	15	8
Headway (tronco)	03m35secs	05m44secs	10m45secs
Horário de Início da Operação	06:00	06:00	07:00
Quantitativo de trens nos locais de Entrada			
PRC	2	1	1
PAS (TF-4 e TF-5)	5	3	1
PAC (TF-1 a TF-3)	∞	∞	∞
ECE	1	-	-
ESM	1	-	-
Intervalo nos Locais de Entrada	30secs	30secs	30secs
Intervalos do Operador	10secs	10secs	10secs

Observa-se que o quantitativo de trens nos locais de entrada varia entre os cenários, porém foi informado pelo METRÔ-DF que aos Sábados, Domingos e Feriados está disponível o mesmo número de trens dos Dias Úteis, permanecendo como reservas durante toda a operação.

A fim de permitir otimização do Algoritmo Moy, além de aplicar os quantitativos de trens nos locais de entrada definidos pela estratégia do METRÔ-DF, serão processados os Cenários 2 e 3 utilizando-se todos os trens disponíveis nos locais de entrada.

A variável Matriz Marcos/Tempo, oriunda da Análise Mesoscópica, é comum a todos os cenários, pois o desempenho dos trens é igual durante o início das diferentes operações comerciais.

A partir dessa matriz, foi desenvolvida a Matriz Marcos/Locais de Entrada, conforme método descrito no Item 3.6.1, sendo apresentada no APÊNDICE IV – Matriz Posição/Locais de Entrada.

#### **4.5 PROCESSAMENTO DO ALGORITMO MOY**

Com base nos dados adquiridos junto ao METRÔ-DF e formatados com base nas regras estabelecidas para as variáveis de entrada, foi realizado o processamento dos três cenários identificados e as variações Cenários 2a e 3a, podendo utilizar todos os trens disponíveis nos locais de entrada, conforme apresentado no Quadro 4.3:

**Quadro 4.3 – Cenários Processados utilizando o Algoritmo Moy**

Variáveis de Entrada	Cenário 1 Dias Úteis	Cenário 2 Sábados	Cenário 2a Sábados	Cenário 3 Domingos e Feriados	Cenário 3a Domingos e Feriados
Quantitativo de Trens	24	15	15	8	8
Headway (tronco)	03m35secs	05m44secs	05m44secs	10m45secs	10m45secs
Horário de Início da Operação	06:00	06:00	06:00	07:00	07:00
Quantitativo de trens nos locais de Entrada					
PRC	2	1	2	1	2
PAS (TF-4 e TF-5)	5	3	5	1	5
PAC (TF-1 a TF-3)	∞	∞	∞	∞	∞
ECE	1	-	1	-	1
ESM	1	-	1	-	1
Intervalo nos Locais de Entrada	30secs	30secs	30secs	30secs	30secs
Intervalos do Operador	10secs	10secs	10secs	10secs	10secs

Em cada cenário, foi considerado o quantitativo de trens e *headway* para a distribuição do carrossel ao longo da via, de forma homogênea. Nesse ponto teve-se o cuidado de distribuir dos trens respeitando a estratégia Y1, que, no Cenário Dias Úteis, só é colocada em prática aproximadamente às 06h20.

A partir da distribuição do carrossel, foram construídas as Matrizes de Horários de Injeção, sendo posteriormente ordenadas e processadas, obtendo-se, assim, as Matrizes de Injeção e os indicadores de desempenho correspondentes.

#### 4.5.1 CENÁRIO 1 – DIAS ÚTEIS

Para demonstrar o resultado do processamento do Cenário 1 – Dias Úteis, apresenta-se o processamento das três etapas previstas no Algoritmo Moy.

A Etapa 1 consistiu na distribuição dos trens em carrossel ao longo da via, utilizado os seguintes parâmetros: 24 trens no carrossel e *headway* de 03m35secs, e no cálculo da Ordem e Tempos, obtendo-se como resultado a Matriz Marcos/Locais de Entrada, apresentada na Tabela 4.1:

**Tabela 4.1 – Matriz Marcos/Locais de Entrada do Cenário 1 – Dias Úteis**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada (em segs)							
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM
1	CTL-1	3	124	1806	3857	2800	930	4786	2836	2308
2	102-1	3	350	2032	4083	3026	1156	5012	3062	2534
3	E07-1W01T	3	558	2240	4291	3234	1364	5220	3270	2742
4	E11-1E08T	3	785	2467	4518	3461	1591	5447	3497	2969
5	SHP-1	2	1045	2727	4778	3721	1851	119	3757	3229
6	E13-1E02T	2	1200	2882	4933	3876	2006	274	3912	3384
7	E13-1W06T	2	1429	3111	5162	4105	2235	503	4141	3613
8	ARN-1	2	1639	3321	5372	4315	2445	713	4351	3823
9	CON-1	2	1893	3575	5626	4569	2699	967	4605	4077
10	FUR-3	8	2139	3821	5872	281	2945	1213	4851	4323
11	MET-1	4	2297	3979	442	4973	3103	1371	5009	4481
12	SAS-4	7	2550	4232	6283	692	3356	1624	5262	200
13	CEC-1	4	2709	4391	854	5385	3515	1783	5421	4893
14	E17-4W03T	5	2935	83	6668	1077	3741	2009	5647	585
15	CEC-2	1	3176	4858	1321	5852	3982	2250	300	5360
16	MET-2	1	3585	5267	1730	6261	4391	2659	709	5769
17	E19-2E05T	1	4005	5687	2150	6681	4811	3079	1129	6189
18	ARN-2	5	4240	334	2385	1328	5046	3314	1364	836
19	E13-2W05T	5	4428	522	2573	1516	5234	3502	1552	1024
20	E11-2W05T	5	4652	746	2797	1740	5458	3726	1776	1248
21	E11-2E05T	6	4870	964	3015	1958	88	3944	1994	1466
22	E07-2W04T	6	5085	1179	3230	2173	303	4159	2209	1681
23	E02-2W06T	6	5293	1387	3438	2381	511	4367	2417	1889
24	GAL-2	6	5503	1597	3648	2591	721	4577	2627	2099

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Marcos:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É a distância temporal entre o Marco do trem (linha) e o Local de Entrada (coluna).

A Etapa 2 consistiu no cálculo do horário de entrada dos trens, a partir dos valores constantes na Matriz Posição/Locais de Entrada, utilizando como base 06:00:00, horário de início da operação comercial, obtendo-se como resultado a Matriz Horários de Injeção, apresentada na Tabela 4.2, já ordenada pelas colunas Ordem e Maior, conforme determina o algoritmo:

**Tabela 4.2 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 1 – Dias Úteis Ordenada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
17	E19-2E05T	1	04:53:15	04:25:13	05:24:10	04:08:39	04:39:49	05:08:41	05:41:11	04:16:51	05:41:11
16	MET-2	1	05:00:15	04:32:13	05:31:10	04:15:39	04:46:49	05:15:41	05:48:11	04:23:51	05:48:11
15	CEC-2	1	05:07:04	04:39:02	05:37:59	04:22:28	04:53:38	05:22:30	05:55:00	04:30:40	05:55:00
9	CON-1	2	05:28:27	05:00:25	04:26:14	04:43:51	05:15:01	05:43:53	04:43:15	04:52:03	05:43:53
8	ARN-1	2	05:32:41	05:04:39	04:30:28	04:48:05	05:19:15	05:48:07	04:47:29	04:56:17	05:48:07
7	E13-1W06T	2	05:36:11	05:08:09	04:33:58	04:51:35	05:22:45	05:51:37	04:50:59	04:59:47	05:51:37
6	E13-1E02T	2	05:40:00	05:11:58	04:37:47	04:55:24	05:26:34	05:55:26	04:54:48	05:03:36	05:55:26
5	SHP-1	2	05:42:35	05:14:33	04:40:22	04:57:59	05:29:09	05:58:01	04:57:23	05:06:11	05:58:01
4	E11-1E08T	3	05:46:55	05:18:53	04:44:42	05:02:19	05:33:29	04:29:13	05:01:43	05:10:31	05:46:55
3	E07-1W01T	3	05:50:42	05:22:40	04:48:29	05:06:06	05:37:16	04:33:00	05:05:30	05:14:18	05:50:42
2	102-1	3	05:54:10	05:26:08	04:51:57	05:09:34	05:40:44	04:36:28	05:08:58	05:17:46	05:54:10
1	CTL-1	3	05:57:56	05:29:54	04:55:43	05:13:20	05:44:30	04:40:14	05:12:44	05:21:32	05:57:56
13	CEC-1	4	05:14:51	04:46:49	05:45:46	04:30:15	05:01:25	05:30:17	04:29:39	04:38:27	05:45:46
11	MET-1	4	05:21:43	04:53:41	05:52:38	04:37:07	05:08:17	05:37:09	04:36:31	04:45:19	05:52:38
20	E11-2W05T	5	04:42:28	05:47:34	05:13:23	05:31:00	04:29:02	04:57:54	05:30:24	05:39:12	05:47:34
19	E13-2W05T	5	04:46:12	05:51:18	05:17:07	05:34:44	04:32:46	05:01:38	05:34:08	05:42:56	05:51:18
18	ARN-2	5	04:49:20	05:54:26	05:20:15	05:37:52	04:35:54	05:04:46	05:37:16	05:46:04	05:54:26
14	E17-4W03T	5	05:11:05	05:58:37	04:08:52	05:42:03	04:57:39	05:26:31	04:25:53	05:50:15	05:58:37
24	GAL-2	6	04:28:17	05:33:23	04:59:12	05:16:49	05:47:59	04:43:43	05:16:13	05:25:01	05:47:59
23	E02-2W06T	6	04:31:47	05:36:53	05:02:42	05:20:19	05:51:29	04:47:13	05:19:43	05:28:31	05:51:29
22	E07-2W04T	6	04:35:15	05:40:21	05:06:10	05:23:47	05:54:57	04:50:41	05:23:11	05:31:59	05:54:57
21	E11-2E05T	6	04:38:50	05:43:56	05:09:45	05:27:22	05:58:32	04:54:16	05:26:46	05:35:34	05:58:32
12	SAS-4	7	05:17:30	04:49:28	04:15:17	05:48:28	05:04:04	05:32:56	04:32:18	05:56:40	05:56:40
10	FUR-3	8	05:24:21	04:56:19	04:22:08	05:55:19	05:10:55	05:39:47	04:39:09	04:47:57	05:55:19

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

A Etapa 3 consistiu em uma interação nas linhas da Matriz Horários de Injeção para selecionar a melhor combinação de injeções a fim de proporcionar o serviço de transporte metroviário. Conforme determinado pelo Algoritmo Moy, a seleção ocorreu por meio da verificação do horário da coluna Maior quanto a disponibilidade de trens naquele Local de Entrada e registro na Matriz de Injeções, conforme determina o algoritmo. Apresenta-se, na Tabela 4.3, a Matriz Horários de Injeção com as seleções marcadas:

**Tabela 4.3 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 1 – Dias Úteis Processada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
17	E19-2E05T	1								05:41:11	05:41:11
16	MET-2	1			05:31:10						05:31:10
15	CEC-2	1			05:37:59						05:37:59
9	CON-1	2							05:43:53		05:43:53
8	ARN-1	2							05:48:07		05:48:07
7	E13-1W06T	2							05:51:37		05:51:37
6	E13-1E02T	2							05:55:26		05:55:26
5	SHP-1	2							05:58:01		05:58:01
4	E11-1E08T	3	05:46:55								05:46:55
3	E07-1W01T	3	05:50:42								05:50:42
2	102-1	3						05:40:44			05:40:44
1	CTL-1	3						05:44:30			05:44:30
13	CEC-1	4			05:45:46						05:45:46
11	MET-1	4			05:52:38						05:52:38
20	E11-2W05T	5		05:47:34							05:47:34
19	E13-2W05T	5		05:51:18							05:51:18
18	ARN-2	5		05:54:26							05:54:26
14	E17-4W03T	5		05:58:37							05:58:37
24	GAL-2	6						05:47:59			05:47:59
23	E02-2W06T	6						05:51:29			05:51:29
22	E07-2W04T	6						05:54:57			05:54:57
21	E11-2E05T	6						05:58:32			05:58:32
12	SAS-4	7								05:56:40	05:56:40
10	FUR-3	8				05:55:19					05:55:19

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

Por fim, apresenta-se a Tabela 4.4, que traz a Matriz de Injeções conforme processamento e o resultado dos indicadores, a serem utilizados para comparação com o Programa Horário atualmente utilizado no METRÔ-DF.

**Tabela 4.4 – Matriz de Injeções do Cenário 1 – Dias Úteis e Indicadores**

Id do Trem	Local de Injeção	Horário	Diferença
16	TF-2	05:31:10	
15	TF-2	05:37:59	00:06:49
2	TF-4	05:40:44	00:02:45
17	ECE	05:41:11	00:00:27
9	TF-5	05:43:53	00:02:42
1	TF-4	05:44:30	00:00:37
13	TF-2	05:45:46	00:01:16
4	PRC	05:46:55	00:01:09
20	TF-1	05:47:34	00:00:39
24	TF-4	05:47:59	00:00:25
8	TF-5	05:48:07	00:00:08
3	PRC	05:50:42	00:02:35
19	TF-1	05:51:18	00:00:36
23	TF-4	05:51:29	00:00:11
7	TF-5	05:51:39	00:00:10
11	TF-2	05:52:38	00:00:59
18	TF-1	05:54:26	00:01:48
22	TF-4	05:54:57	00:00:31
10	TF-3	05:55:19	00:00:22
6	TF-5	05:55:29	00:00:10
12	ESM	05:56:40	00:01:11
5	TF-5	05:58:01	00:01:21
21	TF-4	05:58:32	00:00:31
14	TF-1	05:58:42	00:00:10

<b>Indicadores</b>	
Período de Injeções:	<b>00:27:32</b>
Frequência de Injeções	
Média:	<b>00:01:12</b>
Desv. Padrão:	<b>00:01:28</b>

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

## 4.5.2 CENÁRIO 2 – SÁBADOS

Para demonstrar o resultado do processamento do Cenário 2 – Sábados, apresenta-se o processamento das três etapas previstas no Algoritmo Moy.

A Etapa 1 consistiu na distribuição dos trens em carrossel ao longo da via, utilizado os seguintes parâmetros: 15 trens no carrossel e *headway* de 05m44secs, e no cálculo da Ordem e Tempos, obtendo-se como resultado a Matriz Posição/Locais de Entrada, apresentada na Tabela 4.5:



**Tabela 4.5 – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 2 – Sábados**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada							
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM
1	CTL-1	3	124	1806	3857	2800	930	4786	-	-
2	108-1	3	521	2203	4254	3197	1327	5183	-	-
3	ASA-1	3	897	2579	4630	3573	1703	5559	-	-
4	E11-1W05T	2	1156	2838	4889	3832	1962	230	-	-
5	E17-1E12T	2	1517	3199	5250	4193	2323	591	-	-
6	E17-3W03T	2	1851	3533	5584	4527	2657	925	-	-
7	E23-1E08T	4	2202	3884	347	4878	3008	1276	-	-
8	SAS-4	7	2550	4232	6283	692	3356	1624	-	-
9	E27-2E02T	4	2876	4558	1021	5552	3682	1950	-	-
10	MET-2	1	3585	5267	1730	6261	4391	2659	-	-
11	E17-2E09T	5	4260	354	2405	1348	5066	3334	-	-
12	E13-2E02T	5	4606	700	2751	1694	5412	3680	-	-
13	ASA-2	6	4940	1034	3085	2028	158	4014	-	-
14	E02-2W06T	6	5293	1387	3438	2381	511	4367	-	-
15	E02-2E08T	6	5634	1728	3779	2722	852	4708	-	-

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É a distância temporal entre o Marco do trem (linha) e o Local de Entrada (coluna).

A Etapa 2 consistiu no cálculo do horário de entrada dos trens, a partir dos valores constantes na Matriz Posição/Locais de Entrada, utilizando como base 06:00:00, horário de início da operação comercial, obtendo-se como resultado a Matriz Horários de Injeção, apresentada na Tabela 4.6, já ordenada pelas colunas Ordem e Maior, conforme determina o algoritmo:

**Tabela 4.6 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2 – Sábados Ordenada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
10	MET-2	1	05:00:15	04:32:13	05:31:10	04:15:39	04:46:49	05:15:41	-	-	05:31:10
6	E17-3W03T	2	05:29:09	05:01:07	04:26:56	04:44:33	05:15:43	05:44:35	-	-	05:44:35
5	E17-1E12T	2	05:34:43	05:06:41	04:32:30	04:50:07	05:21:17	05:50:09	-	-	05:50:09
4	E11-1W05T	2	05:40:44	05:12:42	04:38:31	04:56:08	05:27:18	05:56:10	-	-	05:56:10
3	ASA-1	3	05:45:03	05:17:01	04:42:50	05:00:27	05:31:37	04:27:21	-	-	05:45:03
2	108-1	3	05:51:19	05:23:17	04:49:06	05:06:43	05:37:53	04:33:37	-	-	05:51:19
1	CTL-1	3	05:57:56	05:29:54	04:55:43	05:13:20	05:44:30	04:40:14	-	-	05:57:56
9	E27-2E02T	4	05:12:04	04:44:02	05:42:59	04:27:28	04:58:38	05:27:30	-	-	05:42:59
7	E23-1E08T	4	05:23:18	04:55:16	05:54:13	04:38:42	05:09:52	05:38:44	-	-	05:54:13
12	E13-2E02T	5	04:43:14	05:48:20	05:14:09	05:31:46	04:29:48	04:58:40	-	-	05:48:20
11	E17-2E09T	5	04:49:00	05:54:06	05:19:55	05:37:32	04:35:34	05:04:26	-	-	05:54:06
15	E02-2E08T	6	04:26:06	05:31:12	04:57:01	05:14:38	05:45:48	04:41:32	-	-	05:45:48
14	E02-2W06T	6	04:31:47	05:36:53	05:02:42	05:20:19	05:51:29	04:47:13	-	-	05:51:29
13	ASA-2	6	04:37:40	05:42:46	05:08:35	05:26:12	05:57:22	04:53:06	-	-	05:57:22
8	SAS-4	7	05:17:30	04:49:28	04:15:17	05:48:28	05:04:04	05:32:56	-	-	05:48:28

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

A Etapa 3 consistiu em uma interação nas linhas da Matriz Horários de Injeção para selecionar a melhor combinação de injeções a fim de proporcionar o serviço de transporte metroviário. Conforme determinado pelo Algoritmo Moy, a seleção ocorreu por meio da verificação do horário da coluna Maior quanto a disponibilidade de trens naquele Local de Entrada e registro na Matriz de Injeções, conforme determina o algoritmo. Apresenta-se, na Tabela 4.7, a Matriz Horários de Injeção com as seleções marcadas:

**Tabela 4.7 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2 – Sábados Processada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior	
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM		
10	MET-2	1			05:31:10					-	-	05:31:10
6	E17-3W03T	2							05:44:35	-	-	05:44:35
5	E17-1E12T	2							05:50:09	-	-	05:50:09
4	E11-1W05T	2							05:56:10	-	-	05:56:10
3	ASA-1	3	05:45:03							-	-	05:45:03
2	108-1	3		05:23:17						-	-	05:23:17
1	CTL-1	3		05:29:54						-	-	05:29:54
9	E27-2E02T	4			05:42:59					-	-	05:42:59
7	E23-1E08T	4			05:54:13					-	-	05:54:13
12	E13-2E02T	5		05:48:20						-	-	05:48:20
11	E17-2E09T	5		05:54:06						-	-	05:54:06
15	E02-2E08T	6		05:31:12						-	-	05:31:12
14	E02-2W06T	6		05:36:53						-	-	05:36:53
13	ASA-2	6		05:42:46						-	-	05:42:46
8	SAS-4	7				05:48:28				-	-	05:48:28

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

Por fim, apresenta-se a Tabela 4.8, que traz a Matriz de Injeções conforme processamento e o resultado dos indicadores, a serem utilizados para comparação com o Programa Horário atualmente utilizado no METRÔ-DF.

**Tabela 4.8 – Matriz de Injeções do Cenário 2 – Sábados e Indicadores**

Id do Trem	Local de Injeção	Horário	Diferença
2	TF-1	05:23:17	
1	TF-1	05:29:54	00:06:37
10	TF-2	05:31:10	00:01:16
15	TF-1	05:31:20	00:00:10
14	TF-1	05:36:53	00:05:33
13	TF-1	05:42:46	00:05:53
9	TF-2	05:42:59	00:00:13
6	TF-5	05:44:35	00:01:36
3	PRC	05:45:03	00:00:28
12	TF-1	05:48:20	00:03:17
8	TF-3	05:48:28	00:00:08
5	TF-5	05:50:09	00:01:41
11	TF-1	05:54:06	00:03:57
7	TF-2	05:54:16	00:00:10
4	TF-5	05:56:10	00:01:54

<b>Indicadores</b>	
Período de Injeções:	<b>00:32:53</b>
Frequência de Injeções	
Média:	<b>00:02:21</b>
Desv. Padrão:	<b>00:02:19</b>

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

### 4.5.3 CENÁRIO 2A – SÁBADOS (OTIMIZADO)

Para demonstrar o resultado do processamento do Cenário 2a – Sábados (otimizado), apresenta-se o processamento das três etapas previstas no Algoritmo Moy.

A Etapa 1 consistiu na distribuição dos trens em carrossel ao longo da via, utilizado os seguintes parâmetros: 15 trens no carrossel e *headway* de 05m44secs, e no cálculo da Ordem e Tempos, obtendo-se como resultado a Matriz Posição/Locais de Entrada, apresentada na Tabela 4.9:

**Tabela 4.9 – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 2a – Sábados (otimizado)**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada							
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM
1	CTL-1	3	124	1806	3857	2800	930	4786	2836	2308
2	108-1	3	521	2203	4254	3197	1327	5183	3233	2705
3	ASA-1	3	897	2579	4630	3573	1703	5559	3609	3081
4	E11-1W05T	2	1156	2838	4889	3832	1962	230	3868	3340
5	E17-1E12T	2	1517	3199	5250	4193	2323	591	4229	3701
6	E17-3W03T	2	1851	3533	5584	4527	2657	925	4563	4035
7	E23-1E08T	4	2202	3884	347	4878	3008	1276	4914	4386
8	SAS-4	7	2550	4232	6283	692	3356	1624	5262	200
9	E27-2E02T	4	2876	4558	1021	5552	3682	1950	5588	5060
10	MET-2	1	3585	5267	1730	6261	4391	2659	709	5769
11	E17-2E09T	5	4260	354	2405	1348	5066	3334	1384	856
12	E13-2E02T	5	4606	700	2751	1694	5412	3680	1730	1202
13	ASA-2	6	4940	1034	3085	2028	158	4014	2064	1536
14	E02-2W06T	6	5293	1387	3438	2381	511	4367	2417	1889
15	E02-2E08T	6	5634	1728	3779	2722	852	4708	2758	2230

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É a distância temporal entre o Marco do trem (linha) e o Local de Entrada (coluna).

A Etapa 2 consistiu no cálculo do horário de entrada dos trens, a partir dos valores constantes na Matriz Posição/Locais de Entrada, utilizando como base 06:00:00, horário de início da operação comercial, obtendo-se como resultado a Matriz Horários de Injeção, apresentada na Tabela 4.10, já ordenada pelas colunas Ordem e Maior, conforme determina o algoritmo:

**Tabela 4.10 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2a – Sábados (otimizado) Ordenada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
10	MET-2	1	05:00:15	04:32:13	05:31:10	04:15:39	04:46:49	05:15:41	05:48:11	04:23:51	05:48:11
6	E17-3W03T	2	05:29:09	05:01:07	04:26:56	04:44:33	05:15:43	05:44:35	04:43:57	04:52:45	05:44:35
5	E17-1E12T	2	05:34:43	05:06:41	04:32:30	04:50:07	05:21:17	05:50:09	04:49:31	04:58:19	05:50:09
4	E11-1W05T	2	05:40:44	05:12:42	04:38:31	04:56:08	05:27:18	05:56:10	04:55:32	05:04:20	05:56:10
3	ASA-1	3	05:45:03	05:17:01	04:42:50	05:00:27	05:31:37	04:27:21	04:59:51	05:08:39	05:45:03
2	108-1	3	05:51:19	05:23:17	04:49:06	05:06:43	05:37:53	04:33:37	05:06:07	05:14:55	05:51:19
1	CTL-1	3	05:57:56	05:29:54	04:55:43	05:13:20	05:44:30	04:40:14	05:12:44	05:21:32	05:57:56
9	E27-2E02T	4	05:12:04	04:44:02	05:42:59	04:27:28	04:58:38	05:27:30	04:26:52	04:35:40	05:42:59
7	E23-1E08T	4	05:23:18	04:55:16	05:54:13	04:38:42	05:09:52	05:38:44	04:38:06	04:46:54	05:54:13
12	E13-2E02T	5	04:43:14	05:48:20	05:14:09	05:31:46	04:29:48	04:58:40	05:31:10	05:39:58	05:48:20
11	E17-2E09T	5	04:49:00	05:54:06	05:19:55	05:37:32	04:35:34	05:04:26	05:36:56	05:45:44	05:54:06
15	E02-2E08T	6	04:26:06	05:31:12	04:57:01	05:14:38	05:45:48	04:41:32	05:14:02	05:22:50	05:45:48
14	E02-2W06T	6	04:31:47	05:36:53	05:02:42	05:20:19	05:51:29	04:47:13	05:19:43	05:28:31	05:51:29
13	ASA-2	6	04:37:40	05:42:46	05:08:35	05:26:12	05:57:22	04:53:06	05:25:36	05:34:24	05:57:22
8	SAS-4	7	05:17:30	04:49:28	04:15:17	05:48:28	05:04:04	05:32:56	04:32:18	05:56:40	05:56:40

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

A Etapa 3 consistiu em uma interação nas linhas da Matriz Horários de Injeção para selecionar a melhor combinação de injeções a fim de proporcionar o serviço de transporte metroviário.

Diferente do Cenário 2, no processamento deste cenário foi permitido a utilização de todos os trens posicionados na via, para verificar o uso do Algoritmo Moy otimizado.

Conforme determinado pelo algoritmo, a seleção ocorreu por meio da verificação do horário da coluna Maior quanto a disponibilidade de trens naquele Local de Entrada e registro na Matriz de Injeções, conforme determina o algoritmo. Apresenta-se, na Tabela 4.11, a Matriz Horários de Injeção com as seleções marcadas:

**Tabela 4.11** – Matriz Horários de Injeção do Cenário 2a – Sábados (otimizado) Processada

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
10	MET-2	1								05:48:11	05:48:11
6	E17-3W03T	2							05:44:35		05:44:35
5	E17-1E12T	2							05:50:09		05:50:09
4	E11-1W05T	2							05:56:10		05:56:10
3	ASA-1	3	05:45:03								05:45:03
2	108-1	3	05:51:19								05:51:19
1	CTL-1	3					05:44:30				05:44:30
9	E27-2E02T	4			05:42:59						05:42:59
7	E23-1E08T	4			05:54:13						05:54:13
12	E13-2E02T	5		05:48:20							05:48:20
11	E17-2E09T	5		05:54:06							05:54:06
15	E02-2E08T	6					05:45:48				05:45:48
14	E02-2W06T	6		05:36:53							05:36:53
13	ASA-2	6		05:42:46							05:42:46
8	SAS-4	7								05:56:40	05:56:40

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

Por fim, apresenta-se a Tabela 4.12, que traz a Matriz de Injeções conforme processamento e o resultado dos indicadores, a serem utilizados para comparação com o Programa Horário atualmente utilizado no METRÔ-DF.

**Tabela 4.12** – Matriz de Injeções do Cenário 2a – Sábados (otimizado) e Indicadores

Id do Trem	Local de Injeção	Horário	Diferença
14	TF-1	05:36:53	
13	TF-1	05:42:46	00:05:53
9	TF-2	05:42:59	00:00:13
1	TF-4	05:44:30	00:01:31
6	TF-5	05:44:40	00:00:10
3	PRC	05:45:03	00:00:23
15	TF-4	05:45:48	00:00:45
10	ECE	05:48:11	00:02:23
12	TF-1	05:48:21	00:00:10
5	TF-5	05:50:09	00:01:48
2	PRC	05:51:19	00:01:10
11	TF-1	05:54:06	00:02:47
7	TF-2	05:54:16	00:00:10
4	TF-5	05:56:10	00:01:54
8	ESM	05:56:40	00:00:30

<b>Indicadores</b>	
Período de Injeções:	<b>00:19:47</b>
Frequência de Injeções	
Média:	<b>00:01:25</b>
Desv. Padrão:	<b>00:01:34</b>

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

#### 4.5.4 CENÁRIO 3 – DOMINGOS E FERIADOS

Para demonstrar o resultado do processamento do Cenário 3 – Domingos e Feriados, apresenta-se o processamento das três etapas previstas no Algoritmo Moy.

A Etapa 1 consistiu na distribuição dos trens em carrossel ao longo da via, utilizado os seguintes parâmetros: 8 trens no carrossel e *headway* de 10m45secs, e no cálculo da Ordem e Tempos, obtendo-se como resultado a Matriz Posição/Locais de Entrada, apresentada na Tabela 4.13:

**Tabela 4.13 – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 3 – Domingos e Feriados**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada							
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM
1	CTL-1	3	124	1806	3857	2800	930	4786	-	-
2	E11-1E08T	3	785	2467	4518	3461	1591	5447	-	-
3	E13-1W06T	2	1429	3111	5162	4105	2235	503	-	-
4	FUR-3	8	2139	3821	5872	281	2945	1213	-	-
5	CEC-1	4	2709	4391	854	5385	3515	1783	-	-
6	E19-2E05T	1	4005	5687	2150	6681	4811	3079	-	-
7	E11-2W05T	5	4652	746	2797	1740	5458	3726	-	-
8	E02-2W06T	6	5293	1387	3438	2381	511	4367	-	-

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É a distância temporal entre o Marco do trem (linha) e o Local de Entrada (coluna).

A Etapa 2 consistiu no cálculo do horário de entrada dos trens, a partir dos valores constantes na Matriz Posição/Locais de Entrada, utilizando como base 07:00:00, horário de início da operação comercial, obtendo-se como resultado a Matriz Horários de Injeção, apresentada na Tabela 4.14, já ordenada pelas colunas Ordem e Maior, conforme determina o algoritmo:

**Tabela 4.14 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3 – Domingos e Feriados Ordenada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
6	E19-2E05T	1	05:53:15	05:25:13	06:24:10	05:08:39	05:39:49	06:08:41	-	-	06:24:10
3	E13-1W06T	2	06:36:11	06:08:09	05:33:58	05:51:35	06:22:45	06:51:37	-	-	06:51:37
2	E11-1E08T	3	06:46:55	06:18:53	05:44:42	06:02:19	06:33:29	05:29:13	-	-	06:46:55
1	CTL-1	3	06:57:56	06:29:54	05:55:43	06:13:20	06:44:30	05:40:14	-	-	06:57:56
5	CEC-1	4	06:14:51	05:46:49	06:45:46	05:30:15	06:01:25	06:30:17	-	-	06:45:46
7	E11-2W05T	5	05:42:28	06:47:34	06:13:23	06:31:00	05:29:02	05:57:54	-	-	06:47:34
8	E02-2W06T	6	05:31:47	06:36:53	06:02:42	06:20:19	06:51:29	05:47:13	-	-	06:51:29
4	FUR-3	8	06:24:21	05:56:19	05:22:08	06:55:19	06:10:55	06:39:47	-	-	06:55:19

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

A Etapa 3 consistiu em uma interação nas linhas da Matriz Horários de Injeção para selecionar a melhor combinação de injeções a fim de proporcionar o serviço de transporte metroviário. Conforme determinado pelo Algoritmo Moy, a seleção ocorreu por meio da verificação do horário da coluna Maior quanto a disponibilidade de trens naquele Local de Entrada e registro na Matriz de Injeções, conforme determina o algoritmo. Apresenta-se, na Tabela 4.15, a Matriz Horários de Injeção com as seleções marcadas:

**Tabela 4.15 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3 – Domingos e Feriados Processada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada							Maior		
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE		ESM	
10	MET-2	1			05:31:10					-	-	05:31:10
6	E17-3W03T	2							05:44:35	-	-	05:44:35
5	E17-1E12T	2							05:50:09	-	-	05:50:09
4	E11-1W05T	2							05:56:10	-	-	05:56:10
3	ASA-1	3	05:45:03							-	-	05:45:03
2	108-1	3		05:23:17						-	-	05:23:17
1	CTL-1	3		05:29:54						-	-	05:29:54
9	E27-2E02T	4			05:42:59					-	-	05:42:59
7	E23-1E08T	4			05:54:13					-	-	05:54:13
12	E13-2E02T	5		05:48:20						-	-	05:48:20
11	E17-2E09T	5		05:54:06						-	-	05:54:06
15	E02-2E08T	6		05:31:12						-	-	05:31:12
14	E02-2W06T	6		05:36:53						-	-	05:36:53
13	ASA-2	6		05:42:46						-	-	05:42:46
8	SAS-4	7				05:48:28				-	-	05:48:28

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

Por fim, apresenta-se a Tabela 4.16, que traz a Matriz de Injeções conforme processamento e o resultado dos indicadores, a serem utilizados para comparação com o Programa Horário atualmente utilizado no METRÔ-DF.

**Tabela 4.16 – Matriz de Injeções do Cenário 3 – Domingos e Feriados e Indicadores**

Id do Trem	Local de Injeção	Horário	Diferença
6	TF-2	06:24:10	
1	TF-1	06:29:54	00:05:44
8	TF-1	06:36:53	00:06:59
5	TF-2	06:45:46	00:08:53
2	PRC	06:46:55	00:01:09
7	TF-1	06:47:34	00:00:39
3	TF-5	06:51:37	00:04:03
4	TF-3	06:55:19	00:03:42

Indicadores	
Período de Injeções:	00:31:09
Frequência de Injeções	
Média:	00:04:27
Desv. Padrão:	00:03:00

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;



*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

#### 4.5.5 CENÁRIO 3A – DOMINGOS E FERIADOS (OTIMIZADO)

Para demonstrar o resultado do processamento do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado), apresenta-se o processamento das três etapas previstas no Algoritmo Moy.

A Etapa 1 consistiu na distribuição dos trens em carrossel ao longo da via, utilizado os seguintes parâmetros: 15 trens no carrossel e *headway* de 05m44secs, e no cálculo da Ordem e Tempos, obtendo-se como resultado a Matriz Posição/Locais de Entrada, apresentada na Tabela 4.17:

**Tabela 4.17** – Matriz Posição/Locais de Entrada do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado)

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada							
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM
1	CTL-1	3	124	1806	3857	2800	930	4786	2836	2308
2	E11-1E08T	3	785	2467	4518	3461	1591	5447	3497	2969
3	E13-1W06T	2	1429	3111	5162	4105	2235	503	4141	3613
4	FUR-3	8	2139	3821	5872	281	2945	1213	4851	4323
5	CEC-1	4	2709	4391	854	5385	3515	1783	5421	4893
6	E19-2E05T	1	4005	5687	2150	6681	4811	3079	1129	6189
7	E11-2W05T	5	4652	746	2797	1740	5458	3726	1776	1248
8	E02-2W06T	6	5293	1387	3438	2381	511	4367	2417	1889

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É a distância temporal entre o Marco do trem (linha) e o Local de Entrada (coluna).

A Etapa 2 consistiu no cálculo do horário de entrada dos trens, a partir dos valores constantes na Matriz Posição/Locais de Entrada, utilizando como base 06:00:00, horário de início da operação comercial, obtendo-se como resultado a Matriz Horários de Injeção, apresentada na Tabela 4.18, já ordenada pelas colunas Ordem e Maior, conforme determina o algoritmo:

**Tabela 4.18 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) Ordenada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
6	E19-2E05T	1	05:53:15	05:25:13	06:24:10	05:08:39	05:39:49	06:08:41	06:41:11	05:16:51	06:41:11
3	E13-1W06T	2	06:36:11	06:08:09	05:33:58	05:51:35	06:22:45	06:51:37	05:50:59	05:59:47	06:51:37
2	E11-1E08T	3	06:46:55	06:18:53	05:44:42	06:02:19	06:33:29	05:29:13	06:01:43	06:10:31	06:46:55
1	CTL-1	3	06:57:56	06:29:54	05:55:43	06:13:20	06:44:30	05:40:14	06:12:44	06:21:32	06:57:56
5	CEC-1	4	06:14:51	05:46:49	06:45:46	05:30:15	06:01:25	06:30:17	05:29:39	05:38:27	06:45:46
7	E11-2W05T	5	05:42:28	06:47:34	06:13:23	06:31:00	05:29:02	05:57:54	06:30:24	06:39:12	06:47:34
8	E02-2W06T	6	05:31:47	06:36:53	06:02:42	06:20:19	06:51:29	05:47:13	06:19:43	06:28:31	06:51:29
4	FUR-3	8	06:24:21	05:56:19	05:22:08	06:55:19	06:10:55	06:39:47	05:39:09	05:47:57	06:55:19

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

A Etapa 3 consistiu em uma interação nas linhas da Matriz Horários de Injeção para selecionar a melhor combinação de injeções a fim de proporcionar o serviço de transporte metroviário.

Diferente do Cenário 3, no processamento deste cenário foi permitido a utilização de todos os trens posicionados na via, para verificar o uso do Algoritmo Moy otimizado.

Conforme determinado pelo algoritmo, a seleção ocorreu por meio da verificação do horário da coluna Maior quanto a disponibilidade de trens naquele Local de Entrada e registro na Matriz de Injeções, conforme determina o algoritmo. Apresenta-se, na Tabela 4.19, a Matriz Horários de Injeção com as seleções marcadas:

**Tabela 4.19 – Matriz Horários de Injeção do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) Processada**

Id do Trem	Posição	Ordem	Local de Entrada								Maior
			PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM	
6	E19-2E05T	1							06:41:11		06:41:11
3	E13-1W06T	2						06:51:37			06:51:37
2	E11-1E08T	3	06:46:55								06:46:55
1	CTL-1	3	06:57:56								06:57:56
5	CEC-1	4			06:45:46						06:45:46
7	E11-2W05T	5		06:47:34							06:47:34
8	E02-2W06T	6					06:51:29				06:51:29
4	FUR-3	8				06:55:19					06:55:19

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Posição:* É o Marco do trem na via, conforme a distribuição do carrossel;

*Ordem:* Ordem do Local de entrada;

*Local de Entrada:* É o momento em que o trem deve partir do Pátio ou Estacionamento para chegar no Marco, com base no Horário de Início da Operação.

Por fim, apresenta-se a Tabela 4.20, que traz a Matriz de Injeções conforme processamento e o resultado dos indicadores, a serem utilizados para comparação com o Programa Horário atualmente utilizado no METRÔ-DF.

**Tabela 4.20** – Matriz de Injeções do Cenário 3a – Domingos e Feriados (otimizado) e Indicadores

Id do Trem	Local de Injeção	Horário	Diferença
6	ECE	06:41:11	
5	TF-2	06:45:46	00:04:35
2	PRC	06:46:55	00:01:09
7	TF-1	06:47:34	00:00:39
8	TF-4	06:51:29	00:03:55
3	TF-5	06:51:39	00:00:10
4	TF-3	06:55:19	00:03:40
1	PRC	06:57:56	00:02:37

Indicadores	
Período de Injeções:	<b>00:16:45</b>
Frequencia de Injeções	
Média:	<b>00:02:24</b>
Desv. Padrão:	<b>00:01:45</b>

Onde:

*Id do Trem:* É a identificação do trem a ser injetado;

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

#### 4.6 CÁLCULO DOS INDICADORES DO ATUAL PLANEJAMENTO NO METRÔ-DF

A fim de possibilitar a comparação dos resultados obtidos por meio do processamento do Algoritmo Moy, foram calculados os indicadores das matrizes de injeções utilizadas atualmente pelo METRÔ-DF.

Os locais e horários de injeção relativos ao Cenário 1 – Dias Úteis utilizado no METRÔ-DF do foram tabulados e os indicadores Período de Injeções e Frequência de Injeções foram calculados, conforme apresentado na Tabela 4.21:

**Tabela 4.21** – Matriz de Injeções do Cenário 1 – Dias Úteis utilizada no METRÔ-DF e Cálculo dos Indicadores

Local de Injeção	Horário	Diferença
TF-2	05:38:00	
TF-1	05:39:00	00:01:00
PRC	05:44:00	00:05:00
TF-4	05:45:00	00:01:00
TF-2	05:45:00	00:00:00
TF-1	05:46:00	00:01:00
CEI	05:47:00	00:01:00
TF-1	05:50:00	00:03:00
TF-3	05:50:00	00:00:00
TF-5	05:51:00	00:01:00
SAM	05:51:00	00:00:00
TF-4	05:52:00	00:01:00
TF-2	05:52:00	00:00:00
TF-1	05:53:00	00:01:00
PRC	05:55:00	00:02:00
TF-5	05:56:00	00:01:00
TF-1	05:57:00	00:01:00
TF-3	05:57:00	00:00:00
TF-2	05:59:00	00:02:00
TF-3	06:04:00	00:05:00
TF-5	06:05:00	00:01:00
TF-3	06:19:00	00:14:00
TF-2	06:32:00	00:13:00
TF-2	06:42:00	00:10:00

<b>Indicadores</b>	
Período de Injeções:	<b>01:04:00</b>
Frequência de Injeções	
Média:	<b>00:02:47</b>
Desv. Padrão:	<b>00:04:04</b>

Onde:

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

Os locais e horários de injeção relativos ao Cenário 2 – Sábados utilizado no METRÔ-DF do foram tabulados e os indicadores Período de Injeções e Frequência de Injeções foram calculados, conforme apresentado na Tabela 4.22:

**Tabela 4.22** – Matriz de Injeções do Cenário 2 – Sábados utilizada no METRÔ-DF e Cálculo dos Indicadores

Local de Injeção	Horário	Diferença
TF-1	05:36:00	
TF-1	05:42:00	00:06:00
TF-2	05:45:00	00:03:00
TF-4	05:47:00	00:02:00
TF-1	05:48:00	00:01:00
TF-5	05:50:00	00:02:00
TF-3	05:52:00	00:02:00
TF-1	05:53:00	00:01:00
PRC	05:54:00	00:01:00
TF-5	05:55:00	00:01:00
TF-2	05:56:00	00:01:00
TF-1	05:59:00	00:03:00
TF-3	06:03:00	00:04:00
TF-1	06:05:00	00:02:00
TF-2	06:08:00	00:03:00

<b>Indicadores</b>		
Período de Injeções:		<b>00:32:00</b>
Frequência de Injeções		
	Média:	<b>00:02:17</b>
	Desv. Padrão:	<b>00:01:26</b>

Onde:

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

Os locais e horários de injeção relativos ao Cenário 3 – Domingos e Feriados utilizado no METRÔ-DF do foram tabulados e os indicadores Período de Injeções e Frequência de Injeções foram calculados, conforme apresentado na Tabela 4.23:

**Tabela 4.23** – Matriz de Injeções do Cenário 3 – Domingos e Feriados utilizada no METRÔ-DF e Cálculo dos Indicadores

Local de Injeção	Horário	Diferença
TF-1	06:37:00	
TF-2	06:46:00	00:09:00
TF-1	06:48:00	00:02:00
TF-3	06:53:00	00:05:00
TF-5	06:55:00	00:02:00
PRC	06:57:00	00:02:00
TF-1	06:58:00	00:01:00
TF-2	07:07:00	00:09:00

<b>Indicadores</b>	
Período de Injeções:	<b>00:30:00</b>
Frequência de Injeções	
Média:	<b>00:04:17</b>
Desv. Padrão:	<b>00:03:27</b>

Onde:

*Local de Injeção:* É o pátio ou estacionamento que aquele trem deve ser injetado;

*Horário:* É o horário que aquele trem deve ser injetado;

*Diferença:* É a diferença, em tempo entre o horário de injeção atual em comparação com o anterior;

*Indicador Período de Injeções:* É o resultado do cálculo entre a primeira e a última injeção;

*Indicador Frequência de Injeções:* É a Média e o Desvio Padrão das Diferenças entre os horários de injeção.

#### 4.7 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos processamentos dos cenários foram tabulados e apresentados no Quadro 4.4, a seguir:

**Quadro 4.4** – Comparação dos resultados entre a programação utilizada no METRÔ-DF e o resultado do processamento do Algoritmo Moy.

Indicador / Cenário	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 2a (otimizado)	Cenário 3	Cenário 3a (otimizado)
	Dias úteis	Sábados	Sábados	Dom. e Feriados	Dom. e Feriados
<b>Período de Injeções</b>					
METRÔ-DF	01:04:00	00:32:00	00:32:00	00:30:00	00:30:00
Algoritmo Moy	00:27:32	00:32:53	00:19:47	00:31:09	00:16:45
<i>Diferença</i>	<i>132,4%</i>	<i>-2,7%</i>	<i>61,8%</i>	<i>-3,7%</i>	<i>79,1%</i>
<b>Frequência de Injeções - Média</b>					
METRÔ-DF	00:02:47	00:02:17	00:02:17	00:04:17	00:04:17
Algoritmo Moy	00:01:12	00:02:21	00:01:25	00:04:27	00:02:24
<i>Diferença</i>	<i>131,9%</i>	<i>-2,8%</i>	<i>61,2%</i>	<i>-3,7%</i>	<i>78,5%</i>
<b>Frequência de Injeções - Desvio Padrão</b>					
METRÔ-DF	00:04:04	00:01:26	00:01:26	00:03:27	00:03:27
Algoritmo Moy	00:01:28	00:02:19	00:01:34	00:03:00	00:01:45
<i>Diferença</i>	<i>177,3%</i>	<i>-38,1%</i>	<i>-8,5%</i>	<i>15,0%</i>	<i>97,1%</i>

#### 4.8 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Observa-se na comparação dos resultados uma expressiva otimização no Cenário 1 – Dias Úteis, com uma melhora de 132,4% no indicador Período de Injeções, 131,9% e 177,3% nos indicadores Frequência de Injeções – Média e Desvio Padrão, respectivamente.

Essa otimização pode ser atribuída a dificuldade manual de se realizar o PIIT em um cenário com a maior quantidade de trens a serem injetados, bem como uma maior disponibilidade de trens nos vários pátios e estacionamentos, o que resulta em um aumento de complexidade para realização do trabalho.

Nos Cenários 2 e 3, observa-se uma pequena redução no desempenho, apresentando -2,7% e -3,7% no indicador Período de Injeções e -2,8% e -3,7% no indicador Frequência de Injeções – Média. Já o indicador Frequência de Injeções – Desvio padrão apresentou um resultado de -38,1% no Cenário 2 e 15% no Cenário 3.

Neste ponto, pode-se atribuir o resultado nos Cenários 2 e 3 a dois fatores: a) verifica-se que o número trens de trens dispostos nos estacionamentos foi limitado pelo responsável do planejamento, tornando a injeção menos complexa; e b) observou-se que o carrossel, pela estratégia do operador, não se encontrava homogêneo no momento da injeção do último trem, levando cerca de 10min para sua completa regulação. Esses dois fatores contribuíram para uma apuração dos indicadores selecionados favorável ao planejamento do operador, porém a prestação de serviço não é entregue de forma otimizada.

Nos Cenários 2a e 3a, que foram processados de forma otimizada, possibilitando a utilização de todos os trens posicionados nos estacionamentos, também houve uma expressiva melhora do indicador Período de Injeções, de 61,8% e 79,1%, respectivamente, em comparação com o planejamento utilizado no METRÔ-DF.

Ressalta-se que o planejamento utilizando o Algoritmo Moy é sistemático, podendo ser testadas outras alternativas de posicionamento dos trens a fim de determinar a forma ótima de injeção dos trens.

Em complementação, fatores que alteram o desempenho do sistema, como alterações nos tempos de parada, novos perfis de velocidade, ampliação da via e novas estação, são facilmente registradas e consideradas no método aqui proposto.



## **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e apresentar um método para o Planejamento da Injeção Inicial de Trens em sistemas metroviários, que utiliza como requisitos a possibilidade de execução manual, utilizando ferramentas computacionais simples e softwares comuns.

Durante a pesquisa, foram identificados métodos e ferramentas para execução do PIIT, porém foi verificado que estes trabalhos era de difícil aplicação prática, seja por requererem equipamentos computacionais e softwares avançados, profissionais especializados ou mesmo por terem sido desenhados para sistemas metroferroviários específicos.

O método proposto foi desenhado utilizando algoritmo genérico, que foi nomeado de Algoritmo Moy, e foram apresentadas suas premissas, variáveis de entrada, de saída e indicadores de desempenho para permitir a comparação com o resultado do planejamento utilizando-se outros métodos.

Por fim, foi apresentado um Estudo de Caso no METRÔ-DF, onde desenvolvimento do PIIT é realizado de forma empírica. Foram obtidos os dados necessários para a aplicação do método e foram identificados três cenários: Dias Úteis; Sábados; e Domingos e Feriados.

Assim sendo, com base nos dados adquiridos e resultados dos processamentos, foi possível chegar a conclusões sobre a eficiência do método utilizando o Algoritmo Moy, com base nos indicadores avaliados, além de possibilitar a proposição de estudos complementares a fim de aprofundar o conhecimento no tema.

### **5.2 CONCLUSÕES**

Com base nos estudos realizados e dados adquiridos e processados durante o trabalho, é possível afirmar que pesquisas dentro do tema podem proporcionar otimização dos recursos, com o aperfeiçoamento do trabalho de Planejamento da Injeção Inicial de Trens.

O estudo de caso demonstrou que no Cenário 1 – Dias Úteis, momento em que ocorre a maior demanda de viagens e o desenvolvimento do PIIT se mostra complexo, o resultado do Algoritmo Moy foi 132% melhor que no trabalho desenvolvido manualmente no METRÔ-DF, com base no indicador Período de Injeção.

Nos Cenário 2 – Sábados e Cenários 3 – Domingos e Feriados, o resultado do Algoritmo Moy foi ligeiramente inferior, apresentando respectivamente -2,7% e -3,7% no indicador Período de Injeções. Essa diferença, apesar de marginal, pode ser atribuída a limitada disposição dos trens nos pátios e estacionamentos para atender e a injeção com intervalo irregular entre os trens, conforme apresentado na análise.

Já nos Cenário 2a – Sábados (otimizado) e Cenários 3a – Domingos e Feriados (otimizado), quando houve possibilidade de utilizar os trens estacionados ao longo da via, o resultado do Algoritmo Moy foi expressivamente melhor, apresentando respectivamente 61,8% e 79,1%, no indicador Período de Injeções. Essa otimização demonstra que, com a utilização dos recursos disponíveis, o Algoritmo Moy pode apresentar resultados superiores ao planejamento realizado manualmente.

Ressalta-se que a utilização do Algoritmo Moy é sistemática, podendo ser testados diversos cenários, com ajustes nas variáveis de entrada, exercitando cenários até atingir a configurações ótima do sistema.

Além disso, o conhecimento relativo à aplicação do método está resguardado em caso de alteração nos profissionais que realizam o trabalho de planejamento.

Confirma-se então a hipótese apresentada, sendo possível o desenvolvimento e aplicação de algoritmo genérico no PIIT possibilita a otimização da injeção dos trens, aperfeiçoando o início da operação comercial, cujo operação seja simplificada e utilizando ferramentas computacionais comuns.

Assim sendo, a adoção do método de Planejamento da Injeção Inicial de Trens utilizando Algoritmo Moy pode aperfeiçoar a prestação de serviço no METRÔ-DF, por meio de uma injeção de trens mais eficiente.

### **5.3 RECOMENDAÇÕES**

- 1) O presente trabalho teve como estudo de caso o METRÔ-DF, que, segundo levantamento apresentado, faz parte do grupo de operadores responsáveis pelo gerenciamento de duas linhas de serviço que representam 50,6% do total de empresas consideradas.

Nessa linha, sugere-se, para estudos complementares, a aplicação do método proposto em outros sistemas, a fim de testar a sua eficiência em condições diversificadas.

- 2) O método proposto, dentro do estudo de caso, teve seus resultados confrontados apenas com o trabalho realizado de forma empírica.

Sugere-se, então, estudos complementares que confrontem os resultados obtidos com outros métodos, em especial àqueles utilizados por ferramentas comerciais disponíveis no mercado.

- 3) O estudo teve como foco o Planejamento da Injeção Inicial de Trens. Entretanto, foram listadas outras fases dentro do Planejamento da Circulação de Trens, a saber: 1) Injeções e Recolhimentos Intermediários; 2) Recolhimento Final da Operação; e 3) Regulação do Carrossel.

Sugere-se que estas fases sejam objeto de estudos complementares, dentro das premissas aqui apresentadas, permitindo uma melhor utilização dos recursos para a prestação de serviços de transporte.

- 4) O resultado do método proposto foi desenhado para fornecer a injeção ótima de trens, conforme as variáveis de entrada. Porém, o método pode ser ajustado para o aperfeiçoamento da localização dos Pátios e estacionamento, além da racionalização da frota.

Sugere-se que estudos complementares utilizem o método na fase de estudos da linha, a fim de determinar a localização ótima dos pátios e estacionamentos e racionalização da frota de trens.

- 5) O estudo de caso apresentado obteve, como resultado, uma injeção de trens aperfeiçoada para o atendimento da demanda. Porém, não foi objeto de estudo, a identificação dos elementos econômicos e financeiros desse aperfeiçoamento.

Sugere-se que estudos complementares apurem, de forma precisa, o resultado econômico e financeiro da utilização do método, que subsidiará a tomada de decisão para sua implantação.

- 6) O método foi direcionado para sistemas que operam em carrossel com headway homogêneo. Porém, para sistemas complexos, com diversas linhas, fatores como integração entre linhas pode ser preponderante.

Sugere-se, por fim, que estudos complementares aperfeiçoem o método proposto para atender, também, os requisitos de integração entre diversas linhas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDEREGG, L.; EIDENBENZ, S.; GANTENBEIN, M.; et al. Train Routing Algorithms: Concepts, Design Choices, and Practical Considerations. **5th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX03)**, p. 106–118, 2003. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.11.9306>>. .

ANDRADE, C. E. S. DE. **Avaliação do Desempenho de Sistemas Metroferroviários sob a Ótica da Qualidade de Serviços Prestados ao Usuários: Aplicação no Metrô do Rio de Janeiro**, 2009. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRINCO, R. Mobilidade urbana e transporte público: sobre a oportunidade de implantação de sistemas metroviários. **Indicadores Econômicos FEE**, v. 40, n. 1, p. 105–116, 2012.

DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO, M. C.; TAKAHASHI, R. F.; BERTOLOZZI, M. R. Revisão sistemática: noções gerais. **Revista da Escola de Enfermagem da U S P**, v. 45, n. 5, p. 1260–1266, 2011.

FERRAZ, A. C. “COCA” P.; TORRES, I. G. E. **Transporte Público Urbano**. 2º ed. São Carlos: Rima, 2004.

GOVERDE, R. M. P. **Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis**, 2005. Technische Universiteit Delft.

GOVERDE, R. M. P.; CACCHIANI, V.; TOTH, P. A three-level framework for performance-based railway timetabling. **Transportation Research Part C Emerging Technologies**, , n. July, 2016.

GUO, X.; SUN, H.; WU, J.; et al. Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 96, p. 46–67, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84996523367&doi=10.1016%2Fj.trb.2016.11.005&partnerID=40&md5=af87da82268db7c35d79566fc66bb88d>>. .

HOEL, L. A.; GARBER, N. J.; SADEK, A. W. **Engenharia de Infraestrutura de Transportes**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

HUANG, M.; QU, H.; LIU, X.; TANG, Y. Transfer-Oriented Dispatching Optimization of Rail Transit Network. **Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Southwest Jiaotong University**, v. 52, n. 2, p. 326–333, 2017. Science Press. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019695718&doi=10.3969%2Fj.issn.0258-2724.2017.02.016&partnerID=40&md5=c3566ddabbe2f8bf1eb04a6b27c175e1>>. .

HUANG, Y.; YANG, L.; TANG, T.; CAO, F.; GAO, Z. Saving energy and improving service quality: Bicriteria train scheduling in urban rail transit systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 12, p. 3364–3379, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em:

<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84966377328&doi=10.1109%2FTITS.2016.2549282&partnerID=40&md5=38550dbf7e36f0a7719bce9770f084ff>>. .

KANG, L.; ZHU, X. Strategic timetable scheduling for last trains in urban railway transit networks. **Applied Mathematical Modelling**, v. 45, p. 209–225, 2016. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2016.12.016>>. .

LI, F.; GAO, Z.; LI, K.; WANG, D. Z. W. Train Routing Model and Algorithm Combined with Train Scheduling. **Journal of Transportation Engineering**, v. 139, n. January, p. 81–91, 2013.

LIU, F.; XUN, J.; BIN, N. An optimization method for train driving trajectory in urban rail systems. Proceedings - 2016 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, YAC 2016. **Anais...** . p.413–418, 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85011079614&doi=10.1109%2FYAC.2016.7804929&partnerID=40&md5=b2a5b88373bdab31bbfa22a23df30b5b>>. .

MAROTI, G. **Operations Research Models for Railway Rolling Stock Planning** Operations research models for railway rolling stock planning – Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2006. Technische Universiteit Eindhoven.

MENG, X.; JIA, L.; QIN, Y. Train Timetable Optimizing and Rescheduling Based on Improved Particle Swarm Algorithm. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2197, n. 1, p. 71–79, 2011.

METRÔ-DF. Companhia do Metropolitano do Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.metro.df.gov.br>>. Acesso em: 1/6/2017.

METRÔ-SP. Capacidade do Transporte Urbano de Passageiros sobre Trilhos. , 2005. São Paulo-SP: Não Publicado.

NOVAES, A. G. **Sistemas de Transportes**. São Paulo - SP - Brasil: Edgard Blucher Ltda, 1986.

ORTUZAR, J. DE D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 2011.

PEETERS, L. W. P. **Cyclic railway timetable optimization**. **Trail Thesis Series**, 2003. Erasmus University Rotterdam. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1765/1ID-1500>>. .

PEREIRA, E. P. **Modelo Matemático para Planejamento da Circulação de Trens em uma Ferrovia de Linha Singela**, Dissertação de Mestrado, 2015. Departamento de Engenharia Civil. UFES.

POURYOUSEF, H.; LAUTALA, P. Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules. **Journal of Rail Transport Planning and Management**, v. 5, n. 4, p. 211–224, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2015.10.001>>. .

SANTOS, L. DA S.; LOUREIRO, S. A.; LIMA JR, O. F.; BERTONCINI, B. V.; BEZERRA, O. B. Análise da Literatura de Geografia do Tempo Aplicada ao Transporte Urbano de Cargas. **Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes ANPET**, 2014.

SELS, P. **Large-Scale, Passenger Oriented, Cyclic Railway Timetabling and Station Platforming and Routing**, 2016.

SHEN, Y.; WANG, S. An adaptive differential evolution approach for the maximal synchronization problem of feeder buses to metro. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, v. 13, n. 6, p. 3548–3555, 2016. American Scientific Publishers. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84988957482&doi=10.1166%2Fjctn.2016.5182&partnerID=40&md5=3120234b25925df0bfc295dfd51dcf59>>. .

SU, S.; LI, X.; TANG, T.; GAO, Z. A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 2, p. 883–893, 2013.

SU, S.; TANG, T.; WANG, Y. Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an Optimal Train Control Simulation model. **Energies**, v. 9, n. 2, p. 1–19, 2016. MDPI AG. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959329078&doi=10.3390%2Fen9020105&partnerID=40&md5=b13652f44946601f88b960c6c7968ffa>>. .

SUN, L.; JIN, J. G.; LEE, D. H.; AXHAUSEN, K. W.; ERATH, A. Demand-driven timetable design for metro services. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 46, p. 284–299, 2014.

TAZONIERO, A. **Estratégias de Decisão para o Planejamento de Circulação de Trens em Tempo Real**, Dissertação de Mestrado, 2007. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.

VUCHIC, V. R. **Urban Transit: Operations, Planning and Economics**. Hoboken, New Jersey, EUA: JohnWiley & Sons, Inc, 2005.

WANG, F.; SUN, Q.-X.; MAO, B.-H.; FENG, X.-J. Calculation model for passenger assembling on one-platform-transfer station based on timetable coordination. **Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxi/Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 13, n. 3, p. 163–169, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84880021630&partnerID=40&md5=234d42962c6373b12196c9d05c2c07ea>>. .

WANG, P.; GOVERDE, R. M. P. Multiple-phase train trajectory optimization with signalling and operational constraints. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/requests/r21995986?pli=1&loginT=\\_BgnVTcSdS6RjixGVdN](https://www.researchgate.net/requests/r21995986?pli=1&loginT=_BgnVTcSdS6RjixGVdN)

ggq\_Lnz5As3eVZZ4vbX9VJZg&uid=8OoslljIZS9S0PHMeulqLPGe9EySKjw1XcN2&cp=re386\_x\_p1&ch=reg>. .

WU, J.; LIU, M.; SUN, H.; et al. Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 51, p. 1–18, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84911912580&doi=10.1016%2Fj.trc.2014.11.001&partnerID=40&md5=a0a1a9297b04c9f768eaa168e92dda86>>. .

XIN, T.; ROBERTS, C.; HE, J.; et al. Railway vertical alignment optimisation at stations to minimise energy. 2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014. **Anais...** . p.2119–2124, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84937114303&doi=10.1109%2FITSC.2014.6958016&partnerID=40&md5=5d38fa05c6ce0763df09ccca495b85dd>>. .

XU, X.; LI, K.; YANG, L. Rescheduling subway trains by a discrete event model considering service balance performance. **Applied Mathematical Modelling**, v. 40, n. 2, p. 1446–1466, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2015.06.031>>. .

YIN, J.; CHEN, D.; YANG, L.; TANG, T.; RAN, B. Efficient Real-Time Train Operation Algorithms with Uncertain Passenger Demands. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 9, p. 2600–2612, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84943165983&doi=10.1109%2FTITS.2015.2478403&partnerID=40&md5=6b688ee9848ed820bc36e2bfb3ad3cab>>. .

## APÊNDICE I – LISTAGEM DOS SISTEMAS METROVIÁRIOS

A listagem foi obtida a partir de publicação<sup>7</sup> na internet, e foram consultadas as páginas dos operadores para confirmação das informações.

Cidade	Pais	Sistema	Estações	Extensão (km)	Pass/ano	Linhas	Operador
Berlim	Alemanha	Berlin U-Bahn	173	151,7	534,5	10	Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)
Hamburgo	Alemanha	Hamburg U-Bahn	91	104	219,3	4	Hamburger Hochbahn AG
Munique	Alemanha	Munich U-Bahn	96	95	398	8	Münchner Verkehrsgesellschaft
Nuremberg	Alemanha	Nuremberg U-Bahn	48	37	128,85	3	VAG Nürnberg
Algiers	Argélia	Algiers Metro	14	13,5	16	1	RATP El-Djazair
Mecca	Arábia Saudita	Al Mashaaer Al Mugaddassah	9	18,1	4	1	Prasarana (Malaysia)
Buenos Aires	Argentina	Buenos Aires Underground	86	53,9	302,8	6	Metrovias Ministry of Transport and Communication of Armenia
Yerevan	Armênia	Yerevan Metro	10	13,4	15,4	1	
Viena	Áustria	Vienna U-Bahn	109	78,5	440,1	5	Wiener Linien
Baku	Azerbaijão	Baku Metro	25	36,7	217,5	3	Baki Metropoliteni
Minsk	Belarus	Minsk Metro	29	37,3	291	2	Minsk Metro
Bruxelas	Bélgica	Brussels Metro	59	39,9	134,8	4	STIB/MIVB
Belo Horizonte	Brasil	Belo Horizonte Metro	19	28,1	59,3	1	CBTU
Brasília	Brasil	Brasília Metro	24	42,4	35,9	2	METRÔ-DF
Porto Alegre	Brasil	Porto Alegre Metro	22	43,8	56,2	1	Trensurb
Recife	Brasil	Recife Metro	29	39,5	106,3	3	CBTU
Rio de Janeiro	Brasil	Rio de Janeiro Metro	41	58	233,6	3	Invepar
Salvador	Brasil	Salvador Metro	18	29	24	2	Companhia de Transportes de Salvador
São Paulo	Brasil	São Paulo Metro	71	80,2	1307,8	5	Companhia do Metropolitano de São Paulo (Lines 1-3, 5 & 15) ViaQuatro (Line 4)
Sofia	Bulgária	Sofia Metro	35	40	164,3	2	Metropoliten JSC
Toronto	Canada	Toronto subway	69	68,3	302,8	4	Toronto Transit Commission
Vancouver	Canada	SkyTrain	53	79,5	137,4	3	British Columbia Rapid Transit Company
Montreal	Canada	Montreal Metro	68	69,2	354	4	Société de transport de Montréal
Santiago	Chile	Santiago Metro	118	118	670,1	6	Metro S.A.
Beijing	China	Beijing Subway	278	574	3660	19	Beijing Mass Transit Railway Operation Corp., Ltd Beijing MTR Corp. Ltd.
Changchun	China	Changchun Subway	15	16,3	n/a	3	Changchun Subway
Changsha	China	Changsha Metro	43	50,2	159	2	Changsha Metro Corporation Ltd.
Chengdu	China	Chengdu Metro	123	179,43	562	6	Chengdu Rail Transit Group
Chongqing	China	Chongqing Rail Transit	126	213	693	4	Chongqing City Transportation Development & Investment (Group) Co., Ltd.
Dalian	China	Dalian Metro	68	150,4	103,8	4	Dalian Public Transportation Group Co. Ltd. (Line R2 and R3) Dalian Metro Co. Ltd. (Line M1 & M2)
Dongguan	China	Dongguan Rail Transit	15	37,8	n/a	1	Dongguan Rail Transit Corporation, Limited
Foshan	China	FMetro	18	27,7	n/a	1	Foshan Railway Investment Construction Group

<sup>7</sup> Wikipedia - List of metro systems. Disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_metro\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_metro_systems). Acesso em 02 de dezembro de 2017.



Cidade	País	Sistema	Estações	Extensão (km)	Pass/ano	Linhas	Operador
Fuzhou	China	Fuzhou Metro	21	24,89	n/a	1	Fuzhou Metro Group
Guangzhou	China	Guangzhou Metro	184	308,7	2568	10	Guangzhou Metro Corporation
Hangzhou	China	Hangzhou Metro	66	93,2	269	3	Hangzhou Metro Corporation
Harbin	China	Harbin Metro	21	22,9	n/a	2	Harbin Municipal People's Government
Hefei	China	Hefei Metro	23	24,6	n/a	2	Hefei Urban Mass Transit Co., Ltd.
Hong Kong	China	MTR	161	174,7	1716	23	MTR Corporation
Kunming	China	Kunming Rail Transit	60	87,2	196	4	Kunming Rail Transit Corporation
Nanchang	China	Nanchang Metro	40	44,3	80	2	Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd.
Nanjing	China	Nanjing Metro	158	294	832	8	Nanjing Metro
Nanning	China	Nanning Metro	25	32,1	n/a	1	Nanning Rail Transport Limited
Nanning	China	Ningbo Rail Transit	51	74,5	140	2	Ningbo Rail Transit Co.,Ltd.
Qingdao	China	Qingdao Metro	40	43,6	n/a	2	Qingdao Metro Corporation
Shanghai	China	Shanghai Metro	364	588	3401	14	Shanghai Shentong Metro Group
Shenyang	China	Shenyang Metro	43	55,1	299	2	Shenyang Metro
Shenzhen	China	Shenzhen Metro	199	286,2	1297	8	Shenzhen Metro Group
Shijiazhuang	China	Shijiazhuang Metro	26	28,33	n/a	2	Shijiazhuang Metro
Suzhou	China	Suzhou Rail Transit	97	121	150	3	Suzhou Metro
Tianjin	China	Tianjin Metro	104	166	277	5	Tianjin Metro General Corp.
Wuhan	China	Wuhan Metro	130	184,3	712	5	Wuhan Metro Co., Ltd
Wuxi	China	Wuxi Metro	45	56	83	2	Wuxi Metro Corporation
Xi'an	China	Xi'an Metro	66	90	408	3	Xi'an Municipal People's Government Subway Construction
Zhengzhou	China	Zhengzhou Metro	61	93,6	213	3	Zhengzhou Metro Group Corporation
Medellín	Colômbia	Medellín Metro	27	31,3	206,9	2	Metro de Medellín
Pyongyang	Coreia do Norte	Pyongyang Metro	17	22	36	2	Transport and Communication Commission
Busan	Coreia do Sul	Busan Metro	135	139,9	350	6	Busan Transportation Corporation
Daegu	Coreia do Sul	Daegu Metro	58	81,2	163	2	Daegu Metropolitan Transit Corporation
Daejeon	Coreia do Sul	Daejeon Metro	22	22,7	40	1	Daejeon Metropolitan Express Transit Corporation
Gwangju	Coreia do Sul	Gwangju Metro	20	20,1	18	1	Gwangju Metropolitan Rapid Transit Corporation
Incheon	Coreia do Sul	Incheon Subway	55	29,4	86	2	Incheon Transit Corporation
Seul	Coreia do Sul	Seoul Subway (lines 1-9)	307	331,5	2856	21	Seoul Metro, Korail, Incheon Transit Corporation, and private rapid transit operators
Copenhagen	Dinamarca	Copenhagen Metro	22	20,4	61	2	Metro Service
Cairo	Egito	Cairo Metro	61	77,9	1314	3	Cairo Metro - The Egyptian Co.
Dubai	Emirados Árabes	Dubai Metro	47	74,6	190,7	2	Serco Group
Barcelona	Espanha	Barcelona Metro	180	146	416,2	12	TMB
Bilbao	Espanha	Metro Bilbao	48	49,2	87,4	3	Biscay Transport Consortium (CTB)
Madrid	Espanha	Madrid Metro	301	294	569,7	13	Metro De Madrid
Atlanta	Estados Unidos	MARTA	38	77	68,7	4	Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority
Baltimore	Estados Unidos	Baltimore Metro Subway	14	24,9	11,2	14	Maryland Transit Administration
Boston	Estados Unidos	MBTA Subway	51	61	172,1	5	Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA)
Chicago	Estados Unidos	Chicago "L"	145	165,4	238,6	8	Chicago Transit Authority

Cidade	País	Sistema	Estações	Extensão (km)	Pass/ano	Linhas	Operador
Cleveland	Estados Unidos	RTA Rapid Transit: Red Line	18	31	6,4	1	RTA Rapid Transit
Los Angeles	Estados Unidos	Metro Rail	16	28	45,9	6	Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority
Miami	Estados Unidos	Metrorail	23	40,1	21,1	2	Miami-Dade Transit (MDT)
Nova Iorque	Estados Unidos	Staten Island Railway	21	22,5	8,6	1	New York City Transit Authority
Nova Iorque	Estados Unidos	Port Authority Trans-Hudson	13	22,2	78,6	4	Port Authority Trans-Hudson
Nova Iorque	Estados Unidos	New York City Subway	425	380,2	1757	25	New York City Transit Authority
Philadelphia	Estados Unidos	PATCO Speedline	13	22,9	10,7	1	Port Authority Transit Corporation
Philadelphia	Estados Unidos	SEPTA	75	59,1	94,2	2	SEPTA
San Francisco	Estados Unidos	BART	45	167	135,3	6	San Francisco Bay Area Rapid Transit District
San Juan, Washington, D.C.	Estados Unidos	Tren Urbano	16	17,2	7,9	1	Alternate Concepts, Inc (ACI)
Washington, D.C.	Estados Unidos	Washington Metro	91	188	234,2	6	Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA)
Manila	Filipinas	Manila Metro Rail Transit System	13	16,9	158,8	1	Department of Transportation
Manila	Filipinas	Manila Light Rail Transit System	31	33,4	243,6	2	Light Rail Manila Corporation
Helsinki	Finlândia	Helsinki Metro	25	35	62	2	Helsinki City Transport
Lille	França	Lille Metro	60	45	107,5	2	Transpole
Lyon	França	Lyon Metro	40	32	195,6	4	TCL
Marseille	França	Marseille Metro	28	21,5	83,3	2	RTM
Paris	França	Paris Métro	302	214	1518,6	16	RATP
Rennes	França	Rennes Metro	15	9,4	33,3	1	Service des Transports en Commun de l'Agglomération Rennaise (STAR)
Toulouse	França	Toulouse Metro	37	28,2	107,4	3	Tisséo
Tbilisi	Geórgia	Tbilisi Metro	23	27,1	105,4	2	Tbilisi Transport Company
Athens	Grécia	Athens Metro	61	84,7	264,4	3	Statheres Sygkoinonies S.A.
Budapest	Hungria	Budapest Metro	52	38,2	412	4	Budapest Transport Ltd. (BKV)
Bangalore	Índia	Namma Metro	41	42,3	16,9	2	Bangalore Metro Rail Corporation Ltd. (BMRCL)
Chennai	Índia	Chennai Metro	20	27,9	n/a	2	Chennai Metro Rail Limited (CMRL)
Delhi	Índia	Delhi Metro	148	218	1007,9	6	Delhi Metro Rail Corporation Ltd (DMRC)
Gurgaon	Índia	Rapid MetroRail Gurgaon	11	11,7	2,3	1	Rapid MetroRail Gurgaon Ltd. (RMGL)
Hyderabad	Índia	Hyderabad Metro	24	30	n/a	3	Government of Telangana, L&T
Jaipur	Índia	Jaipur Metro	9	9,6	7,2	1	Jaipur Metro Rail Corporation (JMRC)
Kochi	Índia	Kochi Metro	16	18,4	n/a	1	Kochi Metro Rail Ltd. (KMRL)
Kolkata	Índia	Kolkata Metro	24	27,2	197,4	1	Metro Railway
Lucknow	Índia	Lucknow Metro	8	8,5	n/a	1	Lucknow Metro Rail Corporation (LMRC)
Mumbai	Índia	Mumbai Metro	12	11,4	n/a	1	Metro One Operator Private Limited
Glasgow	Inglaterra	Glasgow Subway	15	10,4	12,8	1	SPT
Londres	Inglaterra	Docklands Light Railway	45	34	117	7	KeolisAmey Docklands Ltd.
Londres	Inglaterra	London Underground	270	402	1340	11	London Underground Limited
Newcastle	Inglaterra	Tyne and Wear Metro	60	77,5	40,3	2	Nexus
Isfahan	Irã	Isfahan Metro	15	16,2	n/a	1	Isfahan Urban and Suburban Railway Organization

Cidade	País	Sistema	Estações	Extensão (km)	Pass/ano	Linhas	Operador
Mashhad	Irã	Mashhad Urban Railway	31	32	38,6	2	Mashhad Urban Railway Operation Company (MUROC)
Shiraz	Irã	Shiraz Metro	14	22,4	n/a	1	Shiraz Urban Railway Organization
Tabriz	Irã	Tabriz Metro	6	7	n/a	1	Tabriz Urban and Suburban Railway Organization
Tehran	Irã	Tehran Metro	131	173	717	7	Tehran Urban and Suburban Railway Company (TUSRC)
Brescia	Itália	Brescia Metro	17	13,7	17	1	Brescia Mobilità S.p.A.
Catania	Itália	Catania Metro	10	8,8	3	1	Ferrovía Circumetnea
Genoa	Itália	Genoa Metro	8	7,1	11	1	Azienda Mobilità e Trasporti S.p.A. (AMT)
Milan	Itália	Milan Metro	113	101	468,3	5	Azienda Trasporti Milanesi
Naples	Itália	Naples Metro	22	20,2	38,1	3	Azienda Napoletana Mobilità s.p.a. (ANM)
Roma	Itália	Rome Metro	73	60	279	3	ATAC
Turin	Itália	Turin Metro	21	13,2	41,1	1	Gruppo Torinese Trasporti (GTT)
Fukuoka	Japão	Fukuoka City Subway	35	29,8	160,4	3	Fukuoka City Transportation Bureau
Hiroshima	Japão	Astram Line	21	18,4	23,1	1	Hiroshima Rapid Transit
Kobe	Japão	Kobe Municipal Subway	25	30,6	112	2	Kobe Municipal Transportation Bureau
Kyoto	Japão	Kyoto Municipal Subway	31	31,2	138,4	2	Kyoto Municipal Transportation Bureau
Nagoya	Japão	Nagoya Municipal Subway	87	93,3	472,6	7	Transportation Bureau City of Nagoya
Osaka	Japão	Osaka Municipal Subway	123	129,9	870,4	8	Osaka Municipal Transportation Bureau
Sapporo	Japão	Sapporo Municipal Subway	46	48	226,3	3	Sapporo City Transportation Bureau
Sendai	Japão	Sendai Subway	29	28,7	83,7	2	Sendai City Transportation Bureau
Toquio	Japão	Rinkai Line	8	12,2	90,7	1	Tokyo Waterfront Area Rapid Transit
Toquio	Japão	Yurikamome Transit	16	14,7	45,5	1	Tokyo Waterfront New Transit Corporation
Toquio	Japão	Toei Subway	106	109	973,6	4	Tokyo Metropolitan Bureau of Transportation
Toquio	Japão	Tokyo Metro	179	195,1	2642,1	9	Tokyo Metro Co., Ltd.
Yokohama	Japão	Minatomirai Line	6	4,1	73,7	1	Yokohama Minatomirai Railway Company
Yokohama	Japão	Yokohama Municipal Subway	40	53,4	235,8	2	Yokohama City Transportation Bureau
Almaty	Cazaquistão	Almaty Metro	9	11,3	10	1	Communal State Enterprise "Metropoliten"
Kuala Lumpur	Malásia	Rapid KL	116	142,5	145	5	Rapid KL
Mexico City	México	Mexico City Metro	147	226,5	1605	12	Sistema de Transporte Colectivo (STC)
Monterrey	México	Monterrey Metro	31	32	175,1	2	Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey
Oslo	Noruega	Oslo Metro	101	86	88	5	Sporveien T-banen
Amsterdã	Países Baixos	Amsterdam Metro	33	31,4	59,5	4	GVB
Rotterdam	Países Baixos	Rotterdam Metro	62	78,3	86,4	5	RET
Cidade do Panamá	Panamá	Panama Metro	12	13,7	43,2	1	El Metro de Panamá
Lima	Peru	Lima Metro	26	34,6	91	1	Ferrovías (Grupo Emepa)
Varsóvia	Polónia	Warsaw Metro	27	29	187,3	2	Metro Warszawskie
Lisboa	Portugal	Lisbon Metro	56	44,1	153,2	4	Metropolitano de Lisboa, EPE
Prague	República Checa	Prague Metro	61	65,2	461,2	3	Prague Transport Company
Santo Domingo	República Dominicana	Santo Domingo Metro	30	27,4	66,2	2	OPRET

Cidade	País	Sistema	Estações	Extensão (km)	Pass/ano	Linhas	Operador
Bucharest	Romênia	Bucharest Metro	53	71,4	173,5	4	Metrorex
Kazan	Rússia	Kazan Metro	10	15,8	27,2	1	MetroElektroTrans
Moscou	Rússia	Moscow Metro	206	346,1	2378,3	14	Moskovsky Metropoliten
Nizhny Novgorod	Rússia	Nizhny Novgorod Metro	14	18,8	30,4	2	Nizhegorodsky metropoliten
Novosibirsk	Rússia	Novosibirsk Metro	13	15,9	79	2	Novosibirskiy metropoliten
Saint Petersburg	Rússia	Saint Petersburg Metro	67	113,2	740,4	5	Peterburgskiy metropoliten
Samara	Rússia	Samara Metro	10	12,7	15,6	1	Samarskiy metropoliten
Yekaterinburg	Rússia	Yekaterinburg Metro	9	12,7	49,2	1	Ekaterinburgskiy metropoliten
Singapura	Singapura	Mass Rapid Transit	119	199,2	1008	5	SMRT Trains (SMRT Corporation)
Stockholm	Suécia	Stockholm Metro	100	105,7	330	7	MTR Nordic
Lausanne	Suíça	Lausanne Metro	14	5,9	28	2	Lausanne Metro
Bangkok	Taiwan	Metropolitan Rapid Transit	34	43	92,4	2	Bangkok Expressway and Metro Public Company Limited
Bangkok	Taiwan	BTS Skytrain	34	36,5	218,7	2	Bangkok Mass Transit System Public Company Limited
Kaohsiung	Taiwan	Kaohsiung Mass Rapid Transit	37	42,7	63,1	3	Kaohsiung Rapid Transit Corporation
Taoyuan	Taiwan	Taoyuan Metro	22	53,1	n/a	1	Taoyuan City Government
Taipei	Taiwan	Taipei Metro	117	131,1	740	5	Taipei Rapid Transit Corporation
Adana	Turquia	Adana Metro	13	13,9	14	1	Adana Metropolitan Municipality
Ankara	Turquia	Ankara Metro	54	65	104,1	4	Electricity, Gas, Bus General Directorate (EGO)
Bursa	Turquia	Bursaray	38	38,9	91,3	2	Burulaş
Istanbul	Turquia	Istanbul Metro	73	145	384,9	4	Metro Istanbul
İzmir	Turquia	İzmir Metro	17	20	91,3	1	İzmir Metro A.Ş.
Dnipro	Ucrania	Dnipro Metro	6	7,1	7,5	1	Dniprovskiy metropoliten
Kharkiv	Ucrania	Kharkiv Metro	30	38,1	231,1	3	Kharkivskiy metropoliten
Kiev	Ucrania	Kiev Metro	52	67,6	484,6	3	Kyivskiy Metropoliten
Tashkent	Uzbequistão	Tashkent Metro	29	36,2	53,5	3	Toshkent Metropoliteni
Caracas	Venezuela	Caracas Metro	49	63,6	495	4	Compañía Anónima Metro de Caracas
Total			174	10825	13492,3	2697,3	674

## APÊNDICE II – PROTOCOLO DA REVISÃO DA LITERATURA

### Introdução

Para a verificação do estado da arte da literatura sobre o tema proposto, foi realizada a Revisão Sistemática da Literatura. Segundo De-la-Torre-Ugarte-Guanolo *et al.* (2011), a revisão sistemática é uma metodologia para identificar trabalhos sobre um determinado assunto, de forma objetiva e explícita, permitindo a verificação dos resultados e reprodução da pesquisa.

A metodologia utilizada consistiu em seis passos, que exploram o problema de pesquisa, a estratégia, os critérios de inclusão e exclusão, a seleção e análise dos artigos encontrados e a apresentação dos resultados (Santos *et al.*, 2014). Os passos, definições e finalidades foram determinados e apresentados a seguir:

#### Passo 1: Definição do problema de pesquisa

- Problema de pesquisa: Qual é o panorama da literatura internacional sobre o planejamento da circulação de trens metroviários?
  - Ampliar o conhecimento relacionado ao planejamento da circulação de trens metroviários.

#### Passo 2: Definição da estratégia de pesquisa

- Horizonte de tempo: De 1988 a 2017:
  - Identificar a literatura sobre o tema no período de 30 anos.
- Bases pesquisadas: CAPES (CAFe), Google Scholar, Science Direct, Emerald e Scopus:
  - Pesquisar nos principais indexadores de material científico.
- Identificação de estudos: Buscas nos mecanismos citados por meio de palavras-chave, com uso de partícula combinatória ou por definição precisa do tema, conforme apresentado no Quadro 1:

**Quadro 1 – Termos e Combinações de pesquisa**

<b>Termo</b>	<b>Comentário</b>
<i>metro AND timetable</i>	Combinação da palavra-chave <b>metro</b> com os tópicos do locus da pesquisa.
<i>metro AND planning</i>	
<i>metro AND scheduling</i>	
<i>subway AND timetable</i>	Combinação da palavra-chave <b>subway</b> com os tópicos do locus da pesquisa.
<i>subway AND planning</i>	
<i>subway AND scheduling</i>	
<i>"subway timetable"</i>	Combinação estrita da palavra-chave <b>subway</b> com os tópicos do locus da pesquisa.
<i>"subway planning"</i>	
<i>"subway scheduling"</i>	

### Passo 3: Critérios de inclusão ou exclusão

- Critério de exclusão:
  - Todos os trabalhos que não sejam artigos científicos.
  - Resultados repetidos.
    - Limpeza da base de dados, evitando trabalhos repetidos e não classificados como artigo
- Critério de inclusão: Literatura sobre planejamento e operação de transporte que, apesar de não estar diretamente relacionada com sistemas metroviários, acrescentem elementos à discussão. Pesquisa
  - Identificar estudos que abordem o tema proposto.

### Passo 4: Seleção dos artigos

- Critérios de seleção: Artigos científicos que atendam ao objetivo do trabalho, ou seja, que se relacionem com o planejamento da circulação de trens.
  - Selecionar artigos que abordem o tema proposto.

### Passo 5: Análise dos artigos

- Elementos para análise: Avaliação inicial do tema do artigo; análise do objetivo, metodologia e resultados do artigo.
- Avaliação das referências bibliográficas dos artigos com maior aderência ao tema.
  - Ampliar a compreensão sobre temática em estudo, mediante análise da literatura internacional.

### Passo 6: Apresentação dos resultados

- Resultado: Elaboração de capítulo sobre o estado da arte do tema a ser incorporado na dissertação.

- Apresentar os resultados, classificados por Ano, Tema e uma breve explicação sobre o assunto.

## Resultados da Pesquisa

Com base no protocolo estabelecido, a pesquisa foi realizada nas bases de dados selecionadas e os resultados foram agrupados em Pesquisa Combinatória e Pesquisa Estrita e apresentados no Quadro 2:

**Quadro 2** – Resultado da Pesquisa nas Bases de Dados.

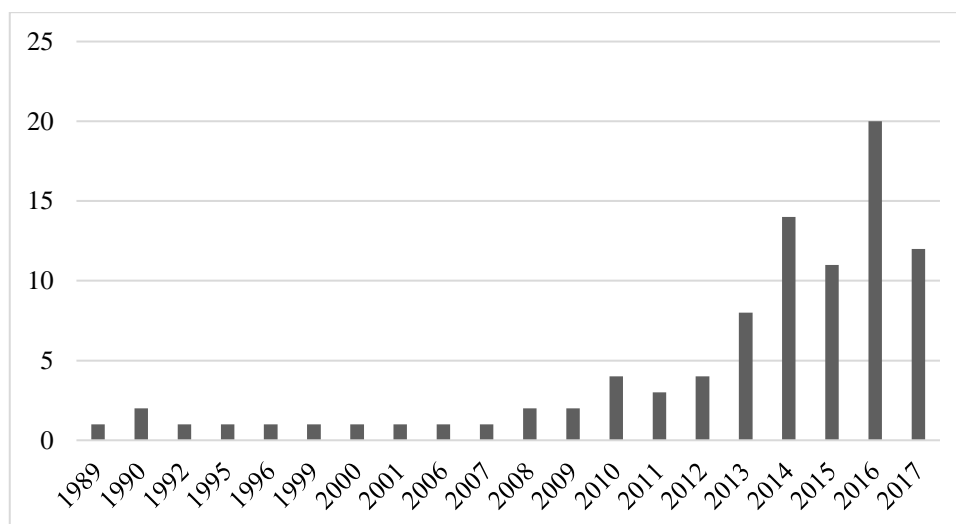
TERMOS DA BUSCA PALAVRA-CHAVE	BASE DE DADOS					TOTAL	TOTAL (%)
	CAFe	Google Scholar	Science Direct	Emerald	Scopus		
<b><i>Pesquisa combinatória</i></b>							
<i>metro AND timetable</i>	2.356	13.800	839	65	108	17.168	2,25%
<i>metro AND planning</i>	57.391	428.000	17.429	1.458	1.554	505.832	66,23%
<i>metro AND scheduling</i>	5.833	38.800	6.164	479	224	51.500	6,74%
<i>subway AND timetable</i>	1.184	6.920	420	29	103	8.656	1,13%
<i>subway AND planning</i>	25.917	123.000	7.157	626	1.064	157.764	20,66%
<i>subway AND scheduling</i>	2.321	17.000	2.793	204	141	22.459	2,94%
<b><i>Subtotal</i></b>	<b>95.002</b>	<b>627.520</b>	<b>34.802</b>	<b>2.861</b>	<b>3.194</b>	<b>763.379</b>	<b>99,96%</b>
<b><i>Pesquisa estrita</i></b>							
<i>"subway timetable"</i>	20	79	9	0	6	114	0,01%
<i>"subway planning"</i>	22	123	12	0	11	168	0,02%
<i>"subway scheduling"</i>	1	29	17	0	2	49	0,01%
<b><i>Subtotal B</i></b>	<b>43</b>	<b>231</b>	<b>38</b>	<b>0</b>	<b>19</b>	<b>331</b>	<b>0,04%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>95.045</b>	<b>627.751</b>	<b>34.840</b>	<b>2.861</b>	<b>3.213</b>	<b>763.710</b>	<b>100%</b>

A Pesquisa Combinatória, que associou as palavras-chave por meio do condicionante “AND”, trouxe um total de 763.379 itens, equivalente a 99,96% dos resultados obtidos. O resultado expressivo pode ser atribuído ao fato de que a pesquisa retornou todo material científico cujo texto contém as palavras-chave em qualquer posição. Dessa forma, a pesquisa trouxe um gama de resultados que não se relacionam com o objetivo do trabalho.

A Pesquisa Estrita, cujo objetivo era detectar as palavras-chave na ordem em que elas se apresentam, foi assertiva quanto ao relacionamento com o tema proposto, trazendo o total de 331 itens, equivalente a 0,04% dos resultados obtidos.

A partir do resultado da pesquisa estrita, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão, quando os itens repetidos e aqueles que não foram classificados como artigos científicos foram excluídos, obtendo-se um total de 91 artigos a serem analisados.

A distribuição temporal dos artigos se concentrou nos últimos 5 anos, com 8 artigos em 2013, 14 artigos em 2014, 11 artigos em 2015, 20 artigos em 2016 e 12 artigos em 2017, e a distribuição pode ser observada na Figura 1:



**Figura 1** – Distribuição dos artigos em 30 anos.

Na análise dos artigos selecionados, foi possível classifica-los em 7 grupos, sendo 3 diretamente relacionados com o tema e não relacionado com tema, conforme apresentado no Quadro 3:

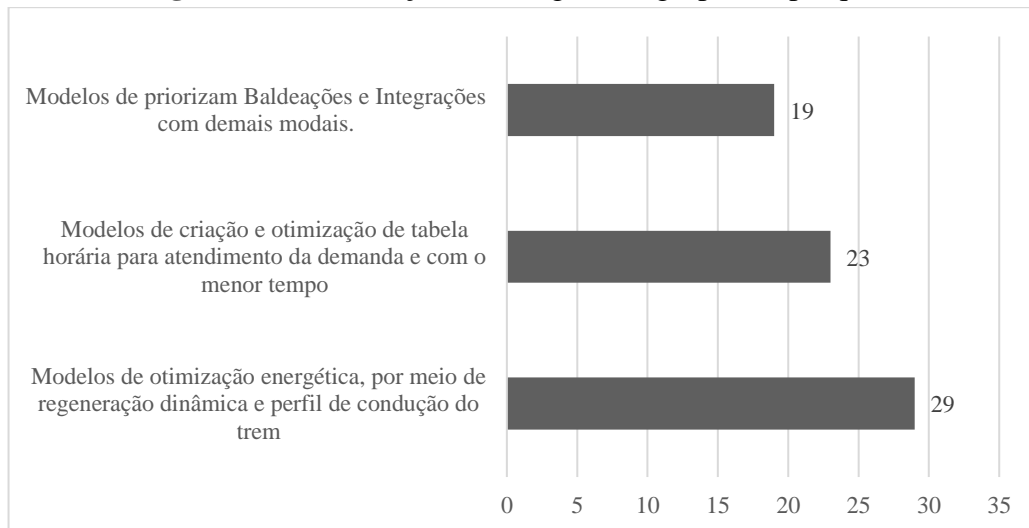
**Quadro 3** – Classificação dos Métodos observados na Literatura.

Grupo	Qtd.	%
<b>Relacionado com tema</b>		
Métodos de otimização energética, por meio de regeneração dinâmica e perfil de condução do trem	29	31,9%
Métodos de criação e otimização de tabela horária para atendimento da demanda e com o menor tempo	23	25,3%
Métodos de priorizam Baldeações e Integrações com demais modais.	19	20,9%
<b>Não relacionado com tema</b>		
Fluxo de usuários	7	7,7%
Sistemas de informação de controle e aos usuários	5	5,5%
Construção, manutenção e tecnologia empregada	7	7,7%
Demais artigos não relacionados com o tema	6	6,6%



A classificação dos artigos nos grupos relacionados com o tema procurou isolar o principal tema, todavia 5 artigos receberam duas classificações, pois tratavam de forma equivalente os assuntos. A distribuição do quantitativo de artigos relacionados com o tema nos grupos pode ser observada na **Figura 2**:

**Figura 2** – Distribuição dos artigos nos grupos de pesquisa.



A seguir, os conceitos dos artigos relacionados com os temas serão apresentados a partir dos achados na pesquisa, com base nos trabalhos desenvolvidos.

Porém, que o material não relacionado com o tema não será objeto de apresentação, pois tratam de assuntos como análise de acidentes, avaliação de emissão de poluentes, entre outros.

## APÊNDICE III – DADOS DA LINHA HIPOTÉTICA DE SERVIÇO METROVIÁRIO

Apresenta-se os dados relativos a Linha Hipotética, bem como a Matriz Posição/Locais de Entrada (análise mesoscópica), para demonstração de aplicação do Algoritmo Moy:

Cumprimento da Linha:	32 minutos
Número de Estações:	8 estações
Número de Trens:	8 trens
Headway:	4 minutos
Horário de Início da Operação:	06:00:00
Limite de Trens por Local de Entrada:	Pátio 1: sem limite Pátio 2: sem limite Estacionamento: 2 trens

### Matriz Marcos/Locais de Entrada

Marcos	Ordem	Tempo (seg)	Pátio 1 (seg)	Pátio 2 (seg)	Estac. 1 (seg)
<b>Pátio 1</b>					
Marco 1	2	0	0	1425	985
Estação 1a	2	70	70	1495	1055
Marco 2	2	65	135	1560	1120
Estação 2a	2	45	180	1605	1165
Marco 3	2	75	255	1680	1240
Estação 3a	2	55	310	1735	1295
Marco 4	2	70	380	1805	1365
Estação 4a	2	55	435	1860	1420
Marco 5	2	60	495	1920	1480
<b>Pátio 2</b>					
Estação 5a	3	55	550	55	1535
Marco 6	3	50	600	105	1585
Estação 6a	3	65	665	170	1650
Marco 7	3	50	715	220	1700
Estação 7a	3	55	770	275	1755
Marco 8	3	60	830	335	1815
Estação 8a	3	45	875	380	1860
Marco 9	3	60	935	440	1920
<b>Estacionamento</b>					
Estação 8b	1	65	1000	505	65
Marco 10	1	70	1070	575	135
Estação 7b	1	45	1115	620	180
Marco 11	1	60	1175	680	240
Estação 6b	1	50	1225	730	290
Marco 12	1	65	1290	795	355
Estação 5b	1	75	1365	870	430
Marco 13	1	55	1420	925	485
Estação 4b	1	60	1480	985	545
Marco 14	1	65	1545	1050	610
Estação 3b	1	60	1605	1110	670
Marco 15	1	65	1670	1175	735
Estação 2b	1	60	1730	1235	795
Marco 16	1	55	1785	1290	850
Estação 1b	1	60	1845	1350	910
Marco 1	1	75	1920	1425	985

## APÊNDICE IV – MATRIZ POSIÇÃO/LOCAIS DE ENTRADA

Apresenta-se a Matriz Marcos/Locais de Entrada a partir dos dados obtidos juntos ao METRÔ-DF.

O METRÔ-DF utiliza o sistema de blocos fixos, que são utilizados como delimitadores para marcação dos tempos de percurso ao longo da via férrea. Esses blocos são identificados por uma codificação interna do sistema, que foram mantidos nessa apresentação.

Marcos	Trecho	Locais de Entrada (em segundos)								
		Base	PRC	TF-1	TF-2	TF-3	TF-4	TF-5	ECE	ESM
<b>PRC</b>		<b>20</b>	<b>20</b>							
E02-1E08T	3	25	45	1699	3709	2677	842	4617	2704	2195
E02-1E07T	3	11	56	1710	3720	2688	853	4628	2715	2206
E02-1E06T	3	7	63	1717	3727	2695	860	4635	2722	2213
CTL-1	3	58	121	1775	3785	2753	918	4693	2780	2271
E02-1E04T	3	13	134	1788	3798	2766	931	4706	2793	2284
E02-1E03T	3	13	147	1801	3811	2779	944	4719	2806	2297
E02-1E02T	3	14	161	1815	3825	2793	958	4733	2820	2311
GAL-1	3	80	241	1895	3905	2873	1038	4813	2900	2391
E02-1W01T	3	21	262	1916	3926	2894	1059	4834	2921	2412
102-1	3	82	344	1998	4008	2976	1141	4916	3003	2494
104-1	3	22	366	2020	4030	2998	1163	4938	3025	2516
E02-1W04T	3	21	387	2041	4051	3019	1184	4959	3046	2537
106-1	3	21	408	2062	4072	3040	1205	4980	3067	2558
E02-1W06T	3	22	430	2084	4094	3062	1227	5002	3089	2580
108-1	3	83	513	2167	4177	3145	1310	5085	3172	2663
110-1	3	22	535	2189	4199	3167	1332	5107	3194	2685
E07-1W01T	3	14	549	2203	4213	3181	1346	5121	3208	2699
E07-1W02T	3	15	564	2218	4228	3196	1361	5136	3223	2714
112-1	3	76	640	2294	4304	3272	1437	5212	3299	2790
E07-1W04T	3	22	662	2316	4326	3294	1459	5234	3321	2812
114-1	3	85	747	2401	4411	3379	1544	5319	3406	2897
E11-1E08T	3	25	772	2426	4436	3404	1569	5344	3431	2922
E11-1E07T	3	24	796	2450	4460	3428	1593	5368	3455	2946
ASA-1	3	86	882	2536	4546	3514	1679	5454	3541	3032
E11-1E05T	3	25	907	2561	4571	3539	1704	5479	3566	3057
E11-1E04T	3	19	926	2580	4590	3558	1723	5498	3585	3076
E11-1E03T	3	17	943	2597	4607	3575	1740	5515	3602	3093
<b>TF-5</b>		<b>32</b>						<b>32</b>		
E11-1E02T	2	17	960	2614	4624	3592	1757	49	3619	3110
SHP-1	2	68	1028	2682	4692	3660	1825	117	3687	3178
E11-1W01T	2	31	1059	2713	4723	3691	1856	148	3718	3209
E11-1W02T	2	18	1077	2731	4741	3709	1874	166	3736	3227
E11-1W03T	2	18	1095	2749	4759	3727	1892	184	3754	3245
E11-1W04T	2	18	1113	2767	4777	3745	1910	202	3772	3263
E11-1W05T	2	22	1135	2789	4799	3767	1932	224	3794	3285
E11-1W06T	2	22	1157	2811	4821	3789	1954	246	3816	3307
E13-1E02T	2	22	1179	2833	4843	3811	1976	268	3838	3329
FEI-1	2	78	1257	2911	4921	3889	2054	346	3916	3407
E13-1W01T	2	20	1277	2931	4941	3909	2074	366	3936	3427
E13-1W02T	2	7	1284	2938	4948	3916	2081	373	3943	3434
GUA-1	2	53	1337	2991	5001	3969	2134	426	3996	3487
E13-1W04T	2	20	1357	3011	5021	3989	2154	446	4016	3507
E13-1W05T	2	23	1380	3034	5044	4012	2177	469	4039	3530
E13-1W06T	2	22	1402	3056	5066	4034	2199	491	4061	3552
E13-1W07T	2	21	1423	3077	5087	4055	2220	512	4082	3573
E13-1W08T	2	21	1444	3098	5108	4076	2241	533	4103	3594
E17-1E13T	2	21	1465	3119	5129	4097	2262	554	4124	3615
E17-1E12T	2	21	1486	3140	5150	4118	2283	575	4145	3636
E17-1E11T	2	21	1507	3161	5171	4139	2304	596	4166	3657
E17-1E10T	2	17	1524	3178	5188	4156	2321	613	4183	3674

Marcos	Trecho	Locais de Entrada (em segundos)								
E17-1E09T	2	14	1538	3192	5202	4170	2335	627	4197	3688
ARN-1	2	68	1606	3260	5270	4238	2403	695	4265	3756
E17-1E07T	2	13	1619	3273	5283	4251	2416	708	4278	3769
E17-1E06T	2	6	1625	3279	5289	4257	2422	714	4284	3775
E17-1E05T	2	9	1634	3288	5298	4266	2431	723	4293	3784
E17-1E04T	2	11	1645	3299	5309	4277	2442	734	4304	3795
E17-1E03T	2	11	1656	3310	5320	4288	2453	745	4315	3806
E17-1E02T	2	12	1668	3322	5332	4300	2465	757	4327	3818
CLA-1	2	76	1744	3398	5408	4376	2541	833	4403	3894
E17-1W01T	2	18	1762	3416	5426	4394	2559	851	4421	3912
E19-1E05T	2	19	1781	3435	5445	4413	2578	870	4440	3931
CON-1	2	75	1856	3510	5520	4488	2653	945	4515	4006
E19-1E03T	2	24	1880	3534	5544	4512	2677	969	4539	4030
E19-1E02T	2	13	1893	3547	5557	4525	2690	982	4552	4043
EPQ-1	2	11	1904	3558	5568	4536	2701	993	4563	4054
E19-1W01T	2	10	1914	3568	5578	4546	2711	1003	4573	4064
<b>TF-2</b>		<b>95</b>			<b>95</b>					
E19-1W02T	4	24	1938	3592	119	4570	2735	1027	4597	4088
REL-1	4	79	2017	3671	198	4649	2814	1106	4676	4167
E19-1W04T	4	29	2046	3700	227	4678	2843	1135	4705	4196
E19-1W05T	4	23	2069	3723	250	4701	2866	1158	4728	4219
E19-1W06T	4	23	2092	3746	273	4724	2889	1181	4751	4242
E23-1E11T	4	22	2114	3768	295	4746	2911	1203	4773	4264
E23-1E10T	4	19	2133	3787	314	4765	2930	1222	4792	4283
ONO-1	4	15	2148	3802	329	4780	2945	1237	4807	4298
E23-1E08T	4	15	2163	3817	344	4795	2960	1252	4822	4313
E23-1E07T	4	11	2174	3828	355	4806	2971	1263	4833	4324
MET-1	4	82	2256	3910	437	4888	3053	1345	4915	4406
E23-1E05T	4	22	2278	3932	459	4910	3075	1367	4937	4428
E23-1E04T	4	20	2298	3952	479	4930	3095	1387	4957	4448
E23-1E03T	4	23	2321	3975	502	4953	3118	1410	4980	4471
E23-1E02T	4	23	2344	3998	525	4976	3141	1433	5003	4494
CES-1	4	83	2427	4081	608	5059	3224	1516	5086	4577
E23-1W01T	4	21	2448	4102	629	5080	3245	1537	5107	4598
E23-1W02T	4	13	2461	4115	642	5093	3258	1550	5120	4611
GBA-1	4	75	2536	4190	717	5168	3333	1625	5195	4686
E23-1W04T	4	20	2556	4210	737	5188	3353	1645	5215	4706
E23-1W05T	4	19	2575	4229	756	5207	3372	1664	5234	4725
CEC-1	4	84	2659	4313	840	5291	3456	1748	5318	4809
E27-1E06T	4	24	2683	4337	864	5315	3480	1772	5342	4833
CEN-1	4	82	2765	4419	946	5397	3562	1854	5424	4915
E27-1E04T	4	31	2796	4450	977	5428	3593	1885	5455	4946
E27-1E03T	4	7	2803	4457	984	5435	3600	1892	5462	4953
E27-2E03T	4	8	2811	4465	992	5443	3608	1900	5470	4961
E27-2E02T	4	13	2824	4478	1005	5456	3621	1913	5483	4974
<b>ECE</b>		<b>0</b>							<b>0</b>	
CEI-2	1	58	2882	4536	1063	5514	3679	1971	58	5032
E27-2E02T	1	17	2899	4553	1080	5531	3696	1988	75	5049
E27-2E03T	1	10	2909	4563	1090	5541	3706	1998	85	5059
E27-2E04T	1	20	2929	4583	1110	5561	3726	2018	105	5079
CEN-2	1	77	3006	4660	1187	5638	3803	2095	182	5156
E27-2E06T	1	31	3037	4691	1218	5669	3834	2126	213	5187
CEC-2	1	80	3117	4771	1298	5749	3914	2206	293	5267
E23-2W06T	1	22	3139	4793	1320	5771	3936	2228	315	5289
E23-2W05T	1	15	3154	4808	1335	5786	3951	2243	330	5304
GBA-2	1	70	3224	4878	1405	5856	4021	2313	400	5374
E23-2W03T	1	20	3244	4898	1425	5876	4041	2333	420	5394
E23-2W02T	1	15	3259	4913	1440	5891	4056	2348	435	5409
E23-2W01T	1	7	3266	4920	1447	5898	4063	2355	442	5416
CES-2	1	85	3351	5005	1532	5983	4148	2440	527	5501
E23-2E02T	1	23	3374	5028	1555	6006	4171	2463	550	5524
E23-2E03T	1	23	3397	5051	1578	6029	4194	2486	573	5547
E23-2E04T	1	22	3419	5073	1600	6051	4216	2508	595	5569
E23-2E05T	1	19	3438	5092	1619	6070	4235	2527	614	5588
MET-2	1	80	3518	5172	1699	6150	4315	2607	694	5668
E23-2E07T	1	15	3533	5187	1714	6165	4330	2622	709	5683

Marcos	Trecho	Locais de Entrada (em segundos)								
E23-2E08T	1	15	3548	5202	1729	6180	4345	2637	724	5698
ONO-2	1	15	3563	5217	1744	6195	4360	2652	739	5713
E23-2E10T	1	19	3582	5236	1763	6214	4379	2671	758	5732
E23-2E11T	1	23	3605	5259	1786	6237	4402	2694	781	5755
E19-2W06T	1	23	3628	5282	1809	6260	4425	2717	804	5778
E19-2W05T	1	20	3648	5302	1829	6280	4445	2737	824	5798
E19-2W04T	1	20	3668	5322	1849	6300	4465	2757	844	5818
REL-2	1	85	3753	5407	1934	6385	4550	2842	929	5903
E19-2W02T	1	25	3778	5432	1959	6410	4575	2867	954	5928
E19-2W01T	1	10	3788	5442	1969	6420	4585	2877	964	5938
EPQ-2	1	10	3798	5452	1979	6430	4595	2887	974	5948
E19-2E02T	1	12	3810	5464	1991	6442	4607	2899	986	5960
E19-2E03T	1	17	3827	5481	2008	6459	4624	2916	1003	5977
CON-2	1	79	3906	5560	2087	6538	4703	2995	1082	6056
E19-2E05T	1	20	3926	5580	2107	6558	4723	3015	1102	6076
E17-2W01T	1	30	3956	5610	2137	6588	4753	3045	1132	6106
CLA-2	5	71	4027	198	2208	1176	4824	3116	1203	694
E17-2E02T	5	18	4045	216	2226	1194	4842	3134	1221	712
E17-2E03T	5	12	4057	228	2238	1206	4854	3146	1233	724
E17-2E04T	5	10	4067	238	2248	1216	4864	3156	1243	734
E17-2E05T	5	9	4076	247	2257	1225	4873	3165	1252	743
E17-2E06T	5	6	4082	253	2263	1231	4879	3171	1258	749
E17-2E07T	5	5	4087	258	2268	1236	4884	3176	1263	754
ARN-2	5	70	4157	328	2338	1306	4954	3246	1333	824
E17-2E09T	5	20	4177	348	2358	1326	4974	3266	1353	844
E17-2E10T	5	17	4194	365	2375	1343	4991	3283	1370	861
E17-2E11T	5	21	4215	386	2396	1364	5012	3304	1391	882
E17-2E12T	5	21	4236	407	2417	1385	5033	3325	1412	903
E17-2E13T	5	21	4257	428	2438	1406	5054	3346	1433	924
E13-2W08T	5	21	4278	449	2459	1427	5075	3367	1454	945
E13-2W07T	5	21	4299	470	2480	1448	5096	3388	1475	966
E13-2W06T	5	23	4322	493	2503	1471	5119	3411	1498	989
E13-2W05T	5	20	4342	513	2523	1491	5139	3431	1518	1009
E13-2W04T	5	8	4350	521	2531	1499	5147	3439	1526	1017
GUA-2	5	44	4394	565	2575	1543	5191	3483	1570	1061
E13-2W02T	5	14	4408	579	2589	1557	5205	3497	1584	1075
E13-2W01T	5	21	4429	600	2610	1578	5226	3518	1605	1096
FEL-2	5	57	4486	657	2667	1635	5283	3575	1662	1153
E13-2E02T	5	30	4516	687	2697	1665	5313	3605	1692	1183
E11-2W06T	5	22	4538	709	2719	1687	5335	3627	1714	1205
E11-2W05T	5	22	4560	731	2741	1709	5357	3649	1736	1227
E11-2W04T	5	18	4578	749	2759	1727	5375	3667	1754	1245
E11-2W03T	5	18	4596	767	2777	1745	5393	3685	1772	1263
E11-2W02T	5	18	4614	785	2795	1763	5411	3703	1790	1281
E11-2W01T	5	22	4636	807	2817	1785	5433	3725	1812	1303
SHP-2	5	60	4696	867	2877	1845	5493	3785	1872	1363
E11-2E02T	5	18	4714	885	2895	1863	5511	3803	1890	1381
E11-2E03T	5	17	4731	902	2912	1880	5528	3820	1907	1398
E11-2E04T	5	18	4749	920	2930	1898	5546	3838	1925	1416
<b>TF-4</b>		<b>63</b>					<b>63</b>			
E11-2E05T	6	24	4773	944	2954	1922	87	3862	1949	1440
ASA-2	6	69	4842	1013	3023	1991	156	3931	2018	1509
E11-2E07T	6	27	4869	1040	3050	2018	183	3958	2045	1536
E11-2E08T	6	24	4893	1064	3074	2042	207	3982	2069	1560
114-2	6	63	4956	1127	3137	2105	270	4045	2132	1623
E07-2W04T	6	30	4986	1157	3167	2135	300	4075	2162	1653
112-2	6	53	5039	1210	3220	2188	353	4128	2215	1706
E07-2W02T	6	25	5064	1235	3245	2213	378	4153	2240	1731
E07-2W01T	6	15	5079	1250	3260	2228	393	4168	2255	1746
110-2	6	21	5100	1271	3281	2249	414	4189	2276	1767
108-2	6	62	5162	1333	3343	2311	476	4251	2338	1829
E02-2W06T	6	29	5191	1362	3372	2340	505	4280	2367	1858
106-2	6	21	5212	1383	3393	2361	526	4301	2388	1879
E02-2W04T	6	21	5233	1404	3414	2382	547	4322	2409	1900
104-2	6	21	5254	1425	3435	2403	568	4343	2430	1921
102-2	6	61	5315	1486	3496	2464	629	4404	2491	1982

Marcos	Trecho	Locais de Entrada (em segundos)								
E02-2W01T	6	27	5342	1513	3523	2491	656	4431	2518	2009
GAL-2	6	56	5398	1569	3579	2547	712	4487	2574	2065
E02-2E02T	6	22	5420	1591	3601	2569	734	4509	2596	2087
E02-2E03T	6	11	5431	1602	3612	2580	745	4520	2607	2098
E02-2E04T	6	6	5437	1608	3618	2586	751	4526	2613	2104
CTL-2	6	42	5479	1650	3660	2628	793	4568	2655	2146
E02-2E06T	6	5	5484	1655	3665	2633	798	4573	2660	2151
E02-2E07T	6	12	5496	1667	3677	2645	810	4585	2672	2163
E02-2E08T	6	32	5528	1699	3709	2677	842	4617	2704	2195
CLA-3	2	51	1719	3373	5383	4351	2516	808	4378	3869
E17-3W01T	2	43	1762	3416	5426	4394	2559	851	4421	3912
E17-3W02T	2	35	1797	3451	5461	4429	2594	886	4456	3947
E17-3W03T	2	18	1815	3469	5479	4447	2612	904	4474	3965
E17-3W04T	2	7	1822	3476	5486	4454	2619	911	4481	3972
<b>TF-3</b>		<b>0</b>				<b>0</b>				
E17-3W05T	8	12	1834	3488	5498	12	2631	923	4493	3984
TAS-3	8	78	1912	3566	5576	90	2709	1001	4571	4062
E17-3W07T	8	20	1932	3586	5596	110	2729	1021	4591	4082
E17-3W08T	8	22	1954	3608	5618	132	2751	1043	4613	4104
E17-3W09T	8	19	1973	3627	5637	151	2770	1062	4632	4123
E33-3E11T	8	21	1994	3648	5658	172	2791	1083	4653	4144
E33-3E10T	8	24	2018	3672	5682	196	2815	1107	4677	4168
FUR-3	8	80	2098	3752	5762	276	2895	1187	4757	4248
E33-3E08T	8	23	2121	3775	5785	299	2918	1210	4780	4271
E33-3E07T	8	25	2146	3800	5810	324	2943	1235	4805	4296
SAS-3	8	85	2231	3885	5895	409	3028	1320	4890	4381
E33-3E05T	8	23	2254	3908	5918	432	3051	1343	4913	4404
E33-3E04T	8	21	2275	3929	5939	453	3072	1364	4934	4425
E33-3E03T	8	7	2282	3936	5946	460	3079	1371	4941	4432
E33-4E03T	8	9	2291	3945	5955	469	3088	1380	4950	4441
E33-4E02T	8	13	2304	3958	5968	482	3101	1393	4963	4454
<b>ESM</b>		<b>0</b>								<b>0</b>
SAM-4	7	58	2362	4016	6026	540	3159	1451	5021	58
E33-4E02T	7	17	2379	4033	6043	557	3176	1468	5038	75
E33-4E03T	7	12	2391	4045	6055	569	3188	1480	5050	87
E33-4E04T	7	14	2405	4059	6069	583	3202	1494	5064	101
E33-4E05T	7	18	2423	4077	6087	601	3220	1512	5082	119
SAS-4	7	78	2501	4155	6165	679	3298	1590	5160	197
E33-4E07T	7	34	2535	4189	6199	713	3332	1624	5194	231
E33-4E08T	7	22	2557	4211	6221	735	3354	1646	5216	253
FUR-4	7	74	2631	4285	6295	809	3428	1720	5290	327
E33-4E10T	7	33	2664	4318	6328	842	3461	1753	5323	360
E33-4E11T	7	21	2685	4339	6349	863	3482	1774	5344	381
E17-4W09T	7	19	2704	4358	6368	882	3501	1793	5363	400
E17-4W08T	7	22	2726	4380	6390	904	3523	1815	5385	422
E17-4W07T	7	19	2745	4399	6409	923	3542	1834	5404	441
TAS-4	7	74	2819	4473	6483	997	3616	1908	5478	515
E17-4W05T	7	26	2845	4499	6509	1023	3642	1934	5504	541
E17-4W04T	7	18	2863	4517	6527	1041	3660	1952	5522	559
<b>TF-1</b>		<b>63</b>		<b>63</b>						
E17-4W03T	5	18	2881	81	6545	1059	3678	1970	5540	577
E17-4W02T	5	17	2898	98	6562	1076	3695	1987	5557	594
E17-4W01T	5	29	2927	127	6591	1105	3724	2016	5586	623
CLA-4	5	71	2998	198	6662	1176	3795	2087	5657	694