

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FABIANO CÉZAR GOMES NASCIMENTO

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA
DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS EM PÁTIOS
FERROVIÁRIOS PARA ATENDIMENTO À DEMANDA DE
FORMAÇÃO DE TRENS**

VITÓRIA
2015

FABIANO CÉZAR GOMES NASCIMENTO

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA
DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS EM PÁTIOS
FERROVIÁRIOS PARA ATENDIMENTO À DEMANDA DE
FORMAÇÃO DE TRENS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Nascimento, Fabiano Cézar Gomes, 1979-
N244m Modelo matemático para planejamento da distribuição de
locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda
de formação de trens / Fabiano Cézar Gomes Nascimento. –
2015.
103 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Locomotivas – Planejamento. 2. Terminais ferroviários. 3.
Transporte ferroviário 4. Modelos matemáticos. 5. Programação
inteira. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

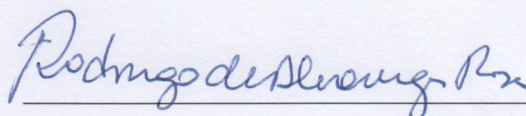
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS EM PÁTIOS FERROVIÁRIOS PARA ATENDIMENTO À DEMANDA DE FORMAÇÃO DE TRENS

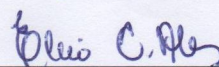
Fabiano Cézar Gomes Nascimento

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

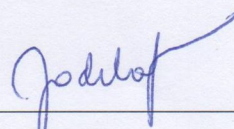
Aprovada no dia **26 de agosto de 2015** por:



Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientador - UFES



Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais
Membro Interno - UFES



Prof. Dr. Jodelson Aguilar Sabino
Doutor em Engenharia de Produção
Membro Externo - VALE S/A

Vitória – ES, agosto de 2015

Dedico este trabalho a minha mãe Janis, a minha esposa Giulliany, aos meus filhos Esther e Paulo Henrique e a minha irmã Bruna.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me oportunizar a subir mais um degrau nessa escada infinita que é a do conhecimento e sempre se fazer presente em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, por ser essa pessoa sempre disposta a ajudar e um visionário no que tange a pesquisa e desenvolvimento. Pelas inúmeras reuniões de orientação, sendo paciente e com a sua costumeira franqueza no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pelos ensinamentos que levarei comigo, pela parceria que dura desde a graduação, o incentivo nesta reta final e a amizade que espero que dure para sempre.

À minha mãe Janis, pelo exemplo de pessoa vitoriosa que conquistou seus objetivos, por conseguir cumprir seu papel de mãe me colocando em caminhos adequados e ser referência e inspiração nos meus objetivos de vida.

À minha esposa Giulliany, a quem coube a difícil tarefa de suportar a minha ausência e cuidar dos nossos filhos com todo amor e carinho.

Aos meus filhos, Esther e Paulo Henrique, que sempre nos momentos difíceis eram quem me davam força para não desistir dos meus objetivos.

Aos meus colegas de trabalho da VALE e ArcelorMittal, pelo incentivo na busca do conhecimento, em especial ao Eric Cabral, Henrique Andrade, Rodrigo Pirola, Eugênio Teixeira, Elbio Lopes, Alencar Scarpe e Joeli Cuzzuol.

Aos colegas e professores do PPGE/UFES, em especial ao meu colega de turma Hugo Vervloet pelas horas de estudo e companheirismo nesta reta final do mestrado.

Ao colega de trabalho Alanderson Dalmaso por me ajudar a desenvolver macros em Excel que permitiram agilizar a criação de cenários.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e participação da banca, pelo tempo dedicado à leitura, comentários e sugestões.

Aos meus amigos e demais familiares pelo apoio fundamental e incentivo constante.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

O transporte ferroviário tem elevados custos operacionais e um dos principais desafios é a redução destes custos para que o referido transporte possa ser competitivo. Em uma ferrovia existe um vasto campo de atuação com oportunidades para implementar melhorias que otimizem a utilização de ativos ferroviários, e uma das principais dificuldades encontra-se no planejamento da distribuição de locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda para formação de trens. O maior problema do planejamento da distribuição de locomotivas é que nem sempre em um certo tempo a oferta de locomotivas ocorre no mesmo local onde há demanda por ela. Assim, faz-se necessário deslocar locomotivas de um pátio a outro a fim de atender às demandas. As locomotivas podem ser deslocadas de um pátio a outro de duas formas, a primeira é quando ela viaja desligada acoplada a outra locomotiva que a reboca, *Deadheading*, e a segunda quando a locomotiva viaja sozinha, podendo somente se acoplar a outras locomotivas, *Light Traveling*. Esta dissertação tem por objetivo propor um modelo matemático de Programação Inteira para planejamento da distribuição de locomotivas, *Locomotive Assignment Problem*, que minimize os custos da distribuição de locomotivas. A função objetivo do modelo visa atender toda a demanda por locomotiva, minimizando a soma dos custos de distribuição, *Deadheading* e *Light Traveling*. Além disso, o modelo prioriza a distribuição de locomotivas de maior capacidade para atendimento à demanda. Também é proposta a introdução de locomotivas virtuais para atender às demandas que não tenham sido atendidas. Essas locomotivas caso venham a ser usadas na solução encontrada indicam que a demanda naquele pátio e tempo não será atendida, cabendo ao profissional da ferrovia tomar ações a fim de entregar locomotivas naquele pátio e tempo ou assumir que a demanda não será atendida. Testes em instâncias baseadas em dados reais da Estrada de Ferro Vitória à Minas (EFVM) foram resolvidas de forma ótima utilizando o *solver* CPLEX 12.6 e mostrou-se bastante aderente na utilização operacional para apoio e tomada de decisão no que tange ao planejamento e distribuição de locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens.

Palavras-chave: Planejamento da Distribuição de Locomotivas. *Locomotive Assignment Problem*. Transporte Ferroviário. Rede espaço-tempo.

ABSTRACT

Rail transport has high operating costs and a major challenge is to reduce these costs so that such transport can be competitive. In a railroad there is a vast playing field with opportunities to implement improvements that optimize the use of railroad assets, and one of the main difficulties lies in the locomotives distribution planning in rail yards to meet the demand for trains formation. The major problem of locomotives distribution planning is the situation where there is a demand for locomotive in a certain rail yard in a certain time, but there is not enough locomotives to meet the demand and then it is necessary to move locomotives from one rail yard that has locomotives without demand to this rail yard that has demand. The locomotives can be moved from one rail yard to another in two ways, the first is when it travels coupled to another locomotive that tows, Deadheading, and the second when the locomotive travels alone and can only attach itself to other locomotives, Light Traveling. This paper aims to propose an Integer Programming mathematical model for the Locomotive Assignment Problem, which minimizes the costs of distributing locomotives. The model objective function aims to meet all the locomotive demand, minimizing the distribution costs sum, Deadheading and Light Traveling. In addition, the model prioritizes the distribution of larger capacity locomotives to meet the demand. It is also proposed the introduction of virtual locomotives to meet the demands that have not been met. These locomotives are used to indicate that the demand in that rail yard at certain time will be missed, so that the railroad professionals may take actions in order to deliver locomotives that rail yard and time or assume that demand will not be met. Tests in instances based on real data of the railroad Vitória to Minas (EFVM) were solved optimally using the solver CPLEX 12.6 and proved to be very adherent in operational use for support and decision making with regard to planning and distribution locomotives in rail yards to supply the trains training demand.

Keywords: Locomotives Distribution Planning. Locomotive Assignment Problem. Railroad Transport. Space-time Network.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA NO BRASIL	17
FIGURA 2 - EXEMPLO DE REDE ESPAÇO-TEMPO	25
FIGURA 3 - MAPA DA ESTRADA DE FERRO VITÓRIA-MINAS.....	33
FIGURA 4 - ETAPAS DA METODOLOGIA DA PESQUISA.....	39
FIGURA 5 - REDE ESPAÇO-TEMPO DAS INSTÂNCIAS	43
FIGURA 6 – REDE ESPAÇO-TEMPO	49
FIGURA 7 - VETOR ESPAÇO-TEMPO	51
FIGURA 8 - EXEMPLO DE PARÂMETROS NO VETOR ESPAÇO-TEMPO	54
FIGURA 9 - EXEMPLO DO RESULTADO NO VETOR ESPAÇO-TEMPO	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARGA TRANSPORTADA (MILHÕES DE TONELADA X KM ÚTIL – TKU)	16
TABELA 2 - FROTA TOTAL DE LOCOMOTIVAS EM OPERAÇÃO	18
TABELA 3 - FROTA TOTAL DE VAGÕES EM OPERAÇÃO	18
TABELA 4 – TIPOS DE LOCOMOTIVAS DA EFVM.....	34
TABELA 5 – CAPACIDADE DE TRAÇÃO (TON) POR TRECHO DE LOCOMOTIVAS DA EFVM....	35
TABELA 6 - PLANO DE TRENS CARGA GERAL EFVM (MAIO/15)	41
TABELA 7 - PLANO DE TRENS CARGA GERAL EFVM (JUNHO/15)	42
TABELA 8 - INSTÂNCIAS DE TESTE EXECUTADAS NO MODELO	44
TABELA 9 - RESULTADOS APRESENTADOS PELO CPLEX PARA AS INSTÂNCIAS CRIADAS PARA TESTES	61

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS DEADHEADING E LIGHT TRAVELING X CUSTO TOTAL – GRUPO DE ANÁLISE A	62
GRÁFICO 2 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS DEADHEADING E LIGHT TRAVELING X CUSTO TOTAL – GRUPO DE ANÁLISE B	65
GRÁFICO 3 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS DEADHEADING E LIGHT TRAVELING X CUSTO TOTAL – GRUPO DE ANÁLISE C	67
GRÁFICO 4 - QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS DEADHEADING E LIGHT TRAVELING X CUSTO TOTAL – GRUPO DE ANÁLISE D	70
GRÁFICO 5 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS ALOCADAS PARA ATENDER A DEMANDA SEMANAL - GRUPO DE ANÁLISE A	72
GRÁFICO 6 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS ALOCADAS PARA ATENDER A DEMANDA SEMANAL - GRUPO DE ANÁLISE B	75
GRÁFICO 7 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS ALOCADAS PARA ATENDER A DEMANDA SEMANAL - GRUPO DE ANÁLISE C	77
GRÁFICO 8 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS ALOCADAS PARA ATENDER A DEMANDA SEMANAL - GRUPO DE ANÁLISE D	80
GRÁFICO 9 – QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS ALOCADAS PARA ATENDER A DEMANDA SEMANAL – GRUPO DE ANÁLISE E	82
GRÁFICO 10 – QUANTIDADE MÉDIA DE LOCOMOTIVAS ESTACIONADAS EM CADA NÓ - GRUPO DE ANÁLISE A	84
GRÁFICO 11 – QUANTIDADE MÉDIA DE LOCOMOTIVAS ESTACIONADAS EM CADA NÓ - GRUPO DE ANÁLISE B	85
GRÁFICO 12 – QUANTIDADE MÉDIA DE LOCOMOTIVAS ESTACIONADAS EM CADA NÓ - GRUPO DE ANÁLISE C	87
GRÁFICO 13 – QUANTIDADE MÉDIA DE LOCOMOTIVAS ESTACIONADAS EM CADA NÓ - GRUPO DE ANÁLISE D	88
GRÁFICO 14 - QUANTIDADE MÉDIA DE LOCOMOTIVAS ESTACIONADAS EM CADA NÓ - GRUPO DE ANÁLISE E	90
GRÁFICO 15 – QUANTIDADE MÉDIA UTILIZADA DE LOCOMOTIVAS VIRTUAIS ESTACIONADAS EM CADA NÓ	91

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PÁTIOS EFVM.....	36
-----------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

CNT - Confederação Nacional do Transporte

EFVM - Estrada de Ferro Vitória à Minas

FCA - Ferrovia Centro Atlântica

HP - *Horse Power*

LAP - *Locomotive Assignment Problem*

Locos - Locomotivas

LRP - *Locomotive Routing Problem*

LSP - *Locomotive Scheduling Problem*

PLIM - Programação Linear Inteira Mista

Qtd - Quantidade

Ton - Toneladas

TT - *Transit Time*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	JUSTIFICATIVA	21
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS	23
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	31
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	31
3.2	ESTUDO DE CASO	32
3.3	LEVANTAMENTO DOS DADOS	35
3.4	ETAPAS DESENVOLVIDAS	37
3.5	INSTÂNCIAS PROPOSTAS	39
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	49
5	RESULTADOS E ANÁLISES	59
5.1	RESULTADOS OBTIDOS PARA AS INSTÂNCIAS PROPOSTAS	59
5.1.1	Análise dos custos de locomotivas acopladas em trens <i>Deadheading</i> e <i>Light Traveling</i>	62
5.1.2	Análise das locomotivas alocadas para atender a demanda semanal ..	72
5.1.3	Análise da quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó	83

5.1.4	Análise da quantidade média utilizada de locomotivas virtuais estacionadas em cada nó	91
5.2	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	92
6	CONCLUSÕES	95
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A.....	100

1 INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (ANTT, 2015) apresentou dados operacionais do período de janeiro de 2006 até fevereiro de 2015 informando a evolução do desempenho operacional alcançado pelas empresas concessionárias de serviços públicos de transporte ferroviário de cargas. Estes dados mostram a importância do transporte ferroviário de cargas brasileiro, o crescimento do volume transportado nos últimos anos e a importância que este modo de transporte tem na matriz de carga brasileira, mostrando-se mais eficiente para transportes por longas distâncias. A Tabela 1 mostra a evolução do transporte de uma tonelada útil à distância de um quilômetro (TKU) ao longo dos últimos anos, chegando à marca de 307.304 milhões de TKU.

Tabela 1 - Carga Transportada (Milhões de Tonelada x Km Útil – TKU)

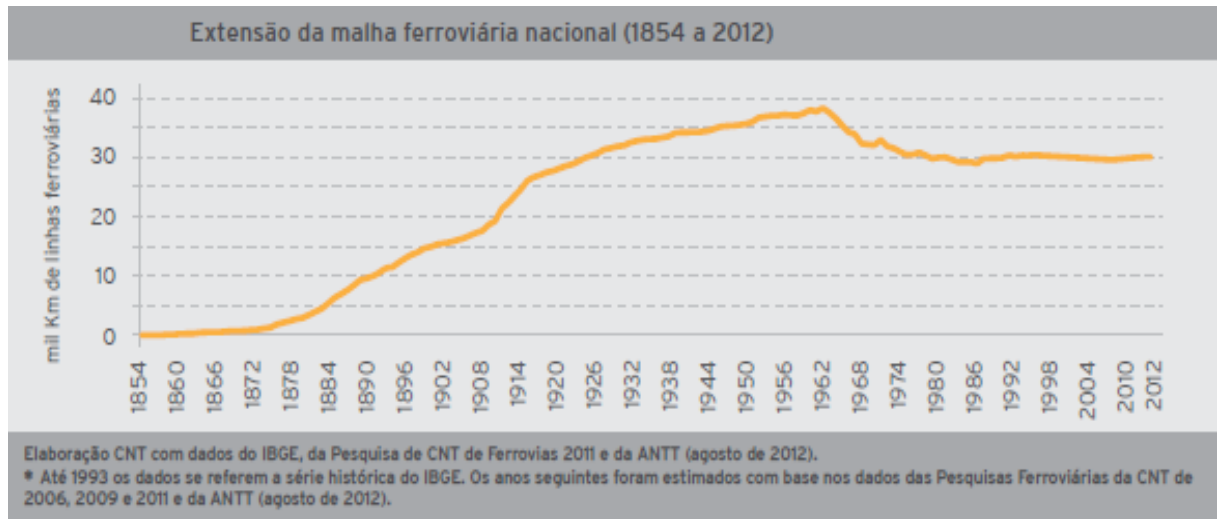
Concessionárias	Ano									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	*2015
ALLMN	7.446	9.394	11.297	13.887	14.618	16.073	19.451	20.594	22.948	2.709
ALLMO	1.432	1.203	1.345	1.312	1.783	1.760	1.704	1.483	1.518	188
ALLMP	2.232	1.909	3.054	3.019	4.004	4.689	4.234	3.907	3.905	553
ALLMS	18.423	17.147	17.378	17.196	17.474	18.121	16.297	15.789	14.692	1.929
EFC	76.724	83.367	87.516	83.948	91.052	99.567	103.399	101.011	104.177	17.239
FERROESTE	1.005	620	747	469	273	209	190	153	262	41
EFVM	73.442	75.511	72.783	57.929	73.480	74.830	74.075	72.009	72.670	11.767
FCA	9.132	14.225	15.060	14.198	15.320	13.948	16.479	18.363	18.299	2.223
FNS	-	-	1.026	1.155	1.524	1.874	2.322	2.457	3.508	321
FTC	183	189	213	202	185	173	190	239	288	42
MRS	47.662	52.590	55.621	51.273	57.490	61.259	62.408	61.482	64.434	9.782
FTL	678	963	920	730	728	681	703	535	604	80
TOTAL	238.361	257.117	266.960	245.319	277.930	293.185	301.451	298.021	307.304	46.876

* Dados apurados até fev/15.

Fonte: ANTT (2015)

De acordo com Confederação Nacional do Transporte (CNT) (CNT, 2013) a malha ferroviária brasileira alcançou em 2012 uma extensão de 30.129 km, retomando o crescimento da malha que já chegou a um patamar superior a 35.000 km na década de 60, Figura 1.

Figura 1 - Evolução da malha ferroviária no Brasil



Fonte: CNT (2013)

Para que o transporte ferroviário aconteça, existem elementos de uma ferrovia como locomotivas que tem como função tracionar os vagões que podem transportar cargas ou passageiros e a figura do maquinista que tem como tarefa guiar o trem que é a junção destes elementos, ou seja, locomotivas, vagões e maquinistas (SABINO, 2008).

Existe uma evolução dos tamanhos das frotas de locomotivas e vagões em operação no período de janeiro de 2006 a fevereiro de 2015, conforme Tabela 2 e Tabela 3 e também o parque de ativos rodantes, quando comparado ao volume transportado, evidencia que o transporte ferroviário no Brasil está cada vez mais eficiente e isso se deve a uma renovação ascendente desses ativos e estudos voltados para otimização operacional (ANTT, 2015).

Tabela 2 - Frota Total de Locomotivas em Operação

Concessionárias	Locomotivas em operação									
	Ano									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	*2015
ALLMN	155	181	239	261	370	409	405	200	186	184
ALLMO	57	57	58	49	81	94	87	63	69	62
ALLMP	91	86	141	155	145	173	176	310	282	272
ALLMS	354	348	437	483	517	483	515	471	440	425
EFC	150	176	197	211	217	211	234	249	254	262
FERROESTE	313	319	321	319	311	328	321	311	315	318
EFVM	-	1	11	14	13	10	10	8	10	10
FCA	503	502	669	596	523	526	539	615	1.233	1.277
FNS	-	-	4	7	10	11	7	8	36	47
FTC	11	11	11	11	11	11	11	11	13	15
MRS	473	522	597	676	684	718	803	789	782	762
FTL	122	129	130	126	134	119	107	109	91	89
TOTAL	2.229	2.332	2.815	2.908	3.016	3.093	3.215	3.144	3.711	3.723

* Dados apurados até fev/15.

Fonte: ANTT (2015)

Tabela 3 - Frota Total de Vagões em Operação

Concessionárias	Vagões em operação									
	Ano									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	*2015
ALLMN	3.504	3.910	4.195	4.372	5.422	7.012	7.266	5.223	5.357	4.562
ALLMO	1.694	1.733	2.465	2.566	3.157	3.246	3.139	1.269	1.314	1.354
ALLMP	2.908	3.301	7.505	7.672	9.173	10.311	10.129	3.207	3.426	4.031
ALLMS	14.373	14.142	14.237	14.450	14.874	15.122	15.915	12.258	12.089	12.057
EFC	8.915	9.724	10.902	11.983	11.841	13.378	13.683	12.796	15.670	16.707
FERROESTE	12.316	20.028	20.077	19.076	18.931	19.527	19.528	18.863	19.285	19.843
EFVM	409	111	119	97	94	64	93	73	1.086	953
FCA	11.082	12.110	10.855	10.667	11.209	11.477	12.355	13.109	15.226	16.216
FNS	-	-	367	495	526	577	644	652	936	1.307
FTC	379	380	380	358	369	369	358	372	400	413
MRS	14.356	14.925	16.641	17.681	17.966	18.950	19.692	19.363	19.482	20.265
FTL	2.212	2.211	2.294	2.237	2.246	1.950	1.807	1.840	1.815	1.738
TOTAL	72.148	82.575	90.037	91.654	95.808	101.983	104.609	89.025	96.086	99.446

* Dados apurados até fev/15.

Fonte: ANTT (2015)

O transporte ferroviário é caracterizado por ter um custo variável alto baseado no volume transportado e distâncias percorridas, tais como: consumo de óleo diesel e material rodante. Um dos grandes desafios do transporte ferroviário é a busca contínua por uma melhor eficiência energética, pois o maior custo variável do transporte ferroviário é o consumo de combustível. Assim, é necessário propor modelos matemáticos para melhor distribuir as locomotivas ao longo da via, a fim de otimizar o uso desse recurso, utilizando modelos que cadencie a utilização de

locomotivas de forma eficaz usufruindo ao máximo da potência disponível e consequentemente reduzindo a emissão das locomotivas em função do transporte (HU *et al.*, 2013).

Devido a um elevado custo de aquisição de locomotivas, manutenções periódicas e preço do óleo diesel, faz-se necessário criar ferramentas de planejamento do uso eficaz na distribuição de ativos de tal forma que seja otimizada a frota (locomotivas e vagões), baseado no *mix* de produtos e origens e destinos das cargas a serem transportadas (VAIDYANATHAN *et al.*, 2008).

As locomotivas ocupam uma posição de destaque pelo seu alto custo de aquisição e manutenção, e por serem responsáveis pela locomoção dos trens. Devido à complexidade inerente ao processo de gestão de ativos decorrente do grande volume de informações envolvidas e curto espaço de tempo para se tomar decisões, se faz necessária a utilização de tecnologias de pesquisa operacional para alcançar o planejamento do transporte dos produtos (BACELAR, 2005).

O controle da circulação de trens em uma ferrovia é de complexidade elevada, pois engloba uma série de informações necessárias para fluidez do tráfego, tais como: número de locomotivas e vagões necessários para atendimento à demanda, origem e destino dos trens, se a via é duplicada ou não, se há restrição de velocidade na via ou nas locomotivas, tempo de parada para troca de equipe e abastecimento, tempo de formação das composições ferroviárias, dentre outros. Um problema comum encontrado é o desbalanceamento entre oferta e demanda de locomotivas, dificultando o atendimento ao volume a ser transportado, ou seja, a ausência ou sobra de locomotivas ao longo da ferrovia (BACELAR, 2005).

O problema do planejamento da distribuição de locomotivas engloba a atribuição de uma frota de locomotivas a uma rede de trens, desde que satisfaçam uma série de restrições de negócios e minimizando os custos totais. Encontrar uma solução eficaz para o problema de programação de locomotiva é de fundamental importância para as grandes companhias ferroviárias mundiais, pois eles têm vários milhares de milhões de dólares investidos em locomotivas (AHUJA *et al.*, 2006).

A circulação de trens tem uma grande simultaneidade de eventos nas vias férreas, onde criar um modelo matemático para otimizar a logística de materiais rodantes

(locomotivas) faz-se necessário, a fim de aumentar a produtividade da via com os recursos existentes, reduzindo o custo com combustível, transportando um maior volume de carga e reduzindo a emissão de poluentes atmosféricos.

Para resolver este problema, esta dissertação propõe um modelo matemático para planejamento da distribuição de locomotivas entre pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens que procura minimizar custo de distribuição de locomotivas para atender a demanda de locomotivas a partir de um plano de trens, otimizando o deslocamento de locomotivas em trens com locomotivas rebocadas (*Deadheading*), que de acordo com Maposa e Swene (2012), viajam desligadas com locomotivas ativas e vagões anexados e as locomotivas escoteiras (*Light Traveling*), ou seja, viajando sem vagões anexados.

Para avaliar o modelo proposto, ele foi aplicado à EFVM (Estrada de Ferro Vitória-Minas) que pertence a empresa VALE S/A, que é uma das mais importantes ferrovias do Brasil no que tange à volume de transporte de carga.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo propor um modelo matemático para planejamento da distribuição de locomotivas entre pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens visando reduzir o custo de transporte com locomotivas escoteiras e rebocadas.

1.1.2 Objetivos específicos

Para o atendimento do objetivo geral descrito no item anterior, os seguintes objetivos específicos deverão ser necessariamente atingidos:

- Levantar dados e informações sobre o processo de planejamento da distribuição de locomotivas;
- Estudar os problemas de Planejamento da Distribuição de Locomotivas (*Locomotive Scheduling Problem* e *Locomotive Routing Problem*);
- Aplicar e analisar o método proposto para resolver o problema de distribuição de locomotivas em um caso real.

1.2 JUSTIFICATIVA

O investimento em ativos ferroviários é muito alto, sobretudo em vagões e locomotivas. Apesar disso, no mundo existem poucas publicações entre as décadas de 1970 e 1990 referentes a estudos de metodologias para otimização destes ativos. Em função da modernização e criação de novas ferrovias, a partir da década de 1990 o Brasil surgiu como figura presente no cenário mundial e o transporte ferroviário iniciou um crescimento plausível de pesquisa e desenvolvimento, mas muito aquém, por exemplo, de países europeus e dos Estados Unidos da América (TAZONIERO, 2007). Dessa forma, essa dissertação vem propor um modelo matemático para apoio à distribuição de locomotivas visando à redução dos custos com compra de locomotivas.

Neste contexto, com intuito de acompanhar o plano de crescimento do país, principalmente da iniciativa privada, e suportar o incremento de infraestrutura viária que se faz presente no país, propor modelos matemáticos que auxiliem na tomada de decisão a fim de otimizar a utilização de recursos ferroviários torna o tema importante para o crescimento do transporte ferroviário no Brasil e no mundo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender os objetivos dessa dissertação, o conteúdo a ser desenvolvido será estruturado em sete capítulos, incluindo este primeiro que é uma introdução ao problema, e os demais distribuídos da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico sobre os principais conceitos relativos ao problema; O Capítulo 3 aborda a metodologia que conduzirá a realização do trabalho; O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto; No Capítulo 5 são apresentados os resultados e as análises dos resultados do modelo matemático; No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros e, por fim, são apresentadas as referências.

2 PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

O problema de planejamento da distribuição de locomotivas é tratado na literatura científica como *Locomotive Assignment Problem* (LAP), desta forma este capítulo irá discorrer sobre o LAP.

O LAP tem por objetivo o planejamento da designação de locomotivas a trens ao longo de um horizonte de planejamento. Baseado nas referências de Piu (2013), Piu e Speranza (2014), Noori e Ghannadpour (2012), Vaidyanathan (2007), pode-se dividir o LAP em estratégico/tático e operacional. Quando o LAP tem a visão estratégica/tática é denominado *Locomotive Scheduling Problem* (LSP) e considera apenas as locomotivas no espaço/tempo, considerando o impacto temporal das decisões, sem definir especificamente cada locomotiva, porém define ao longo do tempo a necessidade de locomotivas por tipo. O *Locomotive Routing Problem* (LRP) é o LAP operacional, logo ele define especificamente a rota de cada locomotiva no espaço/tempo, considerando abastecimentos e restrições de manutenção.

No LAP ocorre a necessidade de deslocamento de locomotivas que estão disponíveis em um pátio para outro pátio que demanda por locomotiva para formação de trens. Para que esta distribuição seja feita podem ocorrer quatro situações: 1) a própria locomotiva que estava em um trem que termina a sua viagem e fica disponível para atender a demanda de locomotivas; 2) uma locomotiva que estava estacionada no pátio está disponível para atender a demanda; 3) uma locomotiva é acoplada a um trem que vai viajar de um pátio a outro e durante a viagem ela fica desligada; 4) uma locomotiva viaja sozinha sem ter acoplado a ela vagões, porém podendo ter outras locomotivas apagadas acopladas a ela.

A primeira e a segunda situação são representadas como oferta de locomotivas em um pátio em um certo momento de tempo sem custo para ferrovia. As locomotivas distribuídas na terceira situação são denominadas locomotivas *Deadheading* e geram um custo pela perda de oportunidade das locomotivas que estão sendo rebocadas sem tracionar vagões de carga que podem gerar receita. Na quarta situação as locomotivas distribuídas são denominadas *Light Traveling*. As locomotivas distribuídas *Light Traveling* como não acoplam vagões a ela, possuem

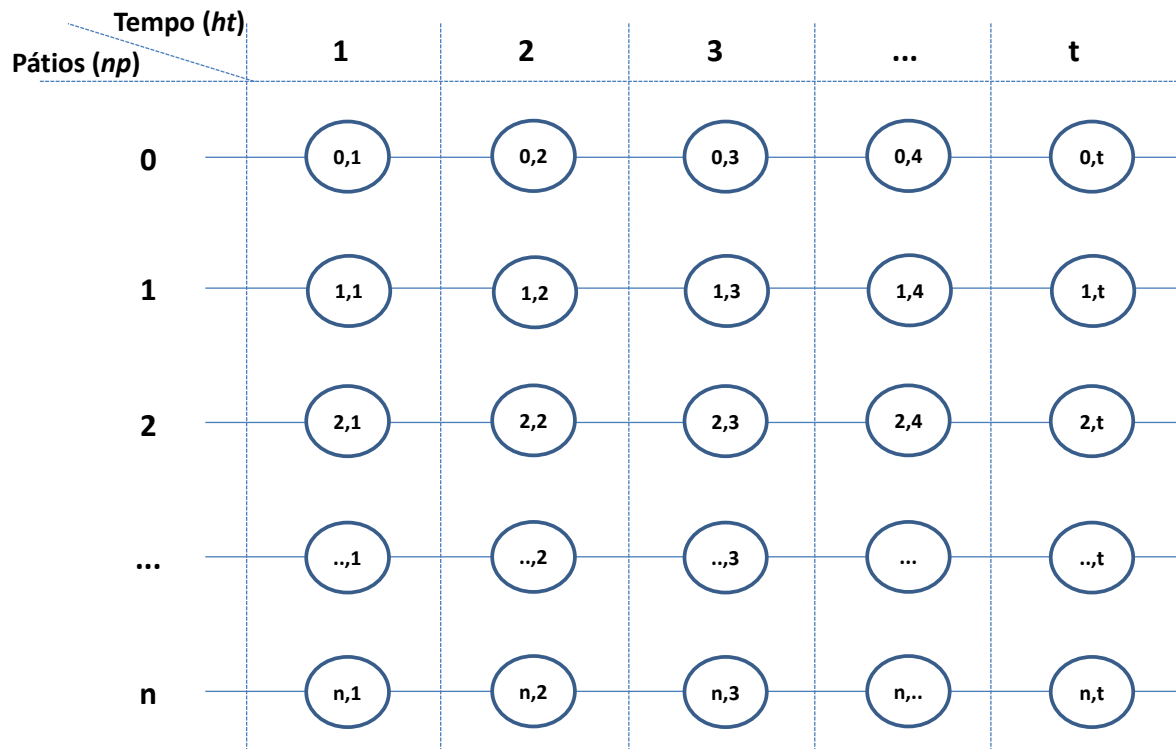
um custo alto para ferrovia, pois além de não tracionarem vagões com carga ainda produzem o custo de diesel e maquinista para conduzir as locomotivas. O ideal para a ferrovia é que a distribuição de locomotivas pudesse ser feita de forma integral pelas situações 1 e 2. Assim, o que se espera no LAP é reduzir o número de locomotivas sendo distribuídas com *Deadheading* e *Light Traveling*, visando reduzir os custos totais da atividade de distribuição de locomotivas para atender as demandas de locomotivas para formação de trens.

Atualmente, para resolver o LSP, foco do estudo da dissertação, utiliza-se a rede espaço-tempo. Desta forma, a seguir apresenta-se uma descrição da rede espaço-tempo.

A rede espaço-tempo é uma rede em que os nós de saída e chegada dos trens representam, em conjunto, os pátios e o tempo, e que os arcos representam o trem e sua capacidade ociosa de tracionar cargas em um determinado período de tempo e em um determinado trecho a ser percorrido.

Utilizando uma rede espaço-tempo têm-se um diagrama com duas coordenadas, conforme Figura 2: a coordenada horizontal é tempo e a coordenada vertical é à distância entre as estações. Assim, um trem está especificado na abscissa é por horário de partida e de chegada, e na ordenada pelas estações de origem e destino. Os arcos representam o trem e sua capacidade ociosa de tração entre os terminais, no período de tempo em questão, de i (nó de saída) para j (nó de chegada). Os nós representam, em conjunto, as estações e o tempo, respectivamente, de saída e chegada dos trens, ou seja, trens que saem de uma estação de origem em certo tempo, para uma estação de destino em outro tempo subsequente. Os fluxos associados a cada arco diagonal são as locomotivas que são atribuídas ao trem correspondente, e com as locomotivas dos arcos horizontais que estão ociosas (estoque) e esperando para serem transferidas para outro trem que se origina na mesma cidade e as locomotivas escoteiras (*Light Traveling*) e rebocadas (*Deadheading*) que são necessárias para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda de locomotivas (FLORIAN *et al.*, 1976).

Figura 2 - Exemplo de rede espaço-tempo



Fonte: Autor (2015)

O LSP envolve primeiro a construção de uma rede espaço-tempo, que resume todos os movimentos que podem ser executados por meio de locomotivas ao longo do espaço percorrido, bem como ao longo do tempo. A rede de espaço-tempo é uma rede de fluxo multiproduto composta de nós e arcos, e é utilizada em muitos problemas de obtenção de recursos. Cada comboio composto por locomotivas e vagões anexados está representado na rede de espaço-tempo como um arco de comboios, e as possíveis opções de transferência que estão disponíveis para ser usados na programação do trem são representados como arcos de transferência (HIDAYAT, 2005).

A rede espaço-tempo propõe um modelo de fluxo em rede multiproduto considerando a distribuição de locomotivas de acordo com o planejamento de demanda, onde o espaço seria a ferrovia e o tempo o período. Nesta rede, o fluxo pode ocorrer entre origem e destinos diferentes por determinado intervalo de tempo ou em mesmo local e mesmo período (TEIXEIRA, 2011).

Após as explicações anteriores, a partir deste ponto apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o LAP.

Holt (1973) apresentou um sistema computacional para resolver o LSP em uma ferrovia inglesa. As programações são sujeitas a edição manual se mais de um tipo de locomotiva está envolvido na formação de um trem, usando um método de mapeamento. Este trabalho descreveu as aplicações na ferrovia inglesa que tem obtido economias substanciais.

Foi desenvolvido por Gohring *et al.* (1973) um modelo para ajudar o planejamento de distribuição de locomotivas. O modelo aceita entrada descrevendo programação de trens e parâmetros relacionados e estas programações são usadas para construir uma rede espaço-tempo. O algoritmo *out-of-kilter* é usado para encontrar um fluxo ótimo através da referida rede espaço-tempo. A rede é construída de maneira que o fluxo ótimo através da mesma resulte em um número mínimo de unidades de potência sendo requerida para operar as programações.

Florian *et al.* (1976) apresentaram um modelo matemático para resolver o LSP. O modelo matemático em questão emprega diversos tipos de locomotivas para fornecer potência suficiente aos seus trens. Cada trem possui um número de locomotivas atreladas a sua potência que é determinada pelo seu tamanho, peso e rota de viagem.

O objetivo do LSP é encontrar um conjunto de locomotivas que abranjam todos os trens a um custo mínimo. Cada trem tem um determinado tempo de viagem e pode ter um horário fixo de partida, ou pode ter uma gama de possíveis horários de partida, onde os limites da faixa são estabelecidos pelas restrições comerciais do tráfego transportado. Booler (1980) apresentou um método heurístico, baseado em um modelo de programação linear para resolver este o LSP.

Forbes *et al.* (1991) apresentaram soluções exatas para os LSP de locomotivas representados pelos conjuntos de dados utilizados por Wright (1989).

Ziarati *et al.* (1997) estudaram que o fornecimento de tração tem que ser suficiente para puxar trens em horários fixos. Uma lista de locomotivas preferenciais existe para cada tipo de trem. A força necessária para puxar um trem específico é

determinada de acordo com o peso do trem e o comprimento, assim como o segmento de rota em que deve viajar. Finalmente, as locomotivas que necessitem de inspeção devem ser enviadas para as oficinas apropriadas dentro de um prazo determinado.

Cordeau *et al.* (1998) desenvolveram um trabalho, cujo objetivo é apresentar uma visão geral de modelos de otimização para os problemas mais comuns de transporte em ferrovia. A revisão se concentra principalmente em LRP e LSP, por representarem a parcela mais importante das atividades de planejamento realizadas pelas ferrovias. De acordo com uma programação de trens, o problema de distribuição de locomotivas consiste em atribuir um conjunto de locomotivas para os trens programados, satisfazendo premissas como o número de locomotivas necessárias e a potência necessária para tracionar o trem.

Para Ziarati *et al.* (1999) o LSP consiste em fornecer tração suficiente para cada trecho em um período pré-determinado. Um trecho é a parte de um percurso de um trem entre dois pontos consecutivos de mudança de tração. Versões simplificadas do problema de atribuição de locomotiva envolvendo o mesmo tipo de locomotiva podem ser resolvidas como um problema de fluxo de custo mínimo.

O LAP pode necessitar de uma abordagem utilizando um Algoritmo Genético e uma Rede Neural para encontrar uma solução cíclica em um horizonte de uma semana, desde que satisfaçam as exigências de potência de todos os trens, utilizando um modelo matemático de programação inteira (ZIARATI *et al.*, 2005).

Em Bacelar (2005), foi proposta uma formulação em programação inteira, com fluxo em uma rede espaço-tempo multi-produto. O modelo foi implementado no *solver* CPLEX, e os testes foram realizados em instâncias reais obtidas de uma das maiores ferrovias brasileiras. Os testes foram realizados para os trens de carga. Os resultados são comparados com programações realizadas pela ferrovia. O modelo proposto gerou uma diminuição do número de locomotivas utilizadas no planejamento, o que representa uma economia de dezenas de milhões de dólares.

Em Ahuja *et al.* (2005) foi feita uma proposta de formulação em PLIM, com fluxo em uma rede espaço-tempo multi-produto. Para a sua resolução foram utilizadas:

técnicas de decomposição de problemas e a heurística *Very Large-Scale Neighborhood Search* (VLSN). A heurística implementada foi testada utilizando instâncias reais, em trens de carga, de uma das maiores ferrovias dos EUA. As soluções encontradas foram comparadas com aquelas obtidas pelo *software* utilizado na ferrovia, pela divisão de planejamento de locomotivas. Os resultados da solução desenvolvida em Ahuja *et al.* (2005), demonstraram um uso de um número de locomotivas muito inferior ao que é praticado na ferrovia, o que poderia gerar uma economia superior a cem milhões de dólares anualmente.

Em Bacelar e Garcia (2006), comparou-se a associação de locomotivas a trens realizados pela área operacional da EFVM (Estrada de Ferro Vitória-Minas) e a associação encontrada pelo modelo matemático proposto em Bacelar (2005). Uma análise financeira dos resultados foi apresentada, demonstrando o melhor desempenho da associação realizada pelo modelo matemático e ressaltando a importância da pesquisa operacional em cenários que envolvem grande volume de informações e múltiplas variáveis de decisão.

Conforme Ahuja *et al.* (2006), foi desenvolvido por meio de PLIM, uma formulação do LAP. Esta formulação, que se denomina modelo de fluxo de locomotiva, conta com a formulação do problema como um problema de fluxo de multi-produto em uma rede espaço-tempo em que cada tipo consiste em representar uma mercadoria e a atribuição de trens é transformada no fluxo de uma rede ferroviária do espaço-tempo semanalmente.

Rouillon *et al.* (2006) consideraram que o LAP encontrado durante o planejamento das operações de uma ferrovia de carga, consiste em fornecer tração suficiente para puxar um conjunto de trens programados a um custo mínimo, satisfazendo a disponibilidade de locomotivas e de manutenção. Também é proposto avaliar diferentes métodos de ramificação que impõem múltiplas decisões sobre rotas de locomotivas em cada nó de ramificação, incluindo uma decisão que proíbe tal rota.

Segundo Pinto (2007) e Kocjan (2001), o problema de fluxo de locomotivas é de nível operacional e consiste em determinar o melhor plano de viagens de cada locomotiva da frota visando suprir a necessidade de tração em cada trecho da malha do horizonte de planejamento determinando o número de locomotivas que formará

cada trem, bem como as locomotivas que serão rebocadas por trens de modo a minimizar custo. O problema pode ser resolvido por meio de algoritmos exatos e heurísticas e técnicas de pré-processamento.

Dada uma programação de circulação de trens, a área responsável pelo planejamento de locomotivas atribui tipos e quantidades de locomotivas a trens com custo mínimo que satisfaçam uma série de restrições operacionais do negócio. Uma vez que isto é realizado, a ferrovia tem que determinar a sequência de trens a qual cada locomotiva é atribuída pelo número de rotas para circular em na ferrovia, de modo que ela pode ser abastecida e reparada quando necessário. Este problema é referenciado como LRP e foi apresentado um modelo matemático baseado em programação inteira por meio de uma rede espaço-tempo (VAIDYANATHAN *et al.*, 2008).

Nourbakhsh e Ouyang (2010) apresentaram um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que integra não só decisões de localizações das estações de combustível, mas também decisões de programação de locomotivas. Um quadro de Relaxação Lagrangiana foi proposto para decompor o problema dentro da programação de combustíveis e facilitar a localização dos sub-problemas selecionados. Uma rede de formulação do caminho mais curto do sub-problema de programação do combustível é desenvolvido para se obter uma solução exata e otimizada.

Piu (2011) apresentou o LAP, onde atribui uma frota de locomotivas para otimizar uma rede de trens com um ou mais objetivos fundamentais, tais como: custos, lucro, tamanho da frota, nível de serviço etc. A partir de um agendamento de trem e com foco no planejamento da versão do problema de Ahuja *et al.* (2005), foi proposto modelar o problema de atribuição de locomotiva com Programação Inteira Mista e resolvê-la como um problema de fluxo em uma rede espaço-tempo.

Maposa *et al.* (2012) apresentaram um LSP enfrentado pela Estrada de Ferro Nacional do Zimbábwe, na qual centrou-se na versão do modelo agendamento de locomotivas, onde existem vários tipos de locomotivas e existem tomadas de decisão a respeito de qual o conjunto de locomotivas está a ser atribuído a cada trem. Foi utilizada a programação inteira mista na formulação do problema. Quando

a solução foi comparada com o cenário que existia, verificou-se uma redução de 38 locomotivas, o que se traduz em uma economia de mais de dez milhões de dólares anualmente.

No planejamento de locomotivas é necessário gerenciar simultaneamente os estoques de locomotivas, equilibrando a necessidade de balanceamento entre oferta e demanda de locomotivas. Uma complicação adicional surge como resultado do alto nível de incerteza em tempos de trânsito e os atrasos de circulação de trens, podendo ter que planejar estoques adicionais. Foi apresentada uma nova modelagem matemática e estratégia algorítmica conhecida como dinâmica aproximada, que utiliza para aprender a planejar movimentos da locomotiva de uma forma que imita os seres humanos no planejar do mundo real, trabalhando em níveis operacionais (POWELL *et al.*, 2012).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O capítulo em questão apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta dissertação.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Vergara (2013) a pesquisa pode ser classificada quanto aos meios e quanto aos fins. Quanto aos meios, ela pode ser bibliográfica, documental e de campo. Quanto aos fins, ela é considerada como aplicada e metodológica.

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa é classificada conforme a seguir:

- ✓ Bibliográfica: A pesquisa tem como base estudos prévios desenvolvidos e publicados em artigos, revistas, dissertações, teses, relatórios e legislação específica para o desenvolvimento do referencial teórico e definição do método para a resolução do problema.
- ✓ Documental: Para desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados dados reais fornecidos pela empresa VALE S.A.
- ✓ De campo: Para desenvolvimento da pesquisa foram realizadas entrevistas com os responsáveis pela distribuição de recursos ferroviários na empresa VALE S.A.

Quanto aos fins, as evidências das classificações são apresentadas a seguir:

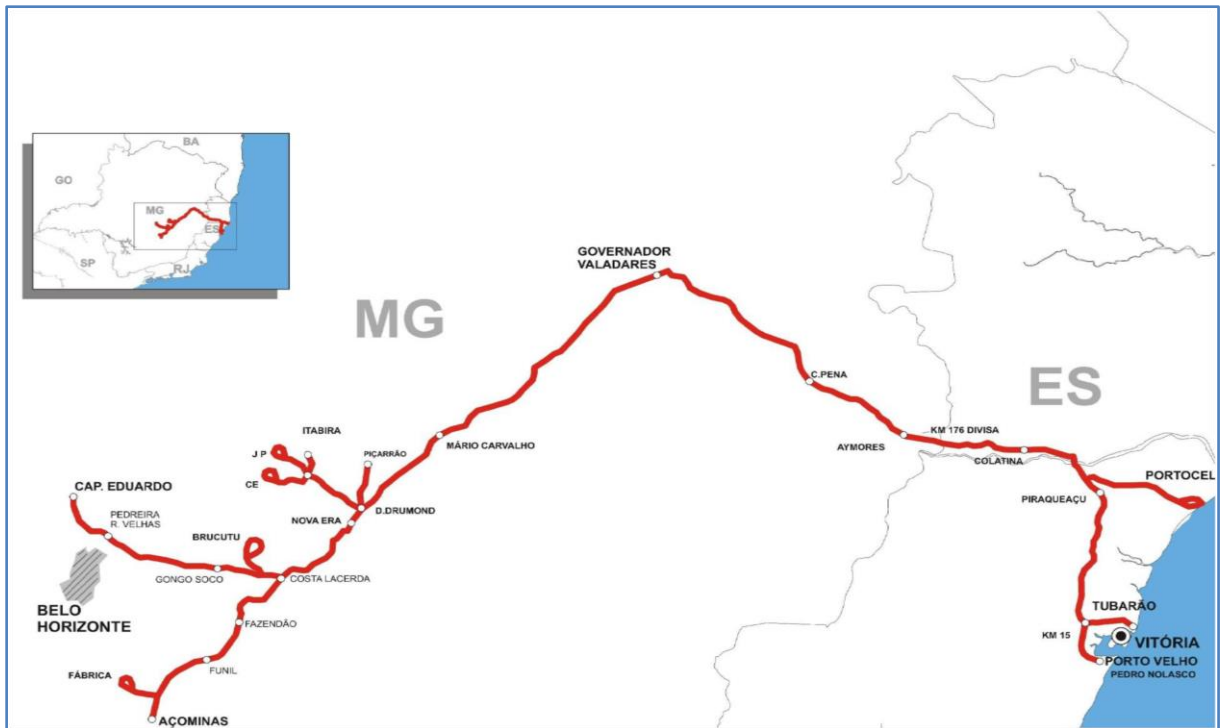
- ✓ Aplicada: A pesquisa visa propor um modelo matemático para planejamento da distribuição de locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens com aplicação prática, procurando resolver um problema existente na distribuição de recursos ferroviários que é o desbalanceamento entre oferta e demanda de locomotivas.

- ✓ Metodológica: A pesquisa visa objetivar a proposição de um modelo matemático para planejamento da distribuição de locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens.

3.2 ESTUDO DE CASO

O problema em estudo será aplicado na Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM). De acordo com a ANTT (2013) a EFVM tem 905 km de extensão, bitola métrica, ou seja, distância entre trilhos de 1,00 metro, interconexão com outras ferrovias em Ouro Branco - MG (MRS Logística S.A.), Pedro Nolasco - ES (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.), Engº Lafaiete Bandeira - MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.), Capitão Eduardo – MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.) e Pedreira do Rio das Velhas – MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.), e interconexão com o porto de Tubarão – ES. A área de atuação da EFVM está nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais de acordo com a Figura 3, no qual transporta cerca de 1 milhão de pessoas por ano ao longo de 30 estações de Vitória-ES a Belo Horizonte-MG e atualmente transporta em torno de 140 milhões de toneladas úteis de minério de ferro e carga geral para terceiros, tais como: combustíveis, carvão, coque, siderúrgicos, fertilizantes, celulose e outros mais.

Figura 3 - Mapa da Estrada de Ferro Vitória-Minas



Fonte: ANTT (2013)

O centro de controle de tráfego da EFVM é localizado na cidade de Vitória no estado do Espírito Santo e controla o tráfego de trens que passa por 34 municípios entre Espírito Santo e Minas Gerais e com uma densidade de transporte de aproximadamente 01 trem a cada 20 minutos. Conforme a ANTT (2015), a EFVM possui uma frota de 318 locomotivas e 19.843 vagões para possibilitar a realização do transporte de volume de minério de ferro e carga geral. Ao longo da EFVM existem 13 minas, 34 pátios de formação de trens e atendimento a clientes e 26 terminais, incluindo Tubarão que é o maior pátio ferroviário da América Latina.

O centro de controle de tráfego da EFVM possui a atividade de distribuição de locomotivas que se inicia com um mapeamento da frota de locomotivas ao longo dos pátios da EFVM, visando o balanceamento da frota de tal forma a atender o volume a ser transportado, ou seja, realizar comparativo entre oferta e demanda de trens nos pátios e terminais ao longo da via e as restrições dos trens em circulação.

A distribuição de locomotivas consiste em associar um conjunto de locomotivas para cada trem que esteja na programação diária, associando potência em HP necessária

para tracionar o peso demandado para os trens nos diferentes perfis altimétricos da via.

Para que um trem se locomova, é necessário que haja pelo menos uma locomotiva ativa, com potência suficiente para deslocar o peso dos vagões anexados. Estas locomotivas podem viajar de três formas: 1) anexadas somente a vagões, 2) anexadas a outras locomotivas desligadas e vagões anexados, ou seja, rebocadas (*Deadheading*), o que pode ser muito útil para balanceamento entre oferta e demanda de locomotivas e 3) locomotivas escoteiras (*Light Traveling*) que são trens formados somente de locomotivas sem vagões anexados.

As locomotivas *Light Traveling* têm uma pior relação receita x custo do que as locomotivas *Deadheading*, pois consomem combustível sem carga atrelada ao trem, além de concorrer com trens produtivos na circulação da via e demandam o recurso de equipagem (maquinista) que poderia estar puxando trens com vagões anexados.

Assim, no modelo proposto foram utilizadas como padrão seis locomotivas em cada trem, tendo uma variação entre instâncias de quatro a oito locomotivas. Na EFVM a quantidade máxima de locomotivas por trem pode variar por tipo e disposição das máquinas, ou seja, distribuídas ao longo do trem a fim de reduzir os esforços dos engates.

A potência das locomotivas é definida em número de HP, quanto maior o número de HP maior é a capacidade de tracionar um trem. Na EFVM existem alguns modelos de locomotivas que são utilizados para manobras em pátios e terminais e na circulação de trens ao longo da via, conforme Tabela 4 (VALE, 2014).

Tabela 4 – Tipos de Locomotivas da EFVM

Modelo Locomotiva	Potência (HP)
G-12	1.310
G-16	1.800
B-36	3.600
DDM-45	3.600
DASH-8/9	4.000

Fonte: Vale (2014)

Na EFVM existe um quadro de tração que determina qual é a capacidade máxima por trecho em toneladas brutas que cada locomotiva pode tracionar, de acordo com a Tabela 5 (VALE, 2014).

Tabela 5 – Capacidade de Tração (Ton) por Trecho de Locomotivas da EFVM

Pátios EFVM		Modelo de Locomotivas / Capacidade de Tração (ton)				
Origem	Destino	G-12	G-16	B-36	DDM - 45	DASH - 8/9
PN	AB	2.200	3.600	7.200	7.200	8.000
AB	PA	960	1.310	2.800	2.800	2.920
PA	MR	1.600	2.200	4.390	4.390	4.870
MR	DD	750	1.100	2.540	2.540	3.050
DD	LB	450	720	2.100	2.100	2.330
LB	JP/CE	330	500	1.150	1.150	1.380
DD	CS	1.100	1.600	3.000	3.000	3.330
CS	AL	550	900	2.520	2.520	3.050
AL	FA	550	900	1.800	1.800	2.000
EB	OB	2.200	4.000	8.000	8.000	10.000
FA	EB	1.600	2.900	5.800	5.800	6.500
OB	EB	450	600	1.300	1.300	1.550
EB	TO	1.800	2.900	5.800	5.800	6.500
TO	AL	2.200	4.000	10.000	10.000	12.000
AL	DD	2.200	4.000	12.000	12.000	16.000
JP/CE	LB	2.200	3.600	8.000	8.000	8.000
LB	DD	2.200	4.000	12.000	12.000	16.000
DD	IC	2.200	4.000	8.000	8.000	10.000
IC	GV	2.200	4.000	12.000	12.000	16.000
GV	CL	2.200	4.000	12.000	12.000	16.000
CL	PN	2.100	3.450	7.200	7.200	9.000
CS	P4	550	900	1.600	1.800	2.000
P4	CD	2.100	3.400	6.400	6.800	7.550
CD	WI	1.470	2.430	4.500	4.860	5.400
WI	P5	600	830	1.600	1.800	2.000
P5	CS	2.100	4.000	10.000	10.000	12.000

Fonte: Vale (2014)

3.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Nesta dissertação foi abordado para aplicação do modelo proposto um caso prático somente com trens de carga geral que circulam na EFVM, que com base em informações da programação mensal do volume a ser transportado, é gerado um

plano de trens que consta informações, tais como: produto a ser transportado, origem, destino, frequência mensal do trem, horário de partida e chegada, *transit time*, modelo do trem com quantidade e tipo de locomotivas, fluxos de vagões vazios e carregados, capacidade de transporte e a demanda de vagões.

Os dados do plano de trens foram utilizados como *input* de demanda no modelo proposto utilizando dados como o prefixo do trem, pátios de origem e destino, frequência mensal, horário de partida, quantidade de locomotivas ativas e rebocadas por tipo. Foram utilizados 13 pátios ao longo da EFVM, conforme Quadro 1, sendo que os trens oriundos da Ferrovia Centro Atlântica (FCA) foram considerados no pátio de Costa Lacerda (VCS).

Quadro 1 - Pátios EFVM

Sigla	Pátio
VTU	Tubarão
VPA	Piraqueçu
VAZ	Aracruz
VJC	João Correa
VIC	Intendente Câmara
VMR	Mário Carvalho
VDD	Desembargador Drumond
VJP	João Paulo
VJM	João Monlevade
VCS	Costa Lacerda
VTO	Timbopeba
VEB	Engenheiro Bandeira
VFA	Fábrica

Fonte: Autor (2015)

Os dados referentes à oferta de locomotivas são provenientes de dados reais de circulação de trens nos pátios da EFVM no período de maio e junho de 2015. Nas instâncias geradas foram utilizados 3 tipos de locomotivas, a DASH-8/9, a DDM-45 e a B-36. O custo de locomotivas *Light Traveling* foi considerado dez vezes maior do que locomotivas *Deadheading*, para possibilitar o modelo penalizar este tipo de

formação de trens. Os valores exatos não foram mantidos, pois os dados são confidenciais e não podem ser divulgados.

Foi criada a figura de uma locomotiva virtual para suprir possíveis desbalanceamentos entre oferta e demanda e tornar mais eficaz uma análise e tomada de decisão no que tange a distribuição de locomotivas. A utilização destas locomotivas virtuais pelo modelo em um certo pátio em um certo tempo indica que neste pátio e neste tempo a oferta real é incapaz de atender a demanda por locomotiva, e as instâncias do modelo matemático foram executadas em um horizonte de tempo de sete dias.

3.4 ETAPAS DESENVOLVIDAS

Para alcançar o objetivo da dissertação, foi definida uma metodologia de pesquisa. Esta metodologia está dividida em seis etapas, conforme a seguir.

Etapa 1: Nesta etapa inicial, foi definido o tema a ser estudado e iniciada a revisão bibliográfica sobre o problema do planejamento da distribuição de locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens. Nesta etapa foi possível conhecer os conjuntos, parâmetros e variáveis sobre o assunto estudado, que auxiliou no levantamento de dados para aplicação no modelo matemático desenvolvido.

Etapa 2: Foi formulado um modelo matemático de Programação Inteira visando resolver o problema do planejamento da distribuição de locomotivas, utilizando o *solver* IBM ILOG CPLEX 12.6 que é uma ferramenta bastante difundida no meio acadêmico, gratuita para este fim e de fácil interface com o usuário.

Etapa 3: A partir da proposição do modelo matemático, foi realizado o levantamento de dados junto a empresa VALE S/A, tais como: plano de trens, considerando origem e destino, frequência mensal de trens, horário de partida, quantidade de locomotivas por tipo ativas e rebocadas para gerar a demanda de transporte; oferta

de locomotivas por tipo alocadas nos pátios da malha ferroviária prontas para serem alocadas em trens.

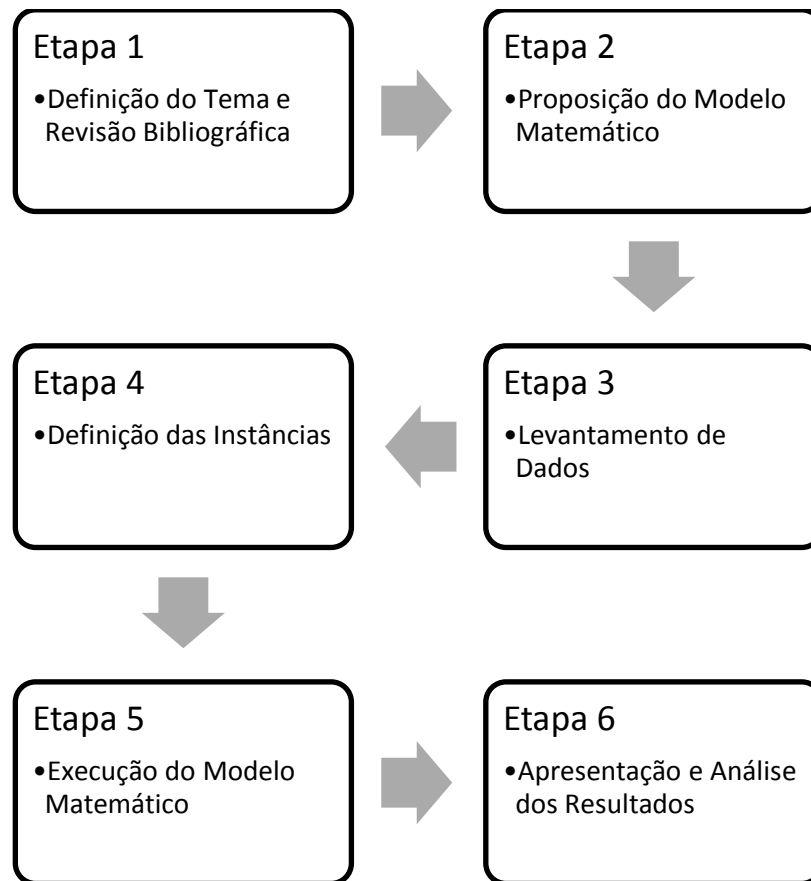
Etapa 4: Após o levantamento dos dados foram definidas as instâncias a serem utilizadas, com intuito de mostrar a aplicabilidade do modelo matemático proposto e suportar a tomada de decisão gerencial.

Etapa 5: Após definição das instâncias, estas foram executadas no *software* CPLEX buscando resolver o problema do planejamento da distribuição de locomotivas.

Etapa 6: Depois da execução do modelo matemático com as instâncias definidas, a etapa de tratamento de dados foi importante para uma melhor análise dos resultados obtidos entre as variações das instâncias definidas.

A Figura 4 apresenta o sequenciamento das etapas da metodologia desta dissertação.

Figura 4 - Etapas da Metodologia da Pesquisa



Fonte: Autor (2015)

3.5 INSTÂNCIAS PROPOSTAS

A partir dos dados levantados, foram construídas as instâncias para teste do modelo proposto. Foi escolhido o período de maio e junho de 2015 e elaborado 28 instâncias de testes, a partir de variações de 4 instâncias padrão, considerando os dados dos planos de trens de maio e junho de 2015, ou seja, a demanda planejada destes meses, conforme Tabela 6 e Tabela 7 e dados reais de oferta de locomotivas em semanas destes meses na qual era visível um desbalanceamento entre oferta e demanda. Para complementar a análise foram criadas outras 04 instâncias com dados reais para teste, na qual analisou dados de semanas diferentes dos meses de maio e junho de 2015, que foram semanas em que o balanceamento entre oferta e demanda estavam equilibradas de tal forma a não utilizar na função objetivo as locomotivas virtuais para suprir possíveis desbalanceamentos.

A demanda gerada foi baseada na transformação de número de locomotivas por trem em quantidade de potência necessária (HP) para transportar a carga. A oferta de locomotivas por tipo nos pátios definidos na seção 3.2 é oriunda de dados reais dos meses de maio e junho de 2015, sendo que esta oferta foi alocada em quatro semanas de sete dias do mês de maio e quatro semanas de sete dias do mês de junho.

Tabela 6 - Plano de trens carga geral EFVM (Maio/15)

Trem	Origem	Destino	Freq. Mensal	Intervalo entre trens (dias)
Trem 1	VTU	VCS	22	1,4
Trem 2	VTU	VCS	22	1,4
Trem 3	VTU	VIC	8	3,9
Trem 4	VTU	VCS	5	6,2
Trem 5	VTU	VCS	7	4,4
Trem 6	VTU	VCS	18	1,7
Trem 7	VTU	VCS	26	1,2
Trem 8	VTU	VCS	26	1,2
Trem 9	VTU	VCS	25	1,2
Trem 10	VTU	VCS	25	1,2
Trem 11	VPA	VEB	31	1,0
Trem 12	VAZ	VCS	31	1,0
Trem 13	VJC	VCS	31	1,0
Trem 14	VIC	VEB	22	1,4
Trem 15	VIC	VCS	31	1,0
Trem 16	VMR	VEB	31	1,0
Trem 17	VMR	VTO	2	15,5
Trem 18	VMR	VFA	2	15,5
Trem 19	VDD	VJP	1	31,0
Trem 20	VJP	VTU	1	31,0
Trem 21	VJM	VCS	11	2,8
Trem 22	VJM	VCS	11	2,8
Trem 23	VCS	VAZ	27	1,1
Trem 24	VTO	VMR	19	1,6
Trem 25	VEB	VMR	40	0,8
Trem 26	VEB	VPA	8	3,9
Trem 27	VEB	VTU	8	3,9
Trem 28	VEB	VTU	8	3,9
Trem 29	VFA	VMR	9	3,4
Trem 30	VCS	VTU	9	3,4
Trem 31	VCS	VTU	18	1,7
Trem 32	VCS	VTU	6	5,2
Trem 33	VCS	VTU	9	3,4
Trem 34	VCS	VTU	10	3,1
Trem 35	VCS	VTU	15	2,1
Trem 36	VCS	VTU	31	1,0
Trem 37	VCS	VTU	31	1,0

Fonte: Vale (2015)

Nota: Dados adaptados pelo autor

Tabela 7 - Plano de trens carga geral EFVM (Junho/15)

Trem	Origem	Destino	Freq. Mensal	Intervalo entre trens (dias)
Trem 1	VTU	VCS	22	1,4
Trem 2	VTU	VCS	22	1,4
Trem 3	VTU	VIC	8	3,8
Trem 4	VTU	VCS	7	4,3
Trem 5	VTU	VCS	7	4,3
Trem 6	VTU	VCS	20	1,5
Trem 7	VTU	VCS	26	1,2
Trem 8	VTU	VCS	24	1,3
Trem 9	VTU	VCS	24	1,3
Trem 10	VTU	VCS	23	1,3
Trem 11	VPA	VEB	29	1,0
Trem 12	VAZ	VCS	29	1,0
Trem 13	VJC	VCS	29	1,0
Trem 14	VIC	VEB	22	1,4
Trem 15	VIC	VCS	25	1,2
Trem 16	VMR	VEB	25	1,2
Trem 17	VMR	VTO	2	15,0
Trem 18	VMR	VFA	2	15,0
Trem 19	VDD	VJP	1	30,0
Trem 20	VJP	VTU	1	30,0
Trem 21	VJM	VCS	10	3,0
Trem 22	VJM	VCS	10	3,0
Trem 23	VCS	VAZ	28	1,1
Trem 24	VTO	VMR	19	1,6
Trem 25	VEB	VMR	35	0,9
Trem 26	VEB	VPA	8	3,8
Trem 27	VEB	VTU	8	3,8
Trem 28	VEB	VTU	8	3,8
Trem 29	VFA	VMR	9	3,3
Trem 30	VCS	VTU	9	3,3
Trem 31	VCS	VTU	18	1,7
Trem 32	VCS	VTU	6	5,0
Trem 33	VCS	VTU	9	3,3
Trem 34	VCS	VTU	10	3,0
Trem 35	VCS	VTU	15	2,0
Trem 36	VCS	VTU	30	1,0
Trem 37	VCS	VTU	30	1,0

Fonte: Vale (2015)

Nota: Dados adaptados pelo autor

As instâncias foram geradas a partir de uma rede espaço-tempo contemplando 13 pátios da EFVM, começando em Tubarão, pátio 0, e sete dias de horizonte de tempo, conforme Figura 5.

Figura 5 - Rede espaço-tempo das Instâncias

	Tempo (ht) Pátios (np)	1	2	3	4	5	6	7
0 - Tubarão		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
1 - Piraqueaçu		1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
2 - Aracruz		2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
3 - João Correa		3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7
4 - Int. Câmara		4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7
5 - M. Carvalho		5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7
6 - D. Drumond		6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7
7 - João Paulo		7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7
8 - J. Monlevade		8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7
9 - C. Lacerda		9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7
10 - Timbopeba		10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7
11 - E. Bandeira		11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7
12 - Fábrica		12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7

Fonte: Autor (2015)

Na Tabela 8 são mostradas todas as instâncias de testes geradas no desenvolvimento desta dissertação.

Tabela 8 - Instâncias de teste executadas no modelo

Grupo de Análise	Instância	Semana	Mês	Variação das Instâncias
A	1	1	mai/15	Padrão
	2			Máximo 4 locomotivas por trem
	3			Máximo 8 locomotivas por trem
	4			+10% de intervalo entre trens
	5			+10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
	6			-10% de intervalo entre trens
	7			-10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
B	8	2	jun/15	Padrão
	9			Máximo 4 locomotivas por trem
	10			Máximo 8 locomotivas por trem
	11			+10% de intervalo entre trens
	12			+10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
	13			-10% de intervalo entre trens
	14			-10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
C	15	3		Padrão
	16			Máximo 4 locomotivas por trem
	17			Máximo 8 locomotivas por trem
	18			+10% de intervalo entre trens
	19			+10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
	20			-10% de intervalo entre trens
	21			-10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
D	22	4		Padrão
	23			Máximo 4 locomotivas por trem
	24			Máximo 8 locomotivas por trem
	25			+10% de intervalo entre trens
	26			+10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
	27			-10% de intervalo entre trens
	28			-10% de intervalo entre trens e no máximo 8 locomotivas por trem
E	29	5	mai/15	Padrão
	30	6		
	31	7	jun/15	
	32	8		

Fonte: Autor (2015)

As instâncias criadas foram separadas em grupos de análises, sendo que o grupo A refere-se aos dados da última semana do mês de maio/15 e os grupos B, C e D referem-se aos dados das três primeiras semanas do mês de junho/15 respectivamente. O grupo E refere-se aos dados das três primeiras semanas do mês de maio/15 e a última semana do mês de junho/15.

A Instância 1 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana do mês de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de 07 dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia.

A Instância 2 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana do mês de maio de 15 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente e um período de sete dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de quatro locomotivas por trem.

A Instância 3 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente e um período de sete dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de oito locomotivas por trem.

A Instância 4 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre

oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de horizonte de tempo, um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia e considera um aumento de 10% no intervalo entre trens, ou seja, aumentando o *transit time* entre origem e destino e consequentemente uma redução no número de trens em um mesmo período de tempo.

A Instância 5 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de horizonte de tempo e considera um aumento de 10% no intervalo entre trens, ou seja, aumentando o *transit time* entre origem e destino e consequentemente uma redução no número de trens em um mesmo período de tempo. Esta instância considera um número máximo de oito locomotivas por trem.

A Instância 6 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de horizonte de tempo, um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia e considera uma redução de 10% no intervalo entre trens, ou seja, reduzindo o *transit time* entre origem e destino e consequentemente um aumento no número de trens em um mesmo período de tempo.

A Instância 7 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a última semana de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de

horizonte de tempo e considera uma redução de 10% no intervalo entre trens, ou seja, reduzindo o *transit time* entre origem e destino e consequentemente um aumento no número de trens em um mesmo período de tempo. Esta instância também considera um número máximo de oito locomotivas por trem.

As instâncias de 8 a 14, de 15 a 21 e de 22 a 28, tem as mesmas características das instâncias de 1 a 7, alterando somente os dados do período de análise que são 3 semanas do mês de junho/15 com a oferta de locomotivas ao longo dos 13 pátios da EFVM referenciados nesta dissertação e o plano de trens do mês de junho de 15 com o planejamento da demanda de trens de carga geral.

A Instância 29 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a primeira semana do mês de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia.

A Instância 30 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a segunda semana do mês de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia.

A Instância 31 utiliza dados de oferta de locomotivas referente a terceira semana do mês de maio de 2015 e do plano de trens do mês de maio de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um

período de sete dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia.

A Instância 32 utiliza dados de oferta de locomotivas referente à última semana do mês de junho de 2015 e do plano de trens do mês de junho de 2015 com o planejamento da demanda de trens. Esta instância considera o modelo utilizando um quarto tipo de locomotiva na oferta, que são locomotivas utilizadas para balanceamento entre oferta e demanda, na qual está sendo referenciada como locomotiva virtual. Esta instância utiliza os 13 pátios descritos anteriormente, um período de sete dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia.

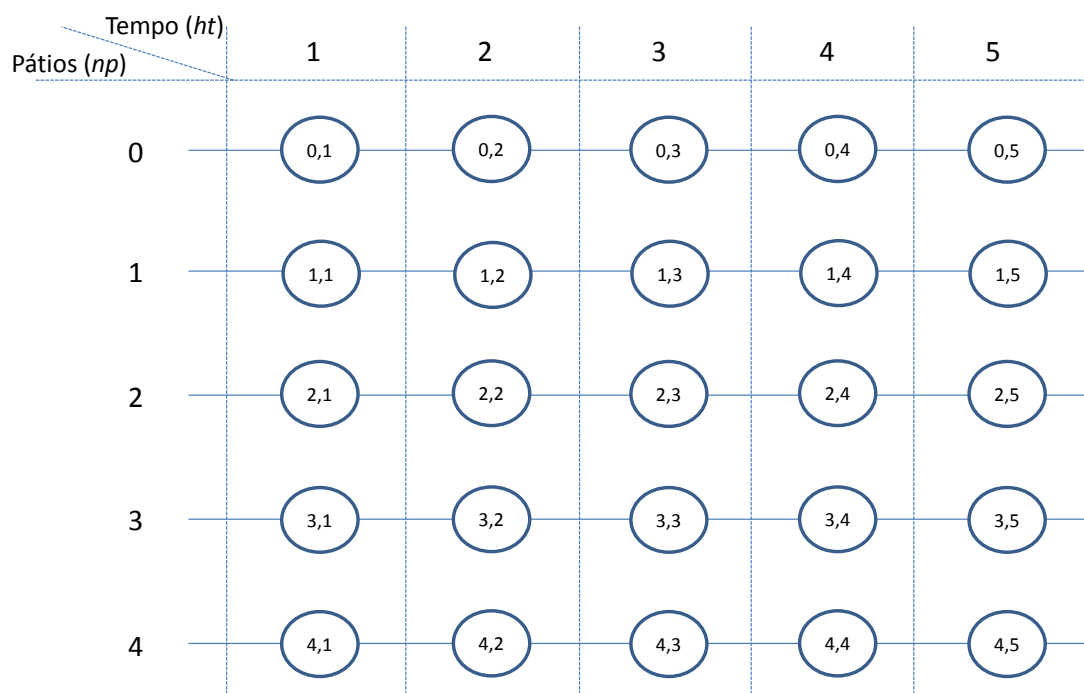
Foi estabelecido um tempo limite de 14.400 segundos (4 horas) para execução das instâncias no CPLEX de cada um dos modelos evidenciados e foi utilizado um computador com processador *Intel i5* com 8 GB de memória RAM.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto foi elaborado visando minimizar custo de distribuição de locomotivas para atender a demanda de locomotivas a partir de um plano de trens, reduzindo o deslocamento de locomotivas em trens com locomotivas *Deadheading* (locomotivas rebocadas) e locomotivas *Light Traveling* (locomotivas escoteiras).

O modelo matemático está baseado em uma rede espaço-tempo, conforme Figura 6. A rede espaço-tempo é constituída de np pátios e horizonte de planejamento de ht tempos. Na Figura 6, as colunas representam o tempo discretizado, t , e as linhas representam os pátios, p . Assim, pode-se ver na Figura 6 uma situação onde existem 5 pátios e pretende-se planejar a distribuição de locomotivas em um horizonte de planejamento de 5 dias discretizado dia a dia. Portanto, cada pátio existe na rede espaço-tempo n vezes quanto tempo tiver o horizonte de planejamento, sendo representado por uma tupla (pátio, tempo).

Figura 6 – Rede espaço-tempo



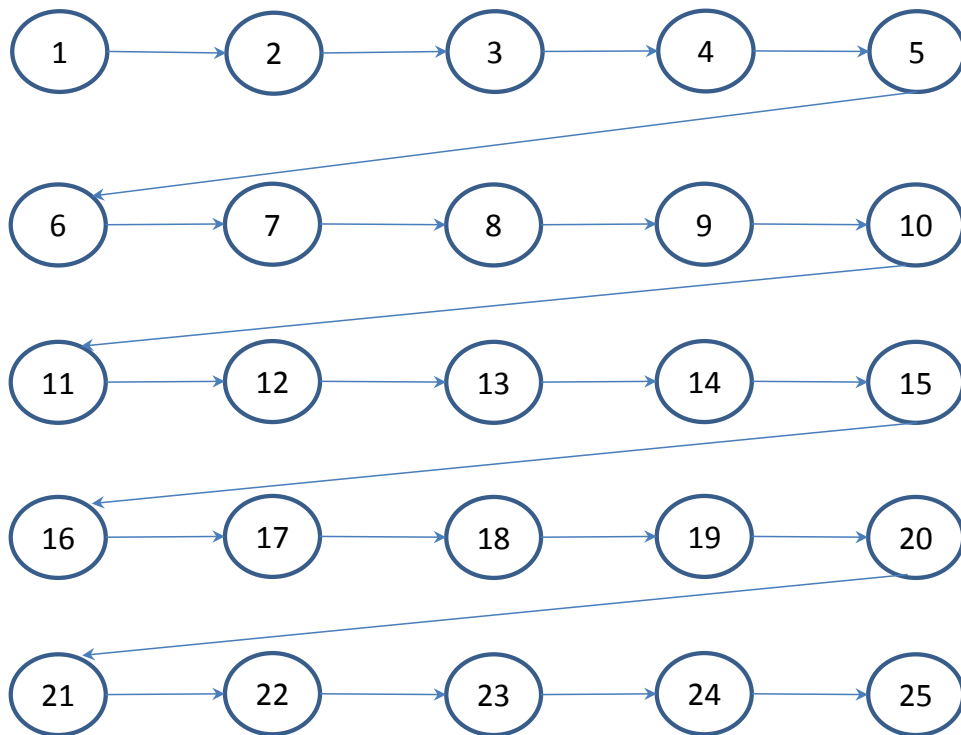
Fonte: Autor (2015)

Nesta dissertação é proposta a transformação desta rede espaço-tempo em um vetor espaço-tempo, de acordo com a Figura 7, visando simplificar a estrutura do modelo. Para realizar esta transformação, tomando t como o tempo discretizado, têm-se duas situações:

- 1) $t = 1$, quando se está no pátio p no tempo 1 e;
- 2) $t > 1$, quando se está no pátio p no tempo maior que 1.

Tomando a Figura 6 e as duas situações apresentadas pode-se transformar a rede espaço-tempo da Figura 6 no vetor espaço-tempo da Figura 7 por meio da fórmula $(t + (p \times h))$. Para exemplificar, apresentam-se dois casos, um para cada uma das situações apresentadas. Primeiro exemplo, analisando o pátio 0 no tempo 1 da Figura 6 chega-se a posição 1 do vetor espaço-tempo da Figura 7 calculando pela fórmula $((t + (p \times h)) = ((1 + (0 \times 5)) = 1$. Segundo exemplo, analisando o pátio 2 no tempo 3 da Figura 6 chega-se a posição 13 do vetor espaço-tempo da Figura 7 calculando pela fórmula $((t + (p \times h)) = ((3 + (2 \times 5)) = 13$. Após toda a transformação exemplificada anteriormente, chega-se, então, à Figura 7 que representa o vetor espaço-tempo do problema da Figura 6.

Figura 7 - Vetor espaço-tempo



Fonte: Autor (2015)

Com base no vetor espaço-tempo explicado anteriormente, pode-se então apresentar o modelo matemático proposto em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

- Conjuntos

K - Conjunto de locomotivas, sendo $K = \{KV \cup KR\}$;

KV - Conjunto de locomotivas virtuais, sendo $KV \subset K$;

KR - Conjunto de locomotivas reais, sendo $KR \subset K$;

G - Conjunto de todos trens que circulam na ferrovia no período de tempo analisado, sendo $G = \{GL \cup GD\}$;

GL - Conjunto de todos trens que circulam na ferrovia com locomotivas *Light Traveling*, sendo que $GL \subset G$;

GD - Conjunto de todos trens que circularão na ferrovia com locomotivas *Deadheading*, sendo que $GD \subset G$;

HT - Conjunto de tempos, em dias, do horizonte de planejamento;

NP - Conjunto de pátios da ferrovia analisada, $p = \{0 \dots np-1\}$; e

N - Conjunto auxiliar do nó $i \in N$ que representa a relação pátio x tempo do vetor espaço-tempo, onde a quantidade de nós do conjunto N é calculada pela equação $np \cdot ht$.

- Parâmetros

cd_g - Custo unitário do trem *Deadheading* $g \in GD$;

cl_g - Custo unitário do trem *Light Traveling* $g \in GL$;

μ_{gij} - Quantidade máxima de locomotivas no trem $g \in G$ quando ele está circulando no trecho compreendido entre o nó $i \in N$ e o nó $j \in N$;

θ_{ki} - Oferta de locomotivas do tipo $k \in K$ no nó $i \in N$;

α_i - Demanda em HP para formar trens no nó $i \in N$;

β_k - Potência em HP das locomotivas do tipo $k \in K$;

λ - Parâmetro para priorizar a utilização de locomotivas de maior potência; e

η - Parâmetro de penalização do uso de locomotivas virtuais.

- Variáveis

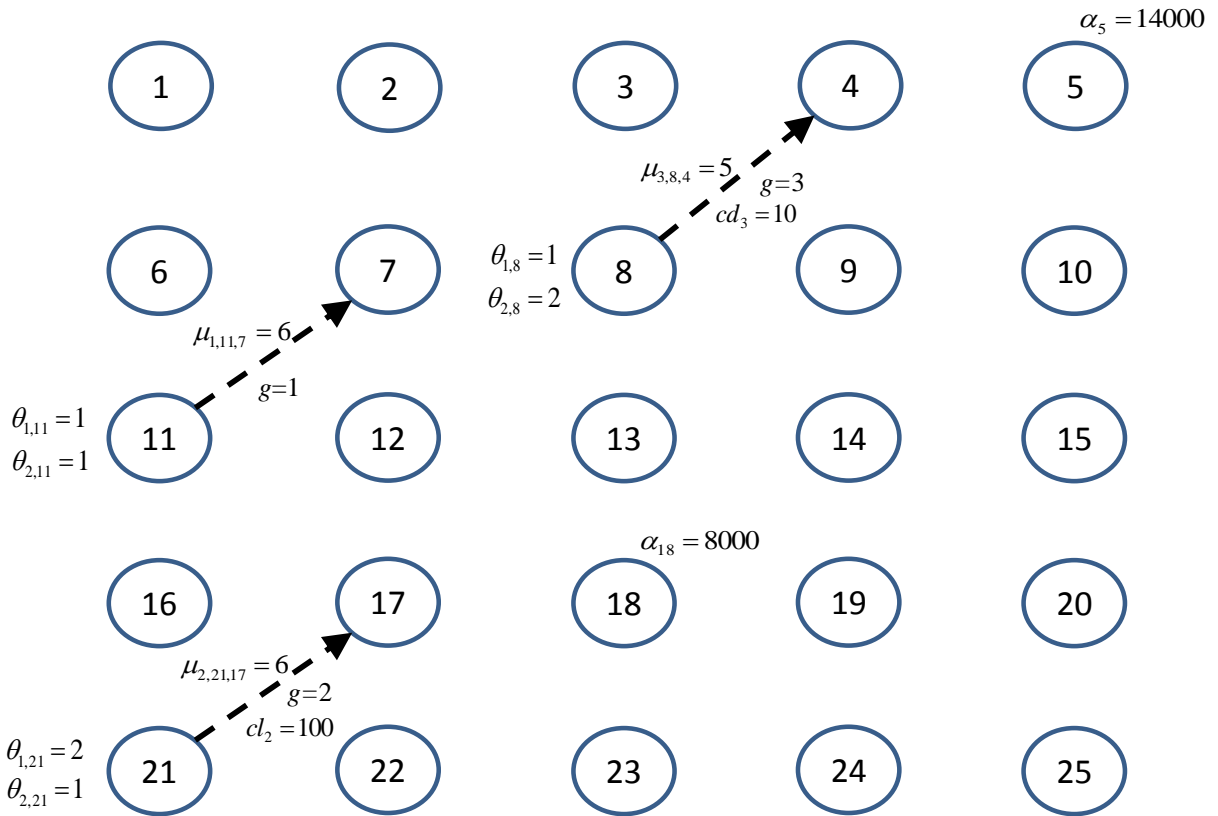
x_{gkij} - Quantidade de locomotivas do tipo $k \in K$ acopladas ao trem $g \in G$ quando ele está circulando no trecho compreendido entre o nó $i \in N$ e o nó $j \in N$;

y_{ki} - Quantidade de locomotivas do tipo $k \in K$ estacionadas e prontas para serem utilizadas no nó $i \in N$;

w_{ki} - Quantidade de locomotivas do tipo $k \in K$ alocadas para atender a demanda no nó $i \in N$.

Antes de apresentar a função objetivo e as restrições do problema, apresentam-se a seguir os principais conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo proposto por meio de um exemplo, Figura 8, que possui um vetor espaço-tempo contemplando 5 pátios, $NP = \{0,1,2,3,4\}$, 5 horizontes de tempo, $HT = \{1,2,3,4,5\}$, 3 trens, $G = \{1,2,3\}$ e 2 tipos de locomotivas, $K = \{1,2\}$, sendo que a potência de cada locomotiva do tipo 1 equivale a 2.000 HP, $\beta_1 = 2.000$ e a potência de cada locomotiva do tipo 2 equivale a 4.000 HP, ou seja, $\beta_2 = 4.000$. O máximo de locomotivas que podem ser acopladas nos trens 1, 2 e 3 são $\mu_{1,11,7} = 6$, $\mu_{2,21,17} = 6$ e $\mu_{3,8,4} = 5$. Exemplificando três trens, representados no vetor espaço-tempo de acordo com a Figura 8, tem-se um trem 1, $g = 1$, cujo trajeto é entre os nós 11 e 7, com oferta de uma locomotiva do tipo 1 no nó 11, $\theta_{1,11} = 1$ e uma locomotiva do tipo 2 também no nó 11, $\theta_{2,11} = 1$. O trem 2, $g = 2$, cujo o trajeto é entre os nós 21 e 17, com oferta de duas locomotivas do tipo 1 no nó 21, $\theta_{1,21} = 2$ e uma locomotiva do tipo 2 também no nó 21, $\theta_{2,21} = 1$, um custo unitário para locomoção de locomotivas escoteiras (*Light Traveling*) viajando sem vagões anexados com um custo associado de $cl_2 = 100$ e demanda de 8.000 HP no nó 18, $\alpha_{18} = 8.000$. O trem 3, $g = 3$, cujo trecho percorrido sai do nó 8 até o nó 4, tem oferta de uma locomotiva do tipo 1 no nó 8, $\theta_{1,8} = 1$ e duas locomotivas do tipo 2 também no nó 8, $\theta_{2,8} = 2$, um custo unitário para locomoção de locomotivas rebocadas (*Deadheading*) viajando apagadas com locomotivas ativas e vagões anexados com um custo associado de $cd_3 = 10$ e demanda de 14.000 HP no nó 5, $\alpha_5 = 14.000$.

Figura 8 - Exemplo de parâmetros no vetor espaço-tempo



Fonte: Autor (2015)

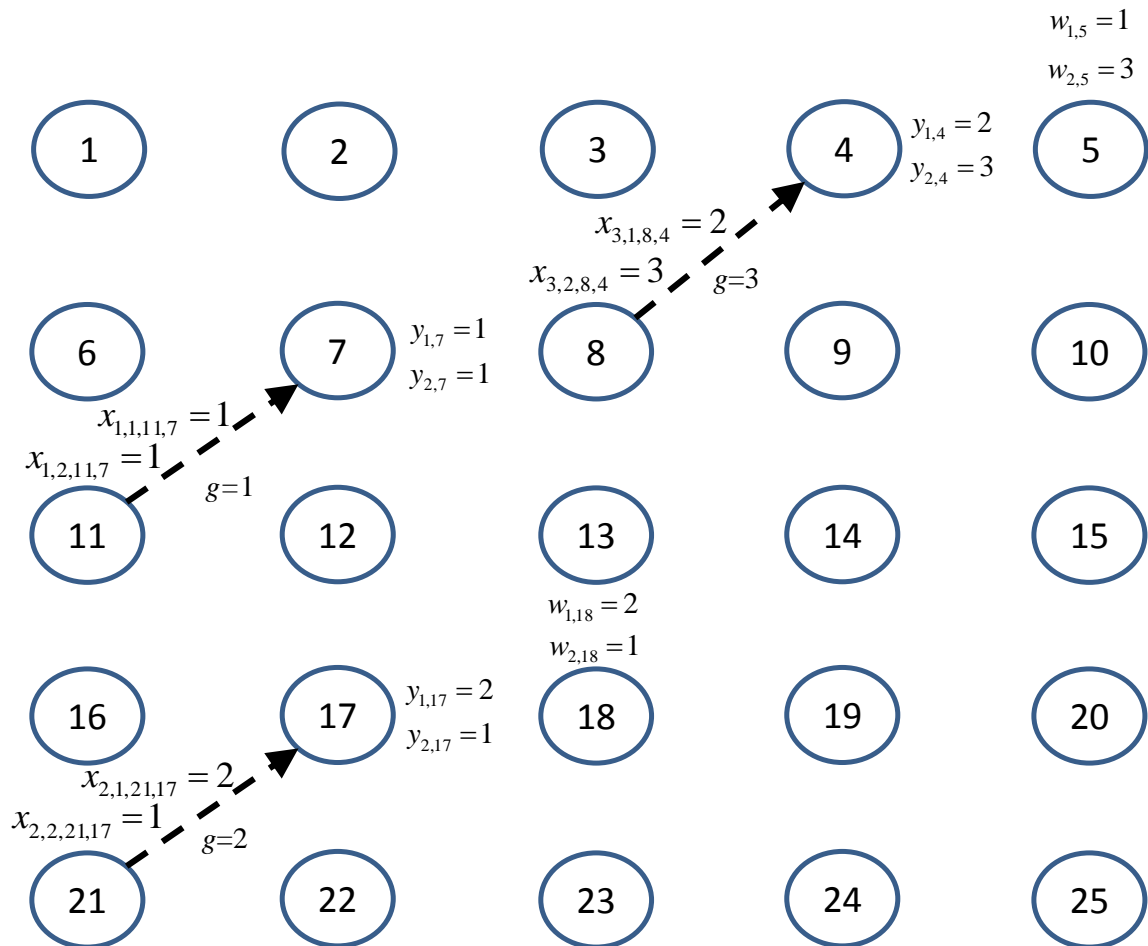
Como resultado do exemplo anterior, a Figura 9 mostra os três trens representados no vetor espaço-tempo, onde se tem circulando no trecho compreendido entre os nós 11 e 7 uma locomotiva do tipo 1, $x_{1,1,11,7}=1$, e uma locomotiva do tipo 2, $x_{1,2,11,7}=1$, acopladas ao trem 1, $g=1$, e ao final deste trajeto no nó 7 se tem uma locomotiva do tipo 1 e uma locomotiva do tipo 2 estacionadas e prontas para serem utilizadas, $y_{1,7}=1$ e $y_{2,7}=1$.

No trecho compreendido entre os nós 21 e 17 têm-se circulando o trem 2, $g=2$, com duas locomotivas acopladas do tipo 1, $x_{2,1,21,17}=2$, e uma locomotiva do tipo 2, $x_{2,2,21,17}=1$, e ao final deste trajeto no nó 17 existem duas locomotivas do tipo 1 e uma locomotiva do tipo 2 estacionadas e prontas para serem utilizadas, $y_{1,17}=2$ e

$y_{2,17} = 1$. Existem duas locomotivas do tipo 1 e uma locomotiva do tipo 2 alocadas para atender a demanda no nó 18, $w_{1,18} = 2$ e $w_{2,18} = 1$.

No trecho compreendido entre os nós 8 e 4 têm-se circulando o trem 3, $g = 3$, com duas locomotivas acopladas do tipo 1, $x_{3,1,8,4} = 2$, e três locomotivas do tipo 2, $x_{3,2,8,4} = 3$, e ao final deste trajeto no nó 4 existem duas locomotivas do tipo 1 e três locomotivas do tipo 2 estacionadas e prontas para serem utilizadas, $y_{1,4} = 2$ e $y_{2,4} = 3$. Existe uma locomotiva do tipo 1 e três locomotivas do tipo 2 alocadas para atender a demanda no nó 5, $w_{1,5} = 1$ e $w_{2,5} = 3$.

Figura 9 - Exemplo do resultado no vetor espaço-tempo



Fonte: Autor (2015)

A partir das descrições anteriores, são apresentadas a seguir a função objetivo e as restrições do modelo matemático proposto.

Função Objetivo

Minimizar

$$\sum_{g \in GD} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} cd_g \cdot x_{gkij} + \sum_{g \in GI} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} cl_g \cdot x_{gkij} + \lambda \sum_{k \in KR} \sum_{i \in N} w_{ki} + \eta \sum_{k \in KV} \sum_{i \in N} w_{ki} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$y_{k(t+(p.ht))} = \theta_{k(t+(p.ht))} - \sum_{g \in G} \sum_{j \in N} x_{gk(t+(p.ht))j} - w_{k(t+(p.ht))} \quad (2)$$

$$\forall k \in K, p \in NP, t \in HT : t = 1$$

$$y_{k(t+(p.ht))} = y_{k((t+(p.ht))-1)} - \sum_{g \in G} \sum_{j \in N} x_{gk(t+(p.ht))j} + \sum_{g \in G} \sum_{j \in N} x_{gkj(t+(p.ht))} - w_{k(t+(p.ht))} + \theta_{k(t+(p.ht))} \quad (3)$$

$$\forall k \in K, p \in NP, t \in HT : t > 1$$

$$\alpha_i \leq \sum_{k \in K} w_{ki} \cdot \beta_k \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$y_{ki} \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in N \quad (5)$$

$$0 \leq x_{gkij} \leq \mu_{gij} \quad \forall g \in G, k \in K, i \in N, j \in N \quad (6)$$

$$w_{ki} \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in N \quad (7)$$

A Equação (1) representa a função objetivo que visa a minimização dos custos de distribuição de locomotivas e é dividida em quatro parcelas. A primeira parcela calcula o custo de todos os trens *Deadheading* $g \in GD$ multiplicado pela quantidade

de locomotivas do tipo $k \in K$ no trem $g \in G$, correspondente ao trecho $i \in N$ a $j \in N$ percorrido. A segunda parcela calcula o custo de todos os trens *Light Traveling* $g \in GL$ multiplicado pela quantidade de locomotivas do tipo $k \in K$ no trem $g \in G$, correspondente ao trecho $i \in N$ a $j \in N$ percorrido. A terceira parcela calcula a quantidade de locomotivas $k \in KR$ utilizadas para atender a demanda no nó i . Com isso espera-se utilizar locomotivas de maior potência (HP), visando à redução do número de locomotivas utilizadas para atender a demanda. A quarta parcela é proposta com intuito de evitar a utilização de locomotivas virtuais, que foram propostas nesta dissertação para gerar o equilíbrio entre oferta e demanda de locomotivas. O que se espera com esta quarta parcela que tem um fator de penalização é que o modelo evite ao máximo a utilização das mesmas. Vale ressaltar que o uso de locomotivas virtuais $k \in KV$ para atender a demanda no nó i representa que o nó i não terá sua demanda por locomotiva atendida.

As Restrições (2) garantem a manutenção do estoque de locomotivas no nó correspondente, considerando o balanceamento entre oferta e demanda, bem como as locomotivas que foram enviadas para outros nós. As Restrições (2) são executadas somente quando a condição $t = 1$ for verdadeira, o que representa o tempo 1 de um certo pátio. As Restrições (2) representam o momento inicial de planejamento de cada pátio, ou seja, ainda não existem locomotivas que podem ser transportadas para tais nós. As Restrições (3) diferem das Restrições (2), pois representam os outros tempos na matriz espaço-tempo de certo pátio. Ele considera também as locomotivas que chegam de outros pátios em tempos anteriores para o cálculo da continuidade de fluxo, o que não ocorre nas Restrições (2). As Restrições (3) são executadas somente quando a condição $t > 1$ for verdadeira, o que representa o tempo maior que 1 de um certo pátio na matriz espaço tempo.

As Restrições (4) garantem que a quantidade de HP com demanda no nó i seja menor ou igual que o número de locomotivas do tipo $k \in K$ para atender a demanda no nó i multiplicado pela quantidade de HP por locomotivas do tipo $k \in K$. As Restrições (5) garantem a não negatividade dos estoques de cada tipo de locomotiva, para cada nó. As Restrições (6) garantem que a quantidade de locomotivas do tipo $k \in K$ no trem $g \in G$, correspondente ao trecho $i \in N$ a $j \in N$

percorrido, seja positiva e limitada à quantidade de locomotivas do trem $g \in G$, correspondente ao trecho $i \in N$ a $j \in N$ percorrido, de cada instância testada deste modelo. As Restrições (7) garantem a quantidade de locomotivas do tipo $k \in K$ para atender a demanda no nó i seja positiva.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos pelo *solver* CPLEX 12.6 nas 32 instâncias descritas na Seção 3.5. Ressalta-se que os dados das instâncias foram obtidos de dados reais de sistema informatizado da EFVM no período de maio e junho de 2015 e do plano de trens de carga geral de produtos transportados pela EFVM do mesmo período.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA AS INSTÂNCIAS PROPOSTAS

Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos pelos testes computacionais para cada instância, listando-se o grupo de análise; instâncias criadas; número de trens por semana; resultado da função objetivo; custo total de trens *Deadheading* e *Light Traveling*; quantidade de locomotivas *Deadheading*; quantidade de locomotivas *Light Traveling*; GAP; tempo de execução em segundos; quantidade de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal; quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó, ou seja, em estoque; e a quantidade média utilizada de locomotivas virtuais estacionadas em cada nó.

Ressalta-se que a função objetivo não possui uma unidade, ou seja, é adimensional, pois ela representa a minimização dos custos de distribuição de locomotivas sendo dividida em quatro parcelas. A primeira parcela calcula o custo de transportar locomotivas *Deadheading* pela quantidade de locomotivas que estão sendo transportadas dessa forma. A segunda parcela calcula o custo de transportar locomotivas *Light Traveling* pela quantidade de locomotivas que estão sendo transportadas dessa forma. A terceira parcela calcula a quantidade de locomotivas utilizadas para atender a demanda em um determinado nó e, com isso espera-se utilizar locomotivas de maior potência, pois haverá a redução do número de locomotivas utilizadas para atender a demanda, sendo adotado um coeficiente no valor de 0,01 para diminuir o impacto desta conta na função objetivo. A quarta parcela é proposta com intuito de evitar a utilização de locomotivas virtuais, que

foram propostas nesta dissertação para gerar o equilíbrio entre oferta e demanda de locomotivas. O que se espera com esta quarta parcela que tem um fator de penalização no valor de 1.000 é que o modelo evite ao máximo a utilização das mesmas. Vale ressaltar que o uso de locomotivas virtuais para atender a demanda em um determinado nó representa que este nó não terá sua demanda por locomotiva atendida.

De acordo com a Tabela 9, o *solver* CPLEX conseguiu resolver otimamente todas as instâncias em um tempo de execução relativamente pequeno, até 701,76 segundos, ou 11,70 minutos.

Os grupos de análise A, B, C e D referem-se às análises de dados ocorridos na última semana de maio, primeira, segunda e terceira semana de junho de 2015 respectivamente. As instâncias 1, 8, 15 e 22 são instâncias padrões com dados reais de demanda de locomotivas oriunda dos planos de trens de maio e junho de 2015, ofertas de locomotivas do mesmo período nos 13 pátios já mencionados na seção 3.3 em um período de 07 dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia. As demais instâncias foram comparadas com as instâncias padrões dentro de seus respectivos grupos de análise.

O grupo de análise E refere-se à análise de dados ocorridos nas três primeiras semanas de maio e na última semana de junho de 2015, gerando as Instâncias 29, 30, 31 e 32 respectivamente. Estas instâncias foram criadas somente para testar como se comportam os resultados com dados de oferta e demanda equilibrados. As instâncias em questão têm dados reais de demanda de locomotivas oriunda dos planos de trens de maio e junho de 2015, ofertas de locomotivas do mesmo período nos 13 pátios já mencionados na seção 3.3 em um período de 07 dias de horizonte de tempo e considera um número máximo de seis locomotivas por trem, que é o limite técnico da ferrovia.

Tabela 9 - Resultados apresentados pelo CPLEX para as instâncias criadas para testes

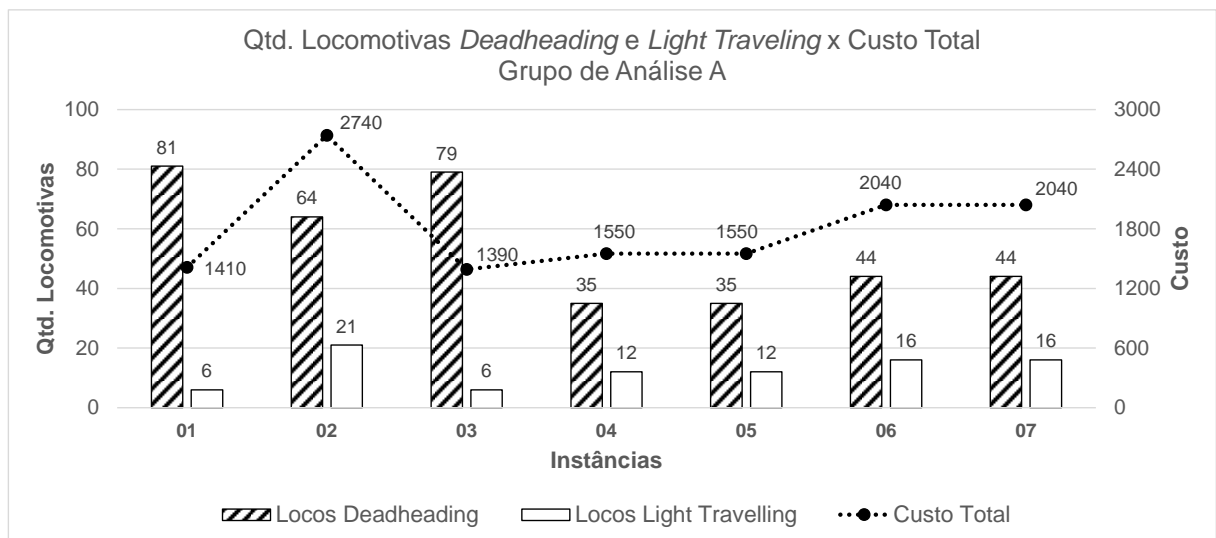
Grupo de Análise	Instância	Nº Trens / Semana	FO	Custo Total Light + Dead	Qtd. Locos Deadheading	Qtd. Locos Light Travelling	GAP (%)	Tempo de Execução (s)	Qtd. Locomotivas alocadas para atender a demanda semanal				Qtd. média de locomotivas estacionadas em cada nó			Qtd. média utilizada de locomotivas virtuais estacionadas em cada nó
									DASH-8/9	DDM-45	B-36	Virtual	DASH-8/9	DDM-45	B-36	Virtual
A	1	159	69.412,82	1.410,00	81	6	0,0	15,44	204	53	25	68	2,6	2,5	0,6	4,1
	2	159	70.742,80	2.740,00	64	21	0,0	18,32	205	55	20	68	2,5	2,4	0,9	4,1
	3	159	69.392,79	1.390,00	79	6	0,0	701,76	212	40	27	68	2,5	2,7	0,6	4,1
	4	149	74.551,59	1.550,00	35	12	0,0	15,21	122	34	3	73	2,3	3,2	1,8	4,2
	5	149	74.551,59	1.550,00	35	12	0,0	15,48	122	34	3	73	2,3	3,2	1,8	4,2
	6	174	92.042,76	2.040,00	44	16	0,0	21,53	222	43	11	90	1,9	2,7	1,5	5,7
	7	174	92.042,76	2.040,00	44	16	0,0	20,58	225	43	8	90	1,7	2,9	1,5	5,7
B	8	156	74.792,60	1.790,00	19	16	0,0	14,01	207	42	11	73	2,3	4,0	1,7	4,2
	9	156	74.792,60	1.790,00	19	16	0,0	18,17	208	42	10	73	2,6	3,7	1,6	4,1
	10	156	74.792,60	1.790,00	19	16	0,0	13,81	207	42	11	73	2,3	4,0	1,7	4,2
	11	148	75.492,40	1.490,00	9	14	0,0	16,33	188	42	10	74	3,2	3,8	1,6	4,3
	12	148	75.492,40	1.490,00	9	14	0,0	15,73	188	42	10	74	3,2	3,8	1,6	4,3
	13	174	82.812,85	1.810,00	21	16	0,0	23,65	233	42	10	81	1,5	3,8	1,6	5,7
	14	174	82.812,85	1.810,00	21	16	0,0	15,6	233	42	10	81	1,6	3,7	1,6	4,9
C	15	156	77.992,55	1.990,00	29	17	0,0	17,99	221	23	11	76	3,4	5,2	1,8	2,7
	16	156	77.992,55	1.990,00	29	17	0,0	17,13	222	22	11	76	3,6	5,0	1,8	2,5
	17	156	77.992,55	1.990,00	29	17	0,0	18,41	222	22	11	76	3,4	5,2	1,8	2,5
	18	148	77.682,35	1.680,00	18	15	0,0	14,73	205	19	11	76	4,2	5,2	1,8	3,1
	19	148	77.682,35	1.680,00	18	15	0,0	16,61	205	20	10	76	4,2	5,1	1,8	3,1
	20	174	85.992,80	1.990,00	29	17	0,0	20,45	247	22	11	84	2,5	5,2	1,9	1,6
	21	174	85.992,80	1.990,00	29	17	0,0	19,23	247	22	11	84	2,5	5,2	1,8	1,7
D	22	156	60.622,72	1.620,00	12	15	0,0	18,78	237	23	12	59	2,7	2,5	2,2	3,0
	23	156	60.622,72	1.620,00	12	15	0,0	16,02	239	27	6	59	2,5	2,2	2,7	3,3
	24	156	60.622,72	1.620,00	12	15	0,0	20,39	237	29	6	59	2,5	2,2	2,7	3,4
	25	148	58.482,55	1.480,00	8	14	0,0	14,18	228	21	6	57	3,1	2,3	2,7	4,1
	26	148	58.482,55	1.480,00	8	14	0,0	14,76	228	14	13	57	3,1	2,7	2,1	3,3
	27	174	68.642,97	1.640,00	14	15	0,0	21,86	262	19	16	67	1,6	2,8	2,0	3,3
	28	174	68.642,97	1.640,00	14	15	0,0	22,56	262	19	16	67	1,7	2,8	2,0	4,1
E	29	159	3,61	0,00	0	0	0,0	7,54	208	116	37	0	0,5	1,3	0,2	0,0
	30	159	3,53	0,00	0	0	0,0	7,71	205	115	33	0	0,5	1,1	0,5	0,0
	31	159	3,42	0,00	0	0	0,0	9,03	222	78	42	0	2,5	2,5	0,2	0,0
	32	156	3,40	0,00	0	0	0,0	8,53	233	60	47	0	2,8	1,5	0,6	0,0

Fonte: Autor (2015)

5.1.1 Análise dos custos de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*

Considerando os resultados obtidos do grupo de análise A, o Gráfico 1 analisou dados da última semana de maio de 2015, mostrando o quantitativo de locomotivas em trens *Deadheading* e *Light Traveling* utilizadas pelo modelo matemático proposto e o custo total destas locomotivas, conforme as duas primeiras parcelas da função objetivo apresentada no Capítulo 4, visto que o custo assumido no modelo matemático de locomotivas acopladas a trens *Light Traveling* foi considerada dez vezes maior do que em *Deadheading*, respeitando a confidencialidade da informação, utilizando apenas uma relação entre os custos.

Gráfico 1 – Quantidade de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling* x Custo Total – Grupo de Análise A



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 02, de 6 na Instância 01 para 4 na Instância 2, gera um aumento significativo no custo total de locomotivas acopladas em trens

Deadheading e *Light Traveling* de 94,3%, mostrada no Gráfico 1, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 21% e um aumento de 250% de locomotivas *Light Traveling*.

A Instância 03 quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que o aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 01 para 8 na Instância 03, gera uma pequena redução no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling* de 1,4%, mostrada no Gráfico 1, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 2,5% e não se alterou o quantitativo de locomotivas *Light Traveling*.

A Instância 04 foi gerada a partir da Instância 01 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível um aumento de 9,9% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 1, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 56,8% e um aumento de 100% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*, fazendo com que os custos sejam elevados. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 159 na Instância 01 para 149 na Instância 04, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda, mas apesar da menor quantidade de locomotivas no total, o quantitativo de locomotivas *Light Traveling* alavancou o custo, devido ao seu maior peso na ponderação.

A Instância 05 foi gerada a partir da Instância 01 com incremento de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 01 para 8 na Instância 05, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível um aumento de 9,9% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 1, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 56,8% e um aumento de 100% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*, fazendo com que os custos sejam elevados. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve

uma redução do número de trens durante a semana, 159 na Instância 01 para 149 na Instância 05, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda, mas apesar da menor quantidade de locomotivas no total, o quantitativo de locomotivas *Light Traveling* alavancou o custo, devido ao seu maior peso na ponderação.

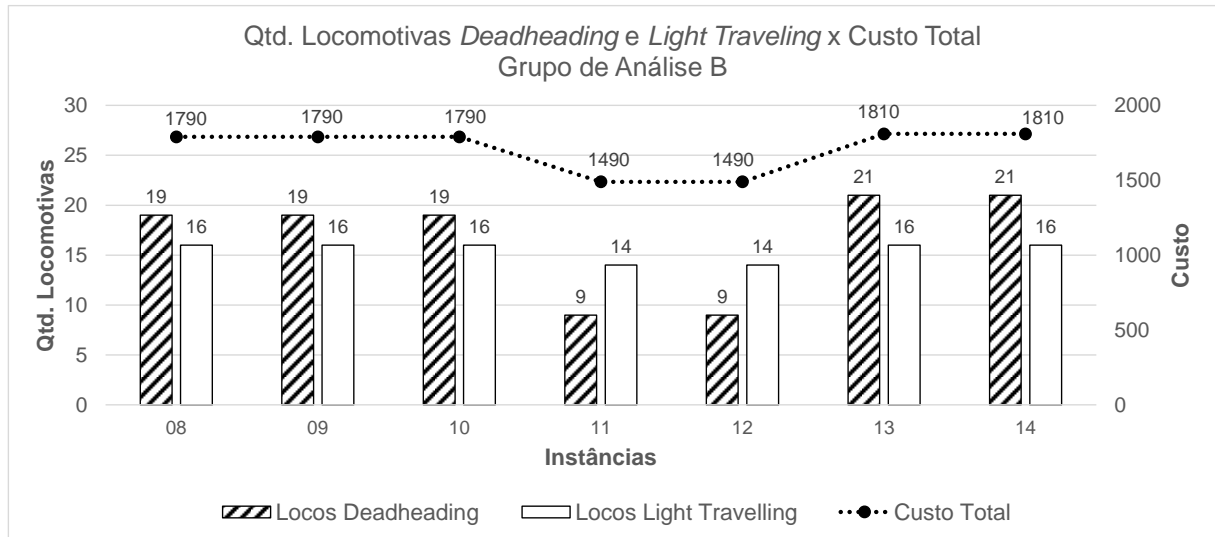
A Instância 06 foi gerada a partir da Instância 01 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 159 na Instância 01 para 174 na Instância 06, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível um aumento de 44,7% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 1, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 45,7% e um aumento expressivo de 166,7% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*, penalizando a instância fazendo com que os custos sejam elevados.

A Instância 07 foi gerada a partir da Instância 01 com uma redução de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 01 para 8 na Instância 07, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 159 na Instância 01 para 174 na Instância 07, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível um aumento de 44,7% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 1, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 45,7% e um aumento expressivo de 166,7% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*, penalizando a instância fazendo com que os custos sejam elevados.

Considerando os resultados obtidos do grupo de análise B, o Gráfico 2 analisou dados da primeira semana de junho de 2015, mostrando o quantitativo de locomotivas em trens *Deadheading* e *Light Traveling* utilizadas pelo modelo matemático proposto e o custo total destas locomotivas, conforme as duas primeiras parcelas da função objetivo visto no Capítulo 4, visto que o custo assumido no modelo matemático de locomotivas acopladas a trens *Light Traveling* foi considerada

dez vezes maior do que em *Deadheading*, respeitando a confidencialidade da informação, utilizando apenas uma relação entre os custos.

Gráfico 2 – Quantidade de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling* x Custo Total – Grupo de Análise B



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 09, de 6 na Instância 08 para 4 na Instância 09, não tem impacto no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 2, linha tracejada, e também permanece o mesmo quantitativo de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*.

A Instância 10 quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que o aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 08 para 8 na Instância 10, não tem impacto no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 2, linha tracejada, e é mantido o mesmo quantitativo de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*.

A Instância 11 foi gerada a partir da Instância 08 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível uma redução de 16,8% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 2, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 52,6% e uma redução de 12,5% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 08 para 148 na Instância 11, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 12 foi gerada a partir da Instância 08 com incremento de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 08 para 8 na Instância 12, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível uma redução de 16,8% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 2, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 52,6% e uma redução de 12,5% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 08 para 148 na Instância 12, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

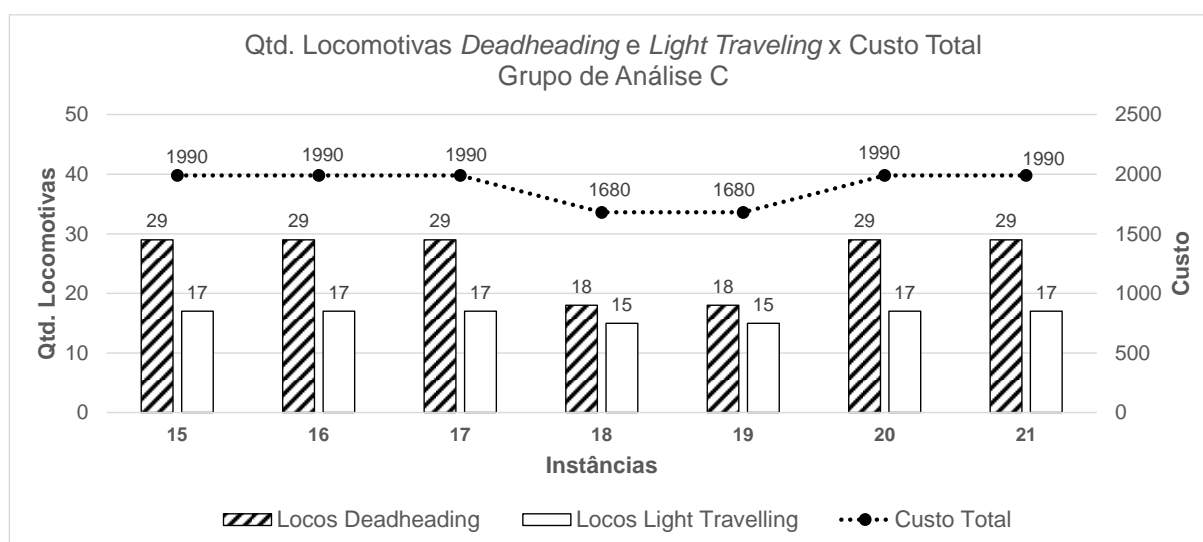
A Instância 13 foi gerada a partir da Instância 08 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 08 para 174 na Instância 13, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se um pequeno aumento de 1,1% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 2, linha tracejada, e um aumento no quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 10,5% e não houve alteração no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*.

A Instância 14 foi gerada a partir da Instância 01 com uma redução de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na

Instância 08 para 8 na Instância 14, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 08 para 174 na Instância 14, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se um pequeno aumento de 1,1% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 2, linha tracejada, e um aumento no quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 10,5% e não houve alteração no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*.

Considerando os resultados obtidos do grupo de análise C, o Gráfico 3 analisou dados da segunda semana de junho de 2015, mostrando o quantitativo de locomotivas em trens *Deadheading* e *Light Traveling* utilizadas pelo modelo matemático proposto e o custo total destas locomotivas, conforme as duas primeiras parcelas da função objetivo visto no Capítulo 4, visto que o custo assumido no modelo matemático de locomotivas acopladas a trens *Light Traveling* foi considerada dez vezes maior do que em *Deadheading*, respeitando a confidencialidade da informação, utilizando apenas uma relação entre os custos.

Gráfico 3 – Quantidade de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling* x Custo Total – Grupo de Análise C



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 16, de 6 na Instância 15 para 4 na Instância 16, não tem impacto no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 3, linha tracejada, e também permanece o mesmo quantitativo de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*.

A Instância 17 quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que o aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 15 para 8 na Instância 17, não tem impacto no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 3, linha tracejada, e é mantido o mesmo quantitativo de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*.

A Instância 18 foi gerada a partir da Instância 15 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível uma redução de 15,6% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 3, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 37,9% e uma redução de 11,8% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 15 para 148 na Instância 18, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 19 foi gerada a partir da Instância 15 com incremento de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 15 para 8 na Instância 19, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível uma redução de 15,6% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 3, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 37,9% e uma redução de 11,8% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a

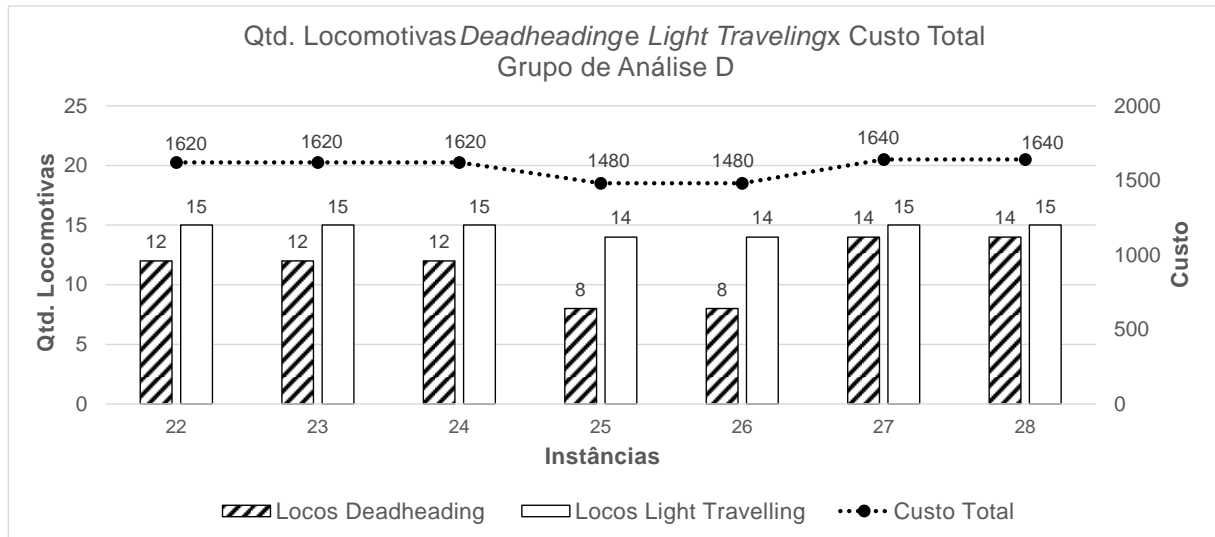
semana, 156 na Instância 15 para 148 na Instância 19, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 20 foi gerada a partir da Instância 15 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 15 para 174 na Instância 20, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que não houve alteração no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 3, linha tracejada, e permaneceu sem variação tanto o quantitativo de locomotivas *Deadheading* e quanto *Light Traveling*.

A Instância 21 foi gerada a partir da Instância 15 com uma redução de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 15 para 8 na Instância 21, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 15 para 174 na Instância 21, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que não houve alteração no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 3, linha tracejada, e permaneceu sem variação tanto o quantitativo de locomotivas *Deadheading* e quanto *Light Traveling*.

Considerando os resultados obtidos do grupo de análise D, o Gráfico 4 analisou dados da terceira semana de junho de 2015, mostrando o quantitativo de locomotivas em trens *Deadheading* e *Light Traveling* utilizadas pelo modelo matemático proposto e o custo total destas locomotivas, conforme as duas primeiras parcelas da função objetivo visto no capítulo 4, visto que o custo assumido no modelo matemático de locomotivas acopladas a trens *Light Traveling* foi considerada dez vezes maior do que em *Deadheading*, respeitando a confidencialidade da informação, utilizando apenas uma relação entre os custos.

Gráfico 4 - Quantidade de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling* x Custo Total – Grupo de Análise D



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 23, de 6 na Instância 22 para 4 na Instância 23, não tem impacto no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 4, linha tracejada, e também permanece o mesmo quantitativo de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*.

A Instância 24 quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que o aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 22 para 8 na Instância 24, não tem impacto no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 4, linha tracejada, e é mantido o mesmo quantitativo de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*.

A Instância 25 foi gerada a partir da Instância 22 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível uma redução de 8,6% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 4, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas

Deadheading de 33,3% e uma redução de 8,6% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 22 para 148 na Instância 25, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 26 foi gerada a partir da Instância 22 com incremento de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 22 para 8 na Instância 26, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, é visível uma redução de 8,6% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 4, linha tracejada, e uma redução do quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 33,3% e uma redução de 8,6% no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 22 para 148 na Instância 26, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 27 foi gerada a partir da Instância 22 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 22 para 174 na Instância 27, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se um pequeno aumento de 1,2% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*, mostrada no Gráfico 4, linha tracejada, e um aumento no quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 16,7% e não houve alteração no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*.

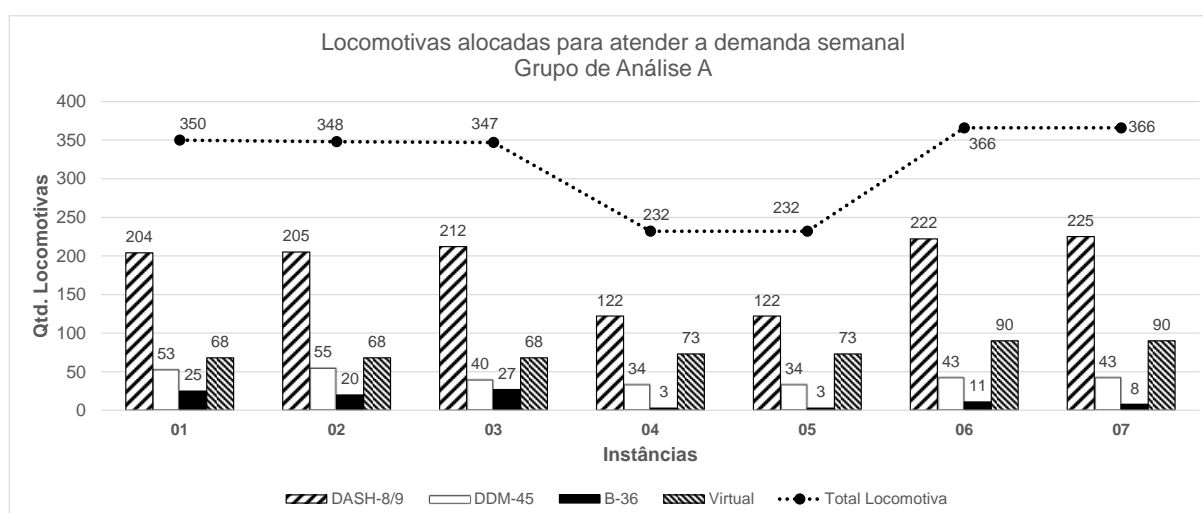
A Instância 28 foi gerada a partir da Instância 22 com uma redução de 10% no *transit time* e um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 22 para 8 na Instância 28, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 22 para 174 na Instância 28, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se um pequeno aumento de 1,2% no custo total de locomotivas acopladas em trens *Deadheading* e *Light Traveling*,

mostrada no Gráfico 4, linha tracejada, e um aumento no quantitativo de locomotivas *Deadheading* de 16,7% e não houve alteração no quantitativo de locomotivas *Light Traveling*.

5.1.2 Análise das locomotivas alocadas para atender a demanda semanal

Considerando os resultados obtidos do grupo de análise A, o Gráfico 5 analisou dados da última semana de maio de 2015, e fica evidenciado que o quantitativo de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal nos respectivos nós do vetor espaço-tempo não atende na totalidade, sendo necessário o uso de locomotivas virtuais para evitar desbalanceamentos entre oferta e demanda.

Gráfico 5 – Quantidade de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal - Grupo de Análise A



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 02, de 6 na Instância 01 para 4 na Instância 02,

gera uma alteração de menos de 1% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 5, linha tracejada. Logo, tal diminuição gera pouco impacto no total de locomotivas utilizadas para atender a demanda. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas. No entanto, houve diferenças na quantidade por tipo de locomotivas alocadas.

Quando comparado com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a variação do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 03, de 6 na Instância 01 para 8 na Instância 03, gera uma alteração de menos de 1% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostradas no Gráfico 5, linha tracejada. Logo, tal diminuição gera pouco impacto no total de locomotivas utilizadas para atender a demanda. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas. No entanto, houve diferenças na quantidade por tipo de locomotivas alocadas.

A Instância 04 foi gerada a partir da Instância 01 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se uma redução por volta de 50% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 5. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 159 na Instância 01 para 149 na Instância 04, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

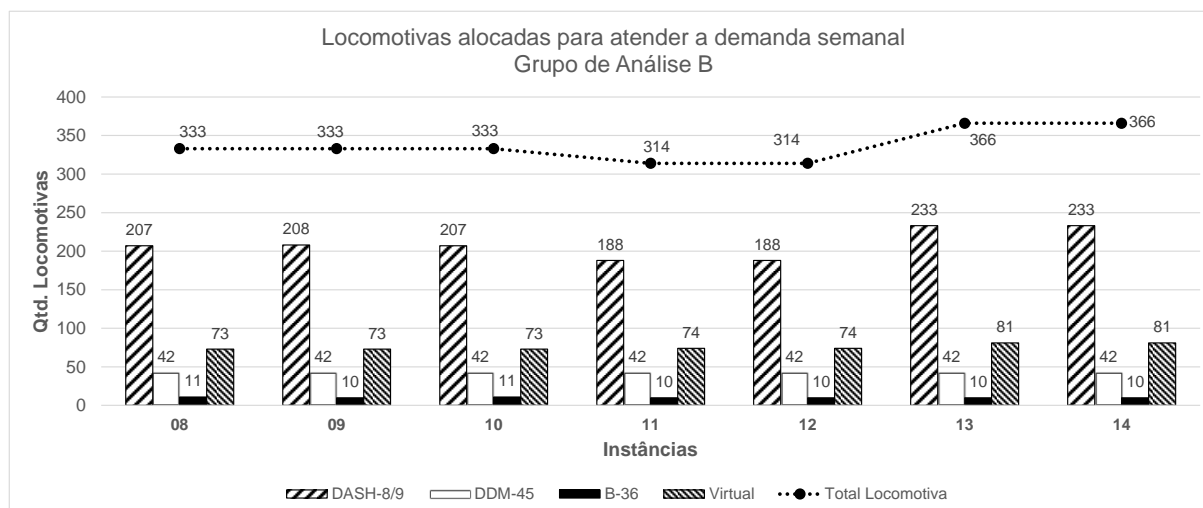
A Instância 05 foi gerada a partir da Instância 01 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 01 para 8 na Instância 05, logo é visualizada uma redução por volta de 50% no número total de locomotivas desta instância, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 5. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 159 na Instância 01 para 149 na Instância 05, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 06 foi gerada a partir da Instância 01 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 159 na Instância 01 para 174 na Instância 06, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há um aumento de 4,5% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um incremento significativo de 32% na alocação de locomotivas virtuais em relação a instância 01, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 5. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

A Instância 07 foi gerada a partir da Instância 01 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 159 na Instância 01 para 174 na Instância 07, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 01 para 8 na Instância 07, logo é evidenciado um aumento de 4,5% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um incremento significativo de 32% na alocação de locomotivas virtuais em relação a instância 01, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 5. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

Considerando os resultados obtidos do Grupo de Análise B, o Gráfico 6 analisou dados da primeira semana de junho de 2015, e fica evidenciado que o quantitativo de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal nos respectivos nós do vetor espaço-tempo não atende na totalidade, sendo necessário o uso de locomotivas virtuais para evitar desbalanceamentos entre oferta e demanda.

Gráfico 6 – Quantidade de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal - Grupo de Análise B



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 09, de 6 na Instância 08 para 4 na Instância 09, não gera impacto no quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 6, linha tracejada. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas. Percebe-se também um aumento do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 10, de 6 na Instância 08 para 8 na Instância 10, não gerando impacto no quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 6, linha tracejada. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas.

A Instância 11 foi gerada a partir da Instância 08 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se uma redução por volta de 6% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância quando comparado com a Instância 08, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 6. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 08 para

148 na Instância 11, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 12 foi gerada a partir da Instância 08 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 08 para 8 na Instância 12, logo é visualizada uma redução por volta de 6% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância quando comparado com a Instância 08, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 6. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 08 para 148 na Instância 12, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

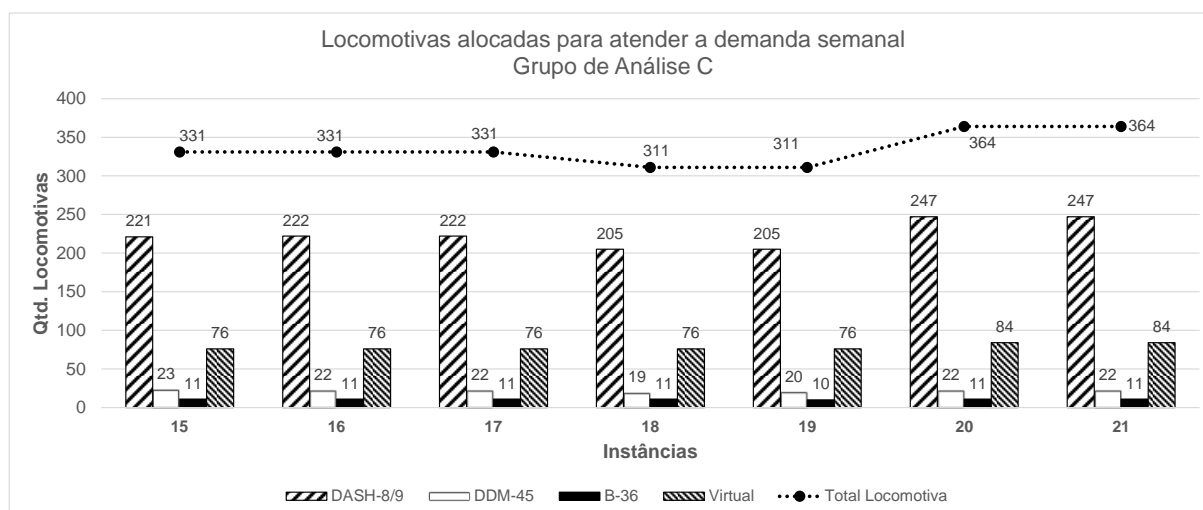
A Instância 13 foi gerada a partir da Instância 08 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 08 para 174 na Instância 13, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há um aumento de 9,9% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um aumento de 10,9% na alocação de locomotivas virtuais em relação à Instância 08, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 6. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

A Instância 14 foi gerada a partir da Instância 08 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 08 para 174 na Instância 14, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 08 para 8 na Instância 14, logo é evidenciado um aumento de 9,9% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um incremento significativo de 10,9% na alocação de locomotivas virtuais em relação a Instância 08, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 6. O aumento do

número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

Considerando os resultados obtidos do Grupo de Análise C, o Gráfico 7 analisou dados da segunda semana de junho de 2015, e fica evidenciado que o quantitativo de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal nos respectivos nós do vetor espaço-tempo não atende na totalidade, sendo necessário o uso de locomotivas virtuais para evitar desbalanceamentos entre oferta e demanda.

Gráfico 7 – Quantidade de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal - Grupo de Análise C



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 16, de 6 na Instância 15 para 4 na Instância 16, não gera impacto no quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 7, linha tracejada. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas.

Quando comparado com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 17, de 6 na Instância 15 para 8 na Instância 17, não gera impacto no quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 7, linha tracejada. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas.

A Instância 18 foi gerada a partir da Instância 15 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se uma redução por volta de 6,5% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância quando comparado com a Instância 15, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 7. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 15 para 148 na Instância 18, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 19 foi gerada a partir da Instância 15 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 15 para 8 na Instância 19, logo é visualizada uma redução por volta de 6,5% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância quando comparado com a Instância 15, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 7. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 15 para 148 na Instância 19, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

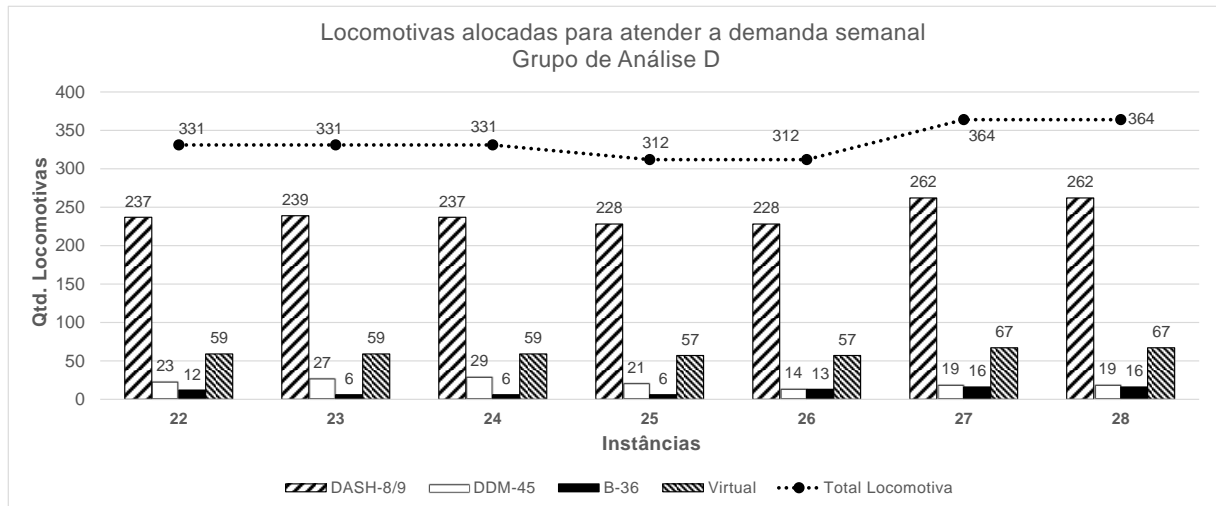
A Instância 20 foi gerada a partir da Instância 15 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 15 para 174 na Instância 20, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há um aumento de 10% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um aumento de 10,5% na alocação de locomotivas virtuais em relação à Instância 15, conforme mostrado na linha

tracejada do Gráfico 7. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

A Instância 21 foi gerada a partir da Instância 15 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 15 para 174 na Instância 21, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 15 para 8 na Instância 21, logo é evidenciado um aumento de 10% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um incremento significativo de 10,5% na alocação de locomotivas virtuais em relação a instância 15, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 7. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

Considerando os resultados obtidos do Grupo de Análise D, o Gráfico 8 analisou dados da terceira semana de junho de 2015, e fica evidenciado que o quantitativo de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal nos respectivos nós do vetor espaço-tempo não atende na totalidade, sendo necessário o uso de locomotivas virtuais para evitar desbalanceamentos entre oferta e demanda.

Gráfico 8 – Quantidade de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal - Grupo de Análise D



Fonte: Autor (2015)

Quando comparado com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 23, de 6 na Instância 22 para 4 na Instância 23, não gera impacto no quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 8, linha tracejada. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas.

Quando comparado com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que a diminuição do limite máximo de locomotivas em trem da Instância 24, de 6 na Instância 22 para 8 na Instância 24, não gera impacto no quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, mostrada no Gráfico 8, linha tracejada. Também não houve diferença no número de locomotivas virtuais alocadas.

A Instância 25 foi gerada a partir da Instância 22 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se uma redução por volta de 6% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância quando comparado com a Instância 22, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 8. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*,

houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 22 para 148 na Instância 25, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

A Instância 26 foi gerada a partir da Instância 22 com incremento de 10% no *transit time*, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 22 para 8 na Instância 26, logo é visualizada uma redução por volta de 6% no total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal desta instância quando comparado com a Instância 22, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 8. Isto se explica, provavelmente, porque quando houve um incremento no *transit time*, houve uma redução do número de trens durante a semana, 156 na Instância 22 para 148 na Instância 26, Tabela 9, e, portanto, houve menor necessidade de locomotivas para atender a demanda.

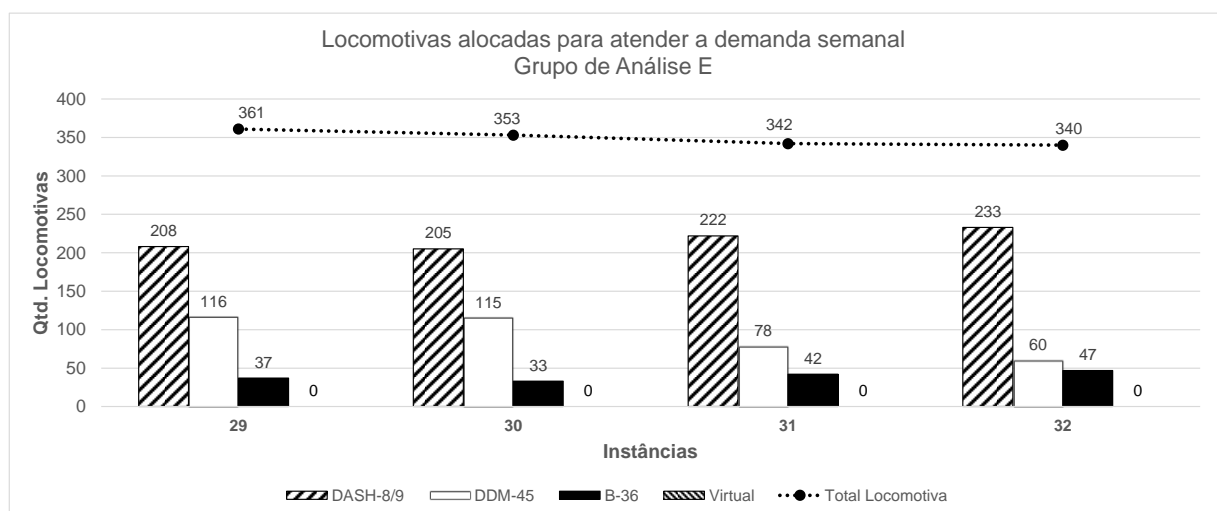
A Instância 27 foi gerada a partir da Instância 22 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 22 para 174 na Instância 27, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há um aumento de 10% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um aumento de 13,5% na alocação de locomotivas virtuais em relação à Instância 22, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 8. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

A Instância 28 foi gerada a partir da Instância 22 com uma redução de 10% no *transit time*, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais, 156 na Instância 22 para 174 na Instância 28, Tabela 9, e quando comparada com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 22 para 8 na Instância 28, logo é evidenciado um aumento de 10% em locomotivas alocadas para atender a demanda semanal, sendo que há um incremento significativo de 13,5% na alocação de locomotivas virtuais em relação a

Instância 22, conforme mostrado na linha tracejada do Gráfico 8. O aumento do número de trens semanais implica no aumento na demanda, sendo que a oferta de locomotivas não se alterou, logo o quarto tipo de locomotiva é bastante utilizado pelo modelo para suprir o desbalanceamento entre oferta e demanda causado pela redução do *transit time*.

Considerando os resultados obtidos do Grupo de Análise E, o Gráfico 9 analisou dados das três primeiras semanas de maio e a última semana de junho de 2015, que foram semanas em que o balanceamento entre oferta e demanda estavam equilibradas, com intuito do *solver* CPLEX evitar a utilização de locomotivas virtuais na função objetivo para suprir possíveis desbalanceamentos.

Gráfico 9 – Quantidade de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal – Grupo de Análise E



Fonte: Autor (2015)

Fica evidenciado que o quantitativo total de locomotivas alocadas para atender a demanda semanal nos respectivos nós do vetor espaço-tempo tem uma variação entre o máximo (Instância 29) e o mínimo (Instância 32) das instâncias analisadas de aproximadamente 6%.

Em todas as instâncias o tipo de locomotiva DASH-8/9 é a mais utilizada, pois é a de maior potência e o modelo matemático procura utilizá-la para otimizar o quantitativo

de locomotivas associadas a trens, e a Instância 32 foi a que mais utilizou este tipo de locomotiva, chegando a 68,5% de locomotivas DASH-8/9 em relação ao total.

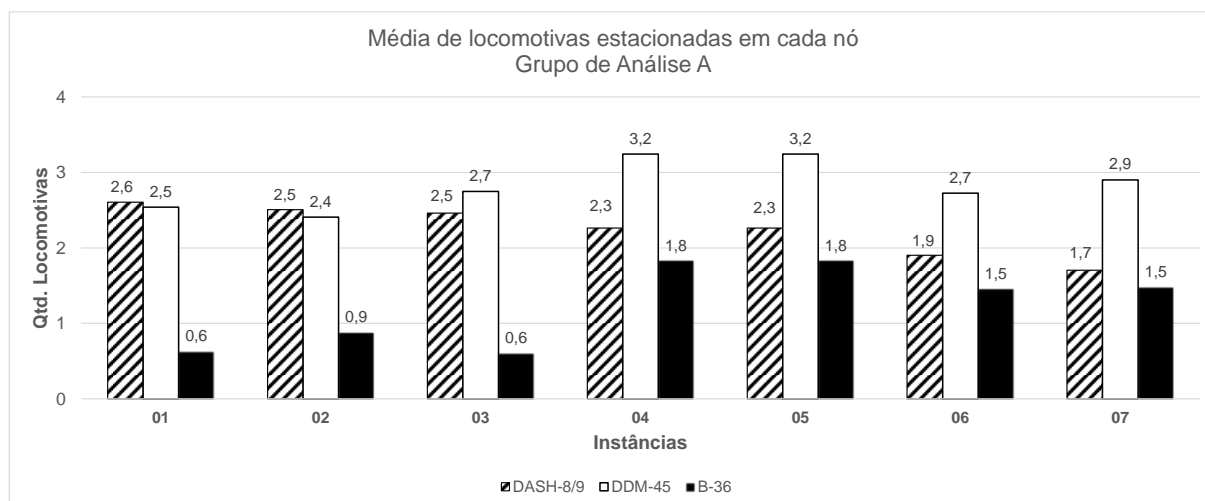
A locomotiva do tipo DDM-45 é a segunda mais utilizada em números absolutos e a Instância 29 é a que apresenta o maior número de locomotivas com 116 unidades, e em números relativos a Instância 30 apresenta o maior número com 32,6% em relação ao total da instância.

A locomotiva do tipo B-36 é a terceira mais utilizada, sendo que em números absolutos a Instância 32 é a que apresenta o maior número de locomotivas com 47 unidades, e em números relativos também é a Instância 32 que apresenta o maior número com 13,8% em relação ao total da instância.

5.1.3 Análise da quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó

Os resultados obtidos no Grupo de Análise A são mostrados no Gráfico 10, e referem-se aos dados do quantitativo médio de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas em cada nó do vetor espaço-tempo da última semana de maio/2015. Pode-se perceber que as Instâncias 01, 02 e 03 não apresentaram variações significativas no número médio de locomotivas estacionadas, mesmo com variações no limite máximo de locomotivas por trem de 4 para Instância 02 e 8 para a Instância 03.

Gráfico 10 – Quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó - Grupo de Análise A



Fonte: Autor (2015)

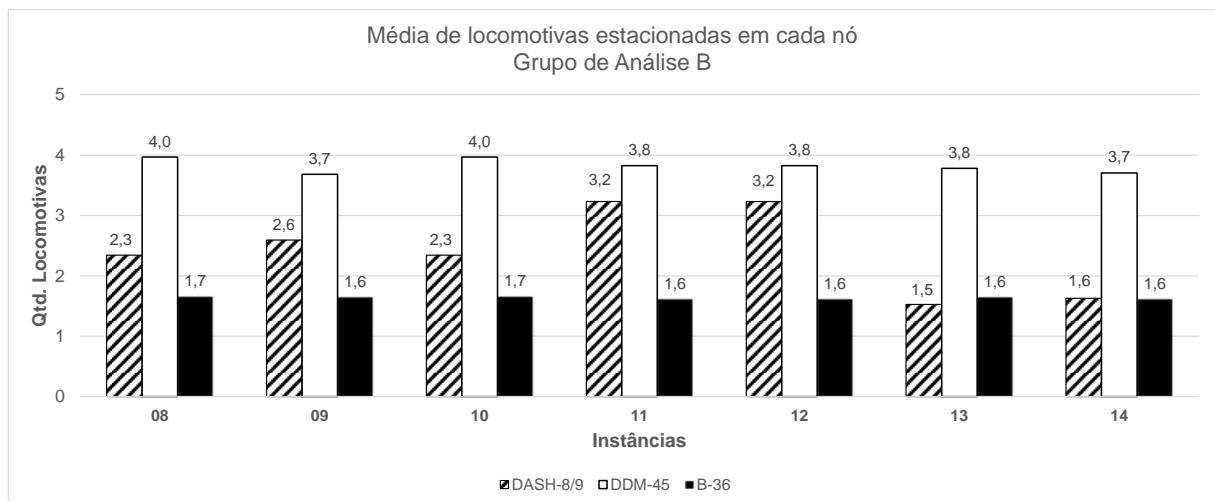
As Instâncias 04 e 05 se diferenciam das demais devido ao incremento de 10% no *transit time* em relação à Instância 01, gerando uma redução de trens no horizonte de tempo estabelecido e consequentemente um aumento de 27% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas quando comparado com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, mas é visível que o modelo tende a alocar em trens locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, reduzindo o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em 13,1% e aumentando o número de locomotivas estacionadas do tipo DDM-45 e B-36 em relação à instância 01, com 27,7% e 191% de aumento respectivamente. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 04 para 8 na Instância 05, mas não interferiu no resultado.

As Instâncias 06 e 07 tem uma redução de 10% no *transit time* em relação à Instância 01, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais e comparado com a Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há um aumento de 5,3% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas, mas é visível que o modelo tende a alocar em trens locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, reduzindo o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em 27% da Instância 06 em relação à Instância 01 e 34,6% da instância 07 em relação a mesma instância, aumentando o número de locomotivas estacionadas do tipo DDM-45 e B-

36 da Instância 07 em relação à Instância 01, com 14,3% e 135% de aumento respectivamente e na Instância 06 em relação à 01, com 7,4% e 131% de aumento respectivamente. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 06 para 8 na Instância 07, mas não interferiu no resultado.

Os resultados obtidos no Grupo de Análise B mostrados no Gráfico 11, analisou dados da primeira semana de junho/2015 no que tange ao quantitativo médio de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas em cada nó do vetor espaço-tempo, mostra que as Instâncias 08, 09 e 10 não apresentam variações significativas no número médio total de locomotivas estacionadas, mesmo com variações no limite máximo de locomotivas por trem de 4 para Instância 09 e 8 para a Instância 10.

Gráfico 11 – Quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó - Grupo de Análise B



Fonte: Autor (2015)

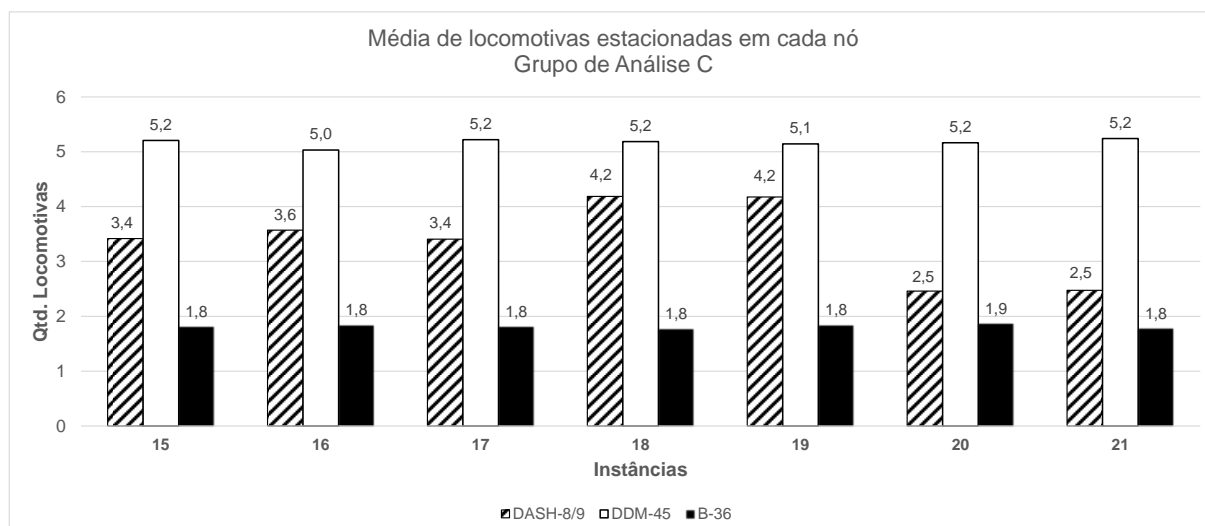
As Instâncias 11 e 12 se diferenciam das demais devido ao incremento de 10% no *transit time* em relação à Instância 08, gerando uma redução de trens no horizonte de tempo estabelecido e consequentemente um aumento de 8,8% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas quando comparado com a Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, mas o modelo alocou em trens menos locomotivas de maior potência que é o caso da

DASH-8/9, aumentando o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em 38% em relação a Instância 08. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 11 para 8 na Instância 12, mas esse aumento não altera o resultado.

As Instâncias 13 e 14 tem uma redução de 10% no *transit time* em relação à Instância 08, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais e comparado com a instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há uma redução de 12,8% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas, mas é visível que o modelo tende a alocar em trens locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, reduzindo o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em 34,7% da Instância 13 em relação à instância 08 e 30,5% da Instância 14 em relação a mesma instância, reduzindo o número de locomotivas estacionadas do tipo DDM-45 e B-36 da Instância 14 em relação à Instância 08, com 6,6% e 2,6% de redução respectivamente e na Instância 13 em relação à 08, com 4,7% e 0,7% de redução respectivamente. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 13 para 8 na Instância 14, mas esse aumento não altera o resultado.

Os resultados obtidos no Grupo de Análise C mostrados no Gráfico 12, analisou dados da segunda semana de junho/2015 no que tange ao quantitativo médio de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas em cada nó do vetor espaço-tempo, mostra que as Instâncias 15, 16 e 17 não apresentam variações no número médio total de locomotivas estacionadas, mesmo com variações no limite máximo de locomotivas por trem de 4 para Instância 16 e 8 para a Instância 17.

Gráfico 12 – Quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó - Grupo de Análise C



Fonte: Autor (2015)

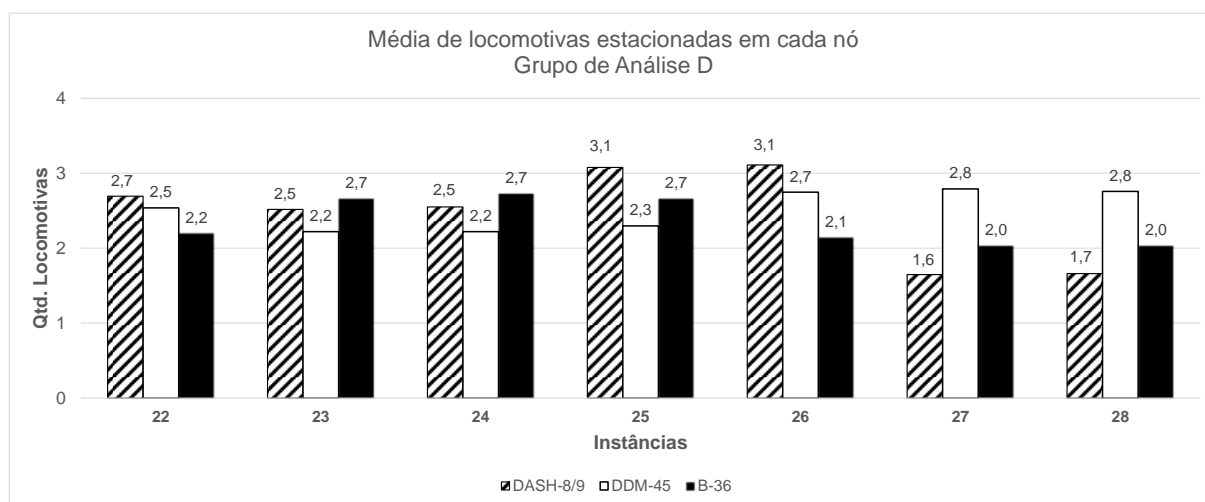
As Instâncias 18 e 19 se diferenciam das demais devido ao incremento de 10% no *transit time* em relação à Instância 15, gerando uma redução de trens no horizonte de tempo estabelecido e consequentemente um aumento de 6,7% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas quando comparado com a Instância 15 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, mas o modelo alocou em trens menos locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, aumentando o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em 22,5% em relação a Instância 15. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 18 para 8 na Instância 19, mas esse aumento não altera o resultado.

As Instâncias 20 e 21 têm uma redução de 10% no *transit time* em relação à Instância 15, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais e comparado com a Instância 15 que está sendo utilizada como Instância padrão de comparação, há uma redução de 9,1% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas, mas é visível que o modelo tende a alocar em trens locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, reduzindo o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em 27,7% das Instâncias 20 e 21 em relação à Instância 15 e mantendo o mesmo número de locomotivas estacionadas do tipo DDM-45 e B-36 das instâncias 20 e 21 em relação

à Instância 15. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 20 para 8 na Instância 21, mas esse aumento não altera o resultado.

Os resultados obtidos no Grupo de Análise D mostrados no Gráfico 13, analisou dados da terceira semana de junho/2015 no que tange ao quantitativo médio de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas em cada nó do vetor espaço-tempo, mostra que as Instâncias 22, 23 e 24 não apresentam variações significativas no número médio total de locomotivas estacionadas, mesmo com variações no limite máximo de locomotivas por trem de 4 para Instância 23 e 8 para a Instância 24.

Gráfico 13 – Quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó - Grupo de Análise D



Fonte: Autor (2015)

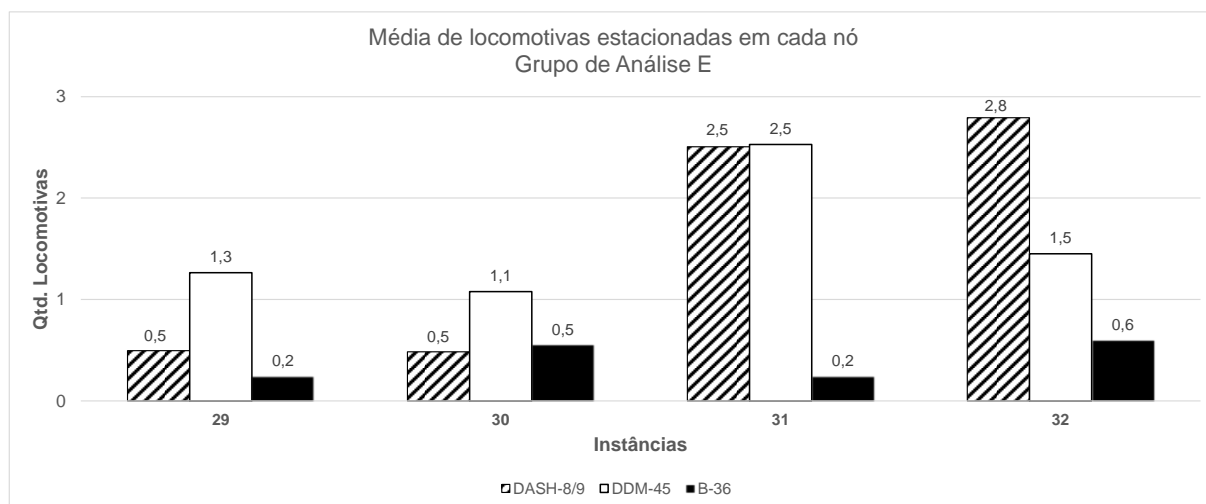
As Instâncias 25 e 26 se diferenciam das demais devido ao incremento 10% no *transit time* em relação à Instância 22, gerando uma redução de trens no horizonte de tempo estabelecido e consequentemente um aumento de 8,1% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas quando comparado com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, mas o modelo alocou em trens menos locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, aumentando o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em

14,3% em relação a Instância 22. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 25 para 8 na Instância 26, mas esse aumento não altera o resultado.

As Instâncias 27 e 28 têm uma redução de 10% no *transit time* em relação à Instância 22, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais e comparado com a Instância 22 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, há uma redução de 13,2% no total de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas, mas é visível que o modelo tende a alocar em trens locomotivas de maior potência que é o caso da DASH-8/9, reduzindo o quantitativo de locomotivas estacionadas deste tipo em torno de 38% das Instâncias 27 e 28 em relação à Instância 22, aumentando em 8,7% o número de locomotivas estacionadas do tipo DDM-45 das Instâncias 27 e 28 em relação à Instância 22 e reduzindo em 7,5% o número de locomotivas estacionadas do tipo B-36 das Instâncias 27 e 28 em relação à Instância 22. Percebe-se que há um aumento do limite máximo de locomotivas em trem de 6 na Instância 27 para 8 na Instância 28, mas esse aumento não altera o resultado.

Os resultados obtidos no Grupo de Análise E mostrados no Gráfico 14 analisaram dados das três primeiras semanas de maio e a última semana de junho de 2015 no que tange ao quantitativo médio de locomotivas estacionadas e prontas para serem utilizadas em cada nó do vetor espaço-tempo.

Gráfico 14 - Quantidade média de locomotivas estacionadas em cada nó - Grupo de Análise E



Fonte: Autor (2015)

A Instância 31 é a que apresenta a maior média quando são considerados os três tipos de locomotivas juntos, pois esta instância manteve um número médio equilibrado entre os tipos de locomotivas DASH-8/9 e B-36 estacionadas em cada nó.

A Instância 32 apresenta a locomotiva do tipo DASH-8/9 como a de maior número absoluto de locomotivas com uma média de 2,8 unidades e a de maior valor relativo também é a Instância 32 com 57,7% em relação ao total da instância.

A Instância 32 apresenta a locomotiva do tipo DASH-8/9 como a de maior número absoluto de locomotivas entre as instâncias do grupo de análise E, com uma média de 2,8 unidades e a de maior valor relativo também é a Instância 32 com 57,7% em relação ao total da instância.

A Instância 31 apresenta a locomotiva do tipo DDM-45 como a de maior número absoluto de locomotivas entre as instâncias do grupo de análise E, com uma média de 2,5 unidades e a de maior valor relativo é a Instância 29 com 63,2% em relação ao total da instância.

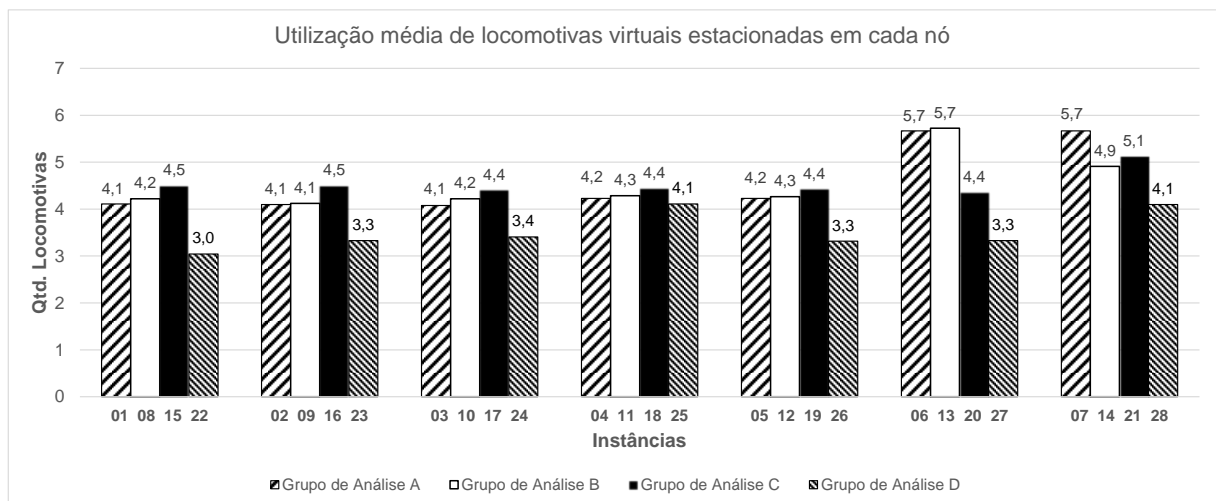
A Instância 32 apresenta a locomotiva do tipo B-36 como a de maior número absoluto de locomotivas entre as instâncias do grupo de análise E, com uma média

de 0,6 unidades e a de maior valor relativo é a Instância 30 com 26% em relação ao total da instância.

5.1.4 Análise da quantidade média utilizada de locomotivas virtuais estacionadas em cada nó

O Gráfico 15 mostra a quantidade média utilizada de locomotivas virtuais estacionadas em cada nó, ou seja, que estavam em estoque em um determinado nó e foram utilizadas pelo modelo dos Grupos de Análise A, B, C e D referenciados na Tabela 9.

Gráfico 15 – Quantidade média utilizada de locomotivas virtuais estacionadas em cada nó



Fonte: Autor (2015)

Percebe-se que no Grupo de Análise A o uso das locomotivas virtuais não tem variações significativas entre as Instâncias 01 e 05, mas nas Instâncias 06 e 07 têm uma redução de 10% no *transit time* em relação à Instância 01 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais e comparado com a Instância 01 há

um aumento de 38% na utilização média de locomotivas virtuais que estavam estacionadas.

No Grupo de Análise B a utilização das locomotivas virtuais não tem variações significativas entre as Instâncias 08 e 12, mas nas Instâncias 13 e 14 tem uma redução de 10% no *transit time* em relação à Instância 08 que está sendo utilizada como instância padrão de comparação, logo uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens semanais. Quando comparada a Instância 13 com a Instância 08, verifica-se um aumento de 35,7% na utilização média de locomotivas virtuais que estavam estacionadas e a Instância 14 comparada com a Instância 08 tem um aumento de 16,4% de utilização.

No Grupo de Análise C a utilização das locomotivas virtuais não tem variações significativas entre as Instâncias 15 e 20, mas a Instância 21 apresenta um aumento de 13,9% em relação à Instância 15 na utilização média de locomotivas virtuais que estavam estacionadas, devido a necessidade de uso de um número maior de locomotivas em função do aumento do quantitativo de trens que a redução no *transit time* provoca. A Instância 15 está sendo utilizada como instância padrão de comparação no Grupo de Análise C.

No Grupo de Análise D a utilização média das locomotivas virtuais estacionadas em cada nó não tem variações significativas nas Instâncias 22, 23, 24, 26 e 27, diferentemente das Instâncias 25 e 28 que tem um aumento de 35% no quantitativo de utilização de locomotivas virtuais estacionadas.

5.2 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Os Grupos de Análise construídos ao longo desta dissertação sinalizam que o modelo matemático proposto pode ser aplicado no dia a dia de um centro de controle operacional de ferrovia, pois o mesmo pode auxiliar o distribuidor de locomotivas nas tomadas de decisão, que é a pessoa responsável por realizar o balanceamento entre oferta e demanda de locomotivas ao longo dos pátios e

terminais de uma ferrovia, para possibilitar o transporte do volume proposto, levando em consideração todas as restrições relacionadas aos tipos de locomotivas em função da carga transportada.

O modelo matemático proposto pode trazer benefícios para o planejamento operacional de curto prazo, ou seja, auxiliar nas tomadas de decisão do planejamento da distribuição de locomotivas de diferentes tipos e em pátios distintos com intuito de equilibrar a oferta de locomotivas e a demanda necessária de locomotivas para suportar o volume proposto a ser transportado.

O artifício de considerar no modelo matemático um quarto tipo de locomotiva, que nesta dissertação está sendo referenciada como locomotiva virtual, possibilita o distribuidor de locomotivas do centro de controle operacional da ferrovia verificar possíveis desbalanceamentos entre oferta e demanda em um determinado pátio e em um certo horizonte de tempo, por meio da utilização das locomotivas virtuais pelo CPLEX e demais tipos de locomotivas estacionadas nos pátios/tempo, conseguindo se antecipar no planejamento da distribuição de recursos ferroviários e evitar uma possível falta de recurso ao longo da via e não atender a demanda dimensionada no plano de trens.

O modelo matemático proposto, procura resolver o desbalanceamento entre a oferta e a demanda de locomotivas em duas situações: quando a oferta de locomotivas é maior que a demanda em um determinado pátio e em um certo horizonte de tempo, ou seja, quando necessário é utilizada somente as locomotivas reais estacionadas nos pátios; e quando a oferta é menor que a demanda em um determinado pátio e em um certo horizonte de tempo, ou seja, é necessário a utilização de locomotivas virtuais para suprir possíveis desbalanceamentos.

O modelo matemático proposto também visa a minimização dos custos de distribuição de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*, atribuindo custos de tal forma que o CPLEX penalize essas locomotivas tentando evitar a formação de trens com locomotivas rebocadas e escoteiras, utilizando ao máximo o recurso disponível.

Analisando as instâncias criadas, a variação do limite máximo de locomotivas em trem em relação as instâncias chamadas de padrão para comparação, não gerou

grandes ganhos ou redução de custos, porém o incremento de 10% no *transit time* nas instâncias padrão, aumentou o intervalo entre trens, consequentemente reduzindo o número de trens na malha ferroviária, portanto, houve uma menor necessidade de locomotivas para atender a demanda. Quando criada as instâncias com redução de 10% no *transit time*, percebe-se que há uma redução no intervalo entre trens, aumentando o número de trens na malha ferroviária, logo houve uma maior necessidade de locomotivas para atender a demanda.

6 CONCLUSÕES

Foi proposto, nesta dissertação, um modelo matemático que tem por objetivo minimizar o custo de distribuição de locomotivas *Deadheading* e *Light Traveling*, atribuindo custos de tal forma que o CPLEX penalize essas locomotivas tentando evitar a formação de trens com locomotivas rebocadas e escoteiras, utilizando ao máximo o recurso disponível. O *solver* CPLEX conseguiu resolver otimamente todas as instâncias em um tempo de execução relativamente pequeno, até 701,76 segundos, ou 11,70 minutos.

Foi criado no modelo matemático proposto um quarto tipo de locomotiva, denominada de locomotiva virtual, que possibilita o distribuidor de locomotivas verificar possíveis desbalanceamentos entre oferta e demanda em um determinado pátio em um certo horizonte de tempo, conseguindo se antecipar no planejamento da distribuição de recursos ferroviários e tomar ações para evitar uma possível falta de locomotivas para atender à demanda dimensionada no plano de trens, conseguindo uma melhor gestão das locomotivas.

Isto ocorre quando a solução encontrada pelo CPLEX opta por escolher este tipo de locomotiva, mesmo com a penalização imposta à escolha delas. Com isso, o operador da ferrovia pode se antecipar e procurar cenários alternativos para evitar que demandas não sejam atendidas.

O modelo matemático proposto pode trazer benefícios para o planejamento operacional de curto prazo, ou seja, auxiliar nas tomadas de decisão do planejamento da distribuição de locomotivas de diferentes tipos e em pátios distintos com intuito de equilibrar a oferta de locomotivas e a demanda necessária de locomotivas para suportar o volume proposto a ser transportado refletido na formação de trens demandando locomotivas.

O modelo matemático proposto pode ser aplicado como ferramenta de gestão e planejamento da distribuição de locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens em qualquer ferrovia, tanto no Brasil, quanto no mundo.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que seja desenvolvida uma meta-heurística que busque solucionar instâncias com um tempo de resposta aderente à necessidade do distribuidor de recurso do centro de controle operacional da ferrovia, principalmente para ferrovias com um grande volume de circulação de trens.

Ressalta-se também que uma avaliação do lucro cessante baseada no não atendimento da demanda do volume de carga proposto em um determinado período de tempo, causada pelo desbalanceamento entre oferta e demanda de locomotivas, torna-se atraente como estudo complementar ao modelo proposto nesta dissertação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Acompanhamento das concessões ferroviárias: relatório anual**. ANTT, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Evolução do transporte ferroviário de cargas**. Brasília: ANTT, 2015.
- AHUJA, R. K.; LIU, J.; ORLIN, J. B.; SHARMA, D.; SHUGHART, L. A. Solving real-life locomotive-scheduling problems. **Transportation Science**. Vol. 39, Nº 4, November 2005, pp. 503-517.
- AHUJA, R. K.; SHUGHART L. A.; LIU, J. An Optimization-Based Approach for Locomotive Planning. **Innovative Scheduling**. August 2006.
- BACELAR, A. **Uma Abordagem de Otimização para a Maximização da Produtividade de Locomotivas em Ferrovias Brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Informática). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005, 120 p.
- BACELAR, A.; GARCIA, A.S. An optimization approach to the locomotive scheduling problem in brazilian railways. **Proceedings of the Conference on Railway Engineering 2006**, Melbourne Victoria, Australia, 2006.
- BOOLER, J. M. P. The solution of a railway locomotive scheduling problem. **Journal of the Operational Research Society**, p. 943-948, 1980.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte e economia: o sistema ferroviário brasileiro**. Brasília: CNT, 2013.
- CORDEAU, J. F.; TOTH, P.; VIGO, D. A survey of optimization models for train routing and scheduling. **Transportation Science**. Vol. 32, Nº 4, November 1998, pp. 380-404.
- FLORIAN, M; BUSHELL, G.; FERLAND, J.; GUERIN, G.; NASTANSKY, L. The Engine Scheduling Problem in a Railway Network, **INFOR** (14), p. 121-138, 1976.
- FORBES, M. A.; HOLT, J. N.; WATTS, A. M. Exact Solution of Locomotive Scheduling Problems. **Operational Research Society**. Vol. 42, Nº 10, 1991, pp. 825-831.
- GOHRING, K.W.; MCBRAYER, R.N.; MCGAUGHEY, R.S. Planning Locomotive and Caboose Distribution. **Rail International**, 3:p.151-158, 1973.
- HIDAYAT, R. **Optimising locomotive requirements for a pre-planned train schedule**. Tese de Doutorado. Lincoln University. 2005
- HOLT, J.N. Locomotive scheduling by computer bashpeak. **Rail International** (4), p. 1053- 1058, 1973.

HU, H.; LI, K.; XU, X. A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving. **Journal of Modern Transportation**, v. 21, n. 1, p. 9-16, 2013.

KOCJAN, W. Heuristic methods for routing and scheduling. **SICS Research Report**, 2001.

MAPOSA, D.; SWENE, S. D. Locomotive Scheduling in Freight Transport at Mpopoma Train Station in Bulawayo for the Southern Region, Zimbabwe. **Internacional Journal of Economics and Management Sciences**. Vol. 1, Nº12, 2012, pp. 104-116.

NOORI, S.; GHANNADPOUR, S. F. Locomotive assignment problem with train precedence using genetic algorithm. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2012.

NOURBAKHS, S. M.; OUYANG, Y. Optimal fueling strategies for locomotive fleets in railroad networks. **Transportation Research Part B**. 44 (2010) 1104–1114.

PINTO, R. M. **Modelos e algoritmos para análise de congestionamento e determinação de paradas na logística ferroviária**. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio: Rio de Janeiro, 2007.

PIU, F. A Mixed Integer Programming Approach to the Locomotive Assignment Problem. **11th Swiss Transport Research Conference**, 2011.

PIU, F. **Optimal Allocation of Physical Assets in the Railway Sector**. Tese de Doutorado. Università Degli Studi di Brescia. 2013.

PIU, F.; SPERANZA, M. G. The locomotive assignment problem: a survey on optimization models. **International Transactions in Operational Research**, v. 21, n. 3, p. 327-352, 2014.

POWELL, W. B.; Bouzaiane-Ayari, B.; Cheng, C.; Fiorillo, R.; Das, S.; Lawrence, C. Strategic, tactical and real-time planning of locomotives at Norfolk Southern using approximate dynamic programming. **2012 Joint Rail Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2012. p. 491-500.

ROUILLON, S.; DESAULNIERS, G.; SOUMIS, F. An extended branch-and-bound method for locomotive assignment. **Transportation Research Part B**. 40 (2006) 404–423.

SABINO, J. A. **Otimização com colônia de formigas aplicada à programação de operações de locomotivas de manobras**. Tese de Doutorado. PUC-Rio: Rio de Janeiro, 2008.

TAZONIERO, A. **Estratégias de decisão para o planejamento de circulação de trens em tempo real**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas: Campinas, São Paulo, 2007.

TEIXEIRA, R. B. **Modelo integrado para seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). Universidade de São Paulo: São Paulo, 2011, 136 p.

VAIDYANATHAN, B. **Next generation algorithms for railroad crew and locomotive scheduling**. Tese de Doutorado. University of Florida, 2007.

VAIDYNATHAN, B.; AHUJA, R. K.; LIU, J.; SHUGHART, L. A. Real-life locomotive planning: new formulations and computational results. **Transportation Research Part B**. 42 (2008) 147-168.

VAIDYNATHAN, B.; AHUJA, R. K.; ORLIN, J. B. The Locomotive Routing Problem. **Transportation Science**. Vol. 42, Nº 4, November 2008, pp. 492-507.

VALE. **Planejamento da circulação de trens da EFVM**. Anexo VI: tabela de tração. Vitória, 2014

VALE. **Plano de trens de carga geral da EFVM**. Vitória, 2015.

VERGARA, S.C. **Projeto e relatórios de pesquisa em administração**. 14. Ed. São Paulo: Atlas, 2013.

WRIGHT, M.B. Applying stochastic algorithms to a locomotive scheduling problem. **Operational Research Society**. (40), p. 187-192, 1989.

ZIARATI, K.; CHIZARI, H.; NEZHAD, A. M. Locomotive Optimization Using Artificial Intelligence Approach. **Iranian Journal of Science & Technology**. Vol. 29, Nº B1, February 2005, pp. 93-105.

ZIARATI, K.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. M.; GÉLINAS, S.; SAINTONGE, A. Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America. **European Journal of Operational Research**. 97 (1997) 281-292.

ZIARATI, K.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. M. A Branch-First, Cut-Second Approach for Locomotive Assignment. **Management Science**. Vol. 45, No. 8, August 1999 pp. 1156–1168.

APÊNDICE A

Código Visual Basic (VBA) para geração de trens na rede espaço-tempo

```

Type Trem
    numTrem As Integer
    matriz(1 To 91, 1 To 91) As Byte 'linha, coluna
End Type

Public g As Trem

Public estacao(1 To 13) As String

Sub atualizar()

    Dim orig As String, dest As String
    Dim linha As Long

    setEstacoes
    numImprime = 1
    contTrem = 0

    ActiveSheet.Range("I36:CZ1048576").Select
    With Selection.Interior
        .Pattern = xlNone
        .TintAndShade = 0
        .PatternTintAndShade = 0
    End With
    ActiveSheet.Range("I36:CZ1048576").ClearContents

    numaux = InputBox("Dígite a quantidade de trens", , 6)
    If IsNumeric(numaux) Then
        For i = 4 To 40

            orig = Plan3.Range("E" & i).Value
            dest = Plan3.Range("F" & i).Value

            For j = 15 To 84

                pontTrab = Plan3.Rows(i).Columns(j).Value
            
```

```

If pontTrab <> 0 Then

    fracDia = Plan3.Rows(3).Columns(j).Value
    partInteira = Int(fracDia)
    HT = partInteira + 1
    If fracDia = partInteira Then
        HT = HT - 1
    End If

    n1 = HT
    n2x = getEstacao(orig)
    n2y = getEstacao(dest)

    x = 1 + (n1 - 1) + (n2x - 1) * 7
    y = 1 + (n1 - 1) + (n2y - 1) * 7

    resetG

    contTrem = contTrem + 1
    g.numTrem = contTrem
    g.matriz(x, y) = numaux

    linha = 36 + (numImprime - 1) * 92

    setG linha
    numImprime = numImprime + 1

End If
Next j
Next i

ActiveSheet.Range("J" & linha + 93) = "];"

MsgBox "Execução concluída."
End If

End Sub

Private Function resetG()

```

```

g.numTrem = 0
For i = 1 To 91
    For j = 1 To 91
        g.matriz(i, j) = 0
    Next j
Next i

End Function

Private Function setG(linha As Long)

    Dim i As Long, j As Byte

    ActiveSheet.Range("I" & linha).Value = "g=" & g.numTrem
    ActiveSheet.Range("J" & linha).Value = "["

    For i = linha To linha + 90
        ActiveSheet.Rows(i).Columns(11).Value = "["
        For j = 12 To 102
            ActiveSheet.Rows(i).Columns(j).Value = g.matriz(i - linha + 1, j - 11)
            If g.matriz(i - linha + 1, j - 11) <> 0 Then
                ActiveSheet.Rows(i).Columns(j).Interior.Color = 65535
            End If
        Next j
        ActiveSheet.Rows(i).Columns(103).Value = "],"
        ActiveSheet.Rows(i).Columns(104).Value = i - linha + 1
    Next i

    ActiveSheet.Range("J" & i).Value = "]"
    ActiveSheet.Range("CZ" & i).Value = "Fim do g=" & g.numTrem

End Function

Private Function setEstacoes()

    estacao(1) = "VTU"
    estacao(2) = "VPA"
    estacao(3) = "VAZ"
    estacao(4) = "VJC"

```

```
estacao(5) = "VIC"  
estacao(6) = "VMR"  
estacao(7) = "VDD"  
estacao(8) = "VJP"  
estacao(9) = "VJM"  
estacao(10) = "VCS"  
estacao(11) = "VTO"  
estacao(12) = "VEB"  
estacao(13) = "VFA"
```

End Function

Private Function getEstacao(estac As String) As Byte

```
For i = 1 To 13  
    If UCase(estac) = estacao(i) Then  
        getEstacao = i  
        Exit For  
    End If  
Next i
```

End Function