



MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE UNIDADES DE
APOIO PARA AUXILIAR PESQUISAS DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO COM
MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

Marcus Vinicius Oliveira Camara

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro

Março de 2016

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE UNIDADES DE
APOIO PARA AUXILIAR PESQUISAS DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO COM
MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

Marcus Vinicius Oliveira Camara

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D.Sc.

Prof. Rodrigo de Alvarenga Rosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Camara, Marcus Vinicius Oliveira

Modelagem matemática para localização de unidades de apoio para auxiliar pesquisas de tráfego rodoviário com múltiplos estágios/ Marcus Vinicius Oliveira Camara. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 95 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 84-91.

1. Planejamento de transporte. 2. Otimização. 3. Pesquisa de tráfego rodoviário. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ringo e Marta, por
todo carinho, confiança e dedicação, fundamentais para tornar
realidade mais esse sonho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Ringo e Marta, pelo amor incondicional, pela força nos momentos difíceis e também por acreditarem nos meus sonhos. Obrigado por todos os esforços e dificuldades enfrentadas para me garantir uma educação de qualidade.

A minha irmã Marcella, pelo carinho e companheirismo.

A minha namorada Thayse, pelo amor, companheirismo em todos os momentos e amizade que construímos juntos, fundamentais nessa caminhada.

Ao meu tio Paulo Ribeiro, que me acolheu como um filho no Rio de Janeiro e me deu todo suporte necessário, além de sua alegria contagiante e amizade que me deram força em todos os momentos de dificuldade.

Ao meu orientador, professor Glaydston Mattos Ribeiro, por todo conhecimento transmitido, dedicação e paciência. Agradeço também pela amizade construída nesses últimos anos.

À equipe dos Projetos CIL e PNCT, professor Rômulo Dante Orrico Filho, José Reymão, João Pedro, Vanessa Guimarães e Gisele. Agradeço especialmente, ao Saul Quadros, Beatriz Costa e Gerusa Ravache, por toda amizade, companheirismo e ensinamentos. Participar desses projetos me proporcionou enorme aprendizado, pessoal e profissional, que levarei por toda a vida.

Aos colegas de mestrado, especialmente, Inaê Lucato, Beatriz Lagnier, Lygia Bronneberg, Marcello Victorino, Luiza Franca, Paolo Galli, Breno Garcia, Bruno Guida, Bruno Salezze, Pedro Basilio, Pedro Geaquinto, Ewerton Torres, Tulio Silveira, Victor Albino, Igor Godeiro, Maraísa Esch e Luiz Saldanha. Aos de doutorado, Rodrigo Toffano e Marcos Rocha.

A Jane Correa e Natalia Viegas por todo apoio que recebi nesses últimos dois anos. Sua alegria e disposição em ajudar contribuíram para minha formação acadêmica e construção de uma grande amizade.

Ao DNIT e ao COTER pelas informações e sugestões que contribuíram para o aperfeiçoamento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio concedido.

Aos professores Marcelino Aurélio Vieira da Silva e Rodrigo de Alvarenga Rosa por aceitarem participar da banca e por toda contribuição para aprimoramento da pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE UNIDADES DE APOIO PARA AUXILIAR PESQUISAS DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO COM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

Marcus Vinicius Oliveira Camara

Março/2016

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

O planejamento estratégico do setor de transportes indica as principais diretrizes para investimentos em infraestrutura de maneira a combater, por exemplo, o aumento dos custos associados aos deslocamentos. Com isso, torna-se relevante, minimamente, o conhecimento relativo aos volumes médios diários de tráfego nas rodovias, cargas transportadas, origem e destino de viagens. Estes dados são obtidos por meio de pesquisas de contagem volumétrica e classificatória e de origem e destino. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um modelo matemático para localização de Unidades de Apoio, que devem concentrar equipes de pesquisadores a serem alocadas à postos de pesquisa de tráfego, visando a minimização dos custos com deslocamento e utilização das Unidades de Apoio. Pesquisas bibliográficas e documentais foram feitas para compreensão das principais características referentes ao planejamento e funcionamento de pesquisas de tráfego de grande porte e dos principais modelos matemáticos de localização de facilidades. Testes foram realizados considerando três cenários, que totalizam 25 Instâncias. No primeiro, validou-se o modelo proposto utilizando dados de uma pesquisa de tráfego realizada em 2011. No segundo, testes foram realizados com dados preliminares de uma nova pesquisa de tráfego prevista para 2016 e 2017. No terceiro, experimentos computacionais foram realizados para uma pesquisa de tráfego de maior porte, fictícia.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MATHEMATICAL MODELING FOR LOCATION OF SUPPORT UNITS TO
ASSIST ROAD TRAFFIC SURVEY WITH MULTI STAGES

Marcus Vinicius Oliveira Camara

March/2016

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

The strategic planning of the transportation sector indicates the main guidelines for investments in infrastructure in a way to avoid, for example, the increasing of the costs associated to the movements. Therefore, it is important to know, minimally, the average annual daily traffic on the roads, goods transported, origin and destination of the trips. These data are obtained through traffic surveys where the flow can be defined as well as information about the origin and destination of the trips. Thus, this study aims to develop a mathematical model for location of support units, which must concentrate teams of researchers to be allocated to traffic counting stations, seeking to minimize the costs of the movements and use of the support units. A literature review was made to find out the main characteristics related to planning and operation of large traffic surveys and to find out the main mathematical models proposed to facility location problems. We have performed computational tests considering three scenarios, which represent 25 instances. In the first one, we validate the mathematical model proposed using data from a traffic survey applied in 2011. Then, tests are performed with preliminary data from a new traffic survey scheduled for 2016 and 2017. In the third scenario, computational experiments are performed for a fictitious larger traffic survey.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos Geral e Específicos.....	4
1.2	Procedimento Metodológico.....	5
1.3	Estrutura da Dissertação.....	6
2	PESQUISAS DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO	7
2.1	Semana Nacional de Contagem de Tráfego – 2005.....	9
2.2	Plano de Investimento em Transportes para os Eixos Rodoviários de Escoamento da Soja – Operação Safra – 2006	12
2.3	Polo Rodoviário de Pelotas – 2008.....	16
2.4	Pesquisa Nacional de Tráfego – 2011	19
2.5	Considerações Finais do Capítulo 2	22
3	MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES	24
3.1	Conceitos Sobre Localização de Facilidades	24
3.2	Principais Modelos e suas Características	26
3.2.1	Modelo p-Medianas	27
3.2.2	Modelos de Cobertura	29
3.2.3	Modelo p-Center.....	31
3.3	Aplicação de Modelos de Localização-Alocação de Facilidades em Pesquisas de Tráfego Rodoviário	33
3.4	Considerações Finais do Capítulo 3	34
4	MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA	36
4.1	Descrição do Problema, Premissas e Parâmetros Adotados.....	36
4.2	Modelo Matemático	39
4.3	Considerações Finais do Capítulo 4	42
5	APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MODELO.....	44
5.1	Descrição dos Cenários Propostos	44
5.1.1	Parâmetros comuns para todos os três cenários propostos	44
5.1.2	Cenário 1	48
5.1.3	Cenário 2	51
5.1.4	Cenário 3	53
5.2	Análise dos Resultados dos Cenários	55
5.2.1	Resultados Cenário 1	57

5.2.2	Resultados Cenário 2	65
5.2.3	Resultados Cenário 3	74
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICE 1 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DA PESQUISA NACIONAL DE TRÁFEGO DE 2011.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Procedimento metodológico proposto	5
Figura 2.1 – Representação espacial dos postos de pesquisa rodoviária.....	10
Figura 2.2 – Gráfico com o resumo da contagem de tráfego por turno: ambos os sentidos A/B e B/A.....	11
Figura 2.3 – Pesquisa de origem/destino: alocação do tráfego na rede de transporte rodoviário.	12
Figura 2.4 – Representação espacial dos postos de pesquisa rodoviária.....	14
Figura 2.5 – Pesquisa de origem/destino: alocação do tráfego na rede de transporte rodoviário, Operação Safra – 2006.....	15
Figura 2.6 – Representação espacial do polo rodoviário de Pelotas.	17
Figura 2.7 – Representação geográfica dos postos de pesquisa.	18
Figura 2.8 – Alocação de tráfego para o ano-base – 2008	19
Figura 2.9 – Distribuição territorial dos 120 postos de pesquisa de tráfego	20
Figura 2.10 – Mapa geral com o zoneamento da PNT.	22
Figura 4.1 – Modelo matemático proposto para o PLUAAPT.....	43
Figura 5.1 – Representação da Curva de Custos para o Grupo 1	47
Figura 5.2 – Divisão do território nacional em CMA do Exército Brasileiro	50
Figura 5.3 – Quantidade de OM utilizadas por estágio e total de OM distintas na pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 1	58
Figura 5.4 – Mapa comparativo das alocações estabelecidas nas Instâncias 1(a) e 10(b)	60
Figura 5.5 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 1	61
Figura 5.6 – Custo de deslocamento total para cada uma das instâncias do Cenário 1.	62
Figura 5.7 – Custos de utilização de OM por Grupo de Custos para cada uma das Instâncias do Cenário 1.....	63
Figura 5.8 – Função Objetivo para cada uma das Instâncias do Cenário 1	64
Figura 5.9 – Tempo computacional para cada uma das instâncias do Cenário 1	65
Figura 5.10 – Quantidade de OM utilizadas por estágio e total de OM distintas na pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 1.....	66

Figura 5.11 – Quantidade de OM utilizadas por estágio e total de OM distintas na pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 2.....	67
Figura 5.12 – Mapa comparativo das alocações estabelecidas, por estágio, nas Instâncias 11(a) e 20(b)	68
Figura 5.13 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 1	69
Figura 5.14 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 2	70
Figura 5.15 – Custo de deslocamento total para cada uma das instâncias do Cenário 2	71
Figura 5.16 – Custos de utilização de OM por Grupo de Custos para cada uma das Instâncias do Cenário 2.....	71
Figura 5.17 – Função Objetivo para cada uma das Instâncias do Cenário 2	72
Figura 5.18 – Tempo computacional para cada uma das Instâncias do Cenário 2	73
Figura 5.19 – Quantidade de OM utilizadas por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 3.....	74
Figura 5.20 – Quantidade de OM distintas utilizadas em toda pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 3	75
Figura 5.21 – Mapa comparativo das alocações estabelecidas, por estágio, nas Instâncias 21(a) e 25(b).	77
Figura 5.22 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 3.....	78
Figura 5.23 – Custo de deslocamento total para cada uma das instâncias do Cenário 3.....	79
Figura 5.24 – Custos de utilização de OM por Grupo de Custos para cada uma das Instâncias do Cenário 3.....	79
Figura 5.25 – Função Objetivo para cada uma das Instâncias do Cenário 3.....	80
Figura 5.26 – Tempo computacional e GAP % residual para cada uma das instâncias do Cenário 3	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Grupos de Custos para utilização de OM por quantidade de estágios.....	46
Tabela 5.2 – Resumo dos parâmetros utilizados no Cenário 1	50
Tabela 5.3 – Resumo de Instâncias propostas para o Cenário 1	51
Tabela 5.4 – Resumo dos parâmetros utilizados no Cenário 2.....	52
Tabela 5.5 – Resumo de Instâncias propostas para o Cenário 2.....	53
Tabela 5.6 – Resumo dos parâmetros utilizados no Cenário 3.....	54
Tabela 5.7 – Resumo de Instâncias propostas para o Cenário 3.....	55
Tabela 5.8 – Resumo dos resultados dos Cenários.....	56
Tabela I.1 – Localização dos Postos de Pesquisa da PNT de 2011.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Classificação dos PLFs	26
Quadro 3.2 – Resumo dos resultados da aplicação de CAMARA <i>et al.</i> (2015)	34

LISTA DE SIGLAS

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
CD – Custos Deslocamento
CMA – Comandos Militares de Área
CNT – Confederação Nacional do Transporte
CVC – Contagem Volumétrica e Classificatória
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EB – Exército Brasileiro
FO – Função Objetivo
O/D – Origem e Destino
OM – Organizações Militares
OS – Operação Safra
PCST – Programa de Contagem Sistemática de Trânsito
PDNEP – Plano Diretor Nacional Estratégico de Paisagem
PFLs – Problema de Localização de Facilidades
PL-AOMPP – Problema de Localização-Alocação de Organizações Militares a Postos de Pesquisa
PLUAAPT – Problema de Localização de Unidades de Apoio para Atendimento de Pesquisas de Tráfego
PNCT – Plano Nacional de Contagem de Trânsito
PNT – Pesquisa Nacional de Tráfego
PPCST – Plano Piloto de Contagem Sistemática de Trânsito
SNCT – Semana Nacional de Contagem de Tráfego
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
VMD – Volume Médio Diário
VMDA – Volume Médio Diário Anual
VT – Volume de Tráfego

1 INTRODUÇÃO

O planejamento estratégico do setor de transportes tem papel importante no desenvolvimento econômico de uma nação. É por meio desse planejamento que se torna viável o correto direcionamento de investimentos em infraestrutura (ampliação e implantação), a redução de custos, o aumento de competitividade e eficiência do setor, entre outros.

Todavia, os mecanismos necessários para direcionar o desenvolvimento adequado do planejamento, nem sempre é uma tarefa fácil. Corroborando com tal afirmativa, têm-se a dificuldade de obtenção de dados, tais como: Volumes Médios Diários – VMD de tráfego nas rodovias; predominâncias de veículos; tipos e volumes de cargas; informações de origem e destino e motivação de viagens nas rodovias.

Mecanismos já existentes, como pedágios e radares nas rodovias podem ser utilizados para obtenção de dados, no entanto, a qualidade dos dados influencia diretamente nos resultados obtidos pelo planejamento. Dessa forma, tornam-se relevantes, iniciativas públicas e/ou privadas capazes de dotar órgãos governamentais, responsáveis pelas atividades de planejamento do setor de transportes, de dados e informações pertinentes ao desenvolvimento dessas atividades.

Nesse sentido, no Brasil, desde o ano de 1975 o governo utiliza mecanismos específicos para obtenção de dados de tráfego nas rodovias nacionais. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2015), a primeira iniciativa de contagem de tráfego no Brasil ocorreu por meio do *Programa de Contagem Sistemática de Trânsito – PCST*, que foi realizada nos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e de Minas Gerais. No ano de 1976, com o sucesso de implantação dessas pesquisas, o programa evoluiu e foi substituído pelo *Plano Piloto de Contagem Sistemática de Trânsito – PPCST* e, já no ano de 1977, instituiu-se o *Plano Nacional de Contagem de Trânsito – PNCT*.

A implantação do PNCT, que contou com 120 postos permanentes de contagem de tráfego, evoluiu nos anos de 1989, com a utilização de 235 equipamentos de contagem, 266 em 1997, e em 1998, com 285 pontos de contagem distribuídos no território nacional (DNIT, 2015). Contudo, um macroplanejamento de transportes necessita de informações que vão além de dados provenientes de contagem de veículos nas rodovias.

Nesse sentido, novas iniciativas surgiram com intuito de obter, também, informações de viagens que abrangem origem e destino, motivação e frequência de viagens e características relacionadas ao tipo de cargas transportadas. Como exemplo,

pode-se citar a Semana Nacional de Contagem de Tráfego – SNCT em 2005, a *Operação Safra – OS* em 2006 e a *Pesquisa Nacional de Tráfego – PNT* (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT, 2011).

Na PNT realizada no ano de 2011, foram realizadas pesquisas em 120 postos distintos, para, de maneira simultânea, executar Pesquisas de Contagem Volumétrica e Classificatória de Veículos – CVC e de Origem e Destino – O/D. Desde então, seguindo uma tendência que extrapola os limites geográficos do Brasil, assuntos relacionados a pesquisa de tráfego nas rodovias e mecanismos de contagem de tráfego com objetivo, principal, de estimar e atualizar matrizes de origem e destino de viagens, tornaram-se relevantes, e ao mesmo tempo, desafiadores para pesquisadores, devido a sua importância e complexidade associadas (YANG *et al.*, 1991).

No entanto, a qualidade de uma matriz O/D estimada, para o transporte rodoviário, depende de fatores, principalmente, relacionados a: (1) métodos utilizados para a estimativa; (2) escolha correta de segmentos (*links*) para contagem de veículos (localização e número de pontos de contagem); e (3) quantidade e confiabilidade dos dados usados (YANG e ZHOU, 1998; CHEN *et al.*, 2007; EHLERT *et al.*, 2006).

Nesse sentido, também é importante que o dimensionamento e planejamento da realização dessas pesquisas de tráfego sejam adequados. Na PNT de 2011, por exemplo, foram realizadas pesquisas CVC e O/D durante 7 dias (1 semana) ininterruptos durante 24 horas diárias para as pesquisas CVC e 12 horas diárias para as pesquisas O/D (SPNT, 2015).

Seguindo essa premissa, adicionada à complexidade logística e operacional envolvida na realização de pesquisas de tráfego, em especial, pesquisas de grande porte, torna-se necessário, para garantir eficiência e qualidade dos dados obtidos, dentre outros fatores, que a mão-de-obra envolvida possua conhecimento e habilidades específicas para realização de tais pesquisas.

Corroborando com tal afirmação, informações do Portal da PNT de 2011 (PNT, 2011) indicam que, devido à abrangência territorial e distribuição nas rodovias, a realização desta pesquisa demandou estudos específicos, equipamentos modernos e treinamento de alta complexidade para garantir, quantidade, qualidade e consistência das informações obtidas com as pesquisas.

Os postos de pesquisa devem ser atendidos por Unidades de Apoio que tem função de disponibilizar suporte logístico e operacional, por meio de equipes de pesquisadores, equipamentos, suprimentos e gestão de pessoal durante o período de realização das

pesquisas nas rodovias. Cabe destacar que, a realização dessas pesquisas, além da complexidade envolvida, requer elevados investimentos visto que, sua realização envolve elevados custos provenientes do deslocamento das equipes de pesquisadores, treinamentos, utilização das Unidades de Apoio e dos seus recursos (equipamentos, suprimentos e outros).

Desde a SNCT de 2005, o envolvimento do Exército Brasileiro – EB, por meio de suas Organizações Militares – OM, se mostrou importante contribuição para realização dessas pesquisas no Brasil já que, sua distribuição no território nacional e capacidade operacional permitem cobertura de atendimento dos postos de pesquisa, além de experiência para realizar operações de campo.

O suporte para realização destas pesquisas chegou a utilização de cerca de 5.000 homens na PNT de 2011 (MT, 2011; BRASIL, 2011), sendo que, cada posto contou com um número mínimo de 40 militares do EB (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2011). Contudo, a utilização dessas OM podem estar restritas, por exemplo, devido a limites orçamentários da pesquisa, disponibilidade de mão-de-obra (militares), ou simplesmente, decisão estratégica do EB.

Portanto, ao considerar pesquisas de tráfego de grande porte, voltadas para macroplanejamento de transportes, em nível inter-regional ao invés de transporte urbano, que necessita de grandes volumes de recursos financeiros, materiais e pessoas, é relevante o planejamento voltado para o atendimento dos postos de pesquisa por parte das Unidades de Apoio.

Nesse sentido, o DNIT, em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ e o EB, planeja a realização de uma nova Pesquisa Nacional de Tráfego, para os anos de 2016 e 2017 (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2015), a ser realizada em quatro estágios que totalizam 300 postos de pesquisa. Assim como na PNT de 2011, as pesquisas CVC e O/D serão conduzidas por militares, com isso, cada posto de pesquisa deverá contar com o apoio de um pelotão do EB sendo que, um pelotão é um efetivo variável da ordem de 36 a 50 militares, comandado por 01 (um) oficial subalterno (tenente).

Assim, por analogia, pode-se considerar que cada OM representa uma Unidade de Apoio que prestará atendimento (mão-de-obra) a postos de pesquisa tráfego. Dessa forma, surge o Problema de Localização de Unidades de Apoio para Atendimento de Pesquisas de Tráfego – PLUAAPT que deve determinar, dado um conjunto de Unidades de Apoio,

quais devem ser utilizadas e a quais postos de pesquisa devem ser associadas para fornecimento de mão-de-obra tal que o custo total envolvido seja minimizado.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

Sendo assim, surge a seguinte problemática: dado um conjunto de locais candidatos, como determinar a localização de Unidades de Apoio, considerando os custos de deslocamento das equipes de pesquisadores e os custos associados à utilização dessas Unidades de Apoio?

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver uma modelagem matemática para localização de Unidades de Apoio e alocação de equipes de pesquisadores à postos de pesquisa de tráfego ao menor custo possível, nesse caso representado pelo custo de deslocamento dos pesquisadores e de utilização de uma facilidade (Unidade de Apoio).

Como objetivos específicos têm-se:

1. Analisar o funcionamento das pesquisas de tráfego. Além disso, deve-se identificar os principais parâmetros envolvidos de forma a estabelecer premissas que direcionam as necessidades e restrições relacionadas com o processo de localização das Unidades de Apoio e alocação destas aos postos de pesquisa;
2. Identificar na literatura os principais modelos matemáticos existentes que possam ser relacionados com o problema de pesquisa deste trabalho, de maneira a contribuir para o desenvolvimento do modelo matemático a ser proposto;
3. Aplicar o modelo matemático em uma situação real de maneira que, seja possível melhor compreender as características da formulação e permitir aplicações futuras.

Portanto, acredita-se que a utilização de um modelo matemático no processo de planejamento de pesquisas de tráfego rodoviário, relacionado à escolha de Unidades de Apoio, a partir de um conjunto de locais candidatos, que devem fornecer equipes de pesquisadores (mão-de-obra), suprimentos e, também, ser utilizadas como pontos de suporte na gestão durante a execução das pesquisas, pode contribuir para otimização (minimização) dos custos de transporte e uso dessas facilidades.

Dessa forma, este estudo mostra-se relevante por fornecer uma ferramenta de apoio ao processo de planejamento de pesquisas de tráfego, com vistas à redução de

custos e, conseqüentemente, na melhor utilização de recursos. Ressalta-se que, como delimitação deste estudo, adotou-se como premissas os parâmetros e características identificadas nas pesquisas já realizadas no Brasil, principalmente na PNT de 2011. Além disso, estimativas e simplificações foram adotadas para representação dos custos de deslocamento e de utilização das Unidades de Apoio.

1.2 Procedimento Metodológico

Nesta seção, apresenta-se o procedimento metodológico definido para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. Tal procedimento está representado por meio de um fluxograma (Figura 1.1) que está dividido em três etapas: Base Conceitual, Modelagem Matemática e Aplicação.

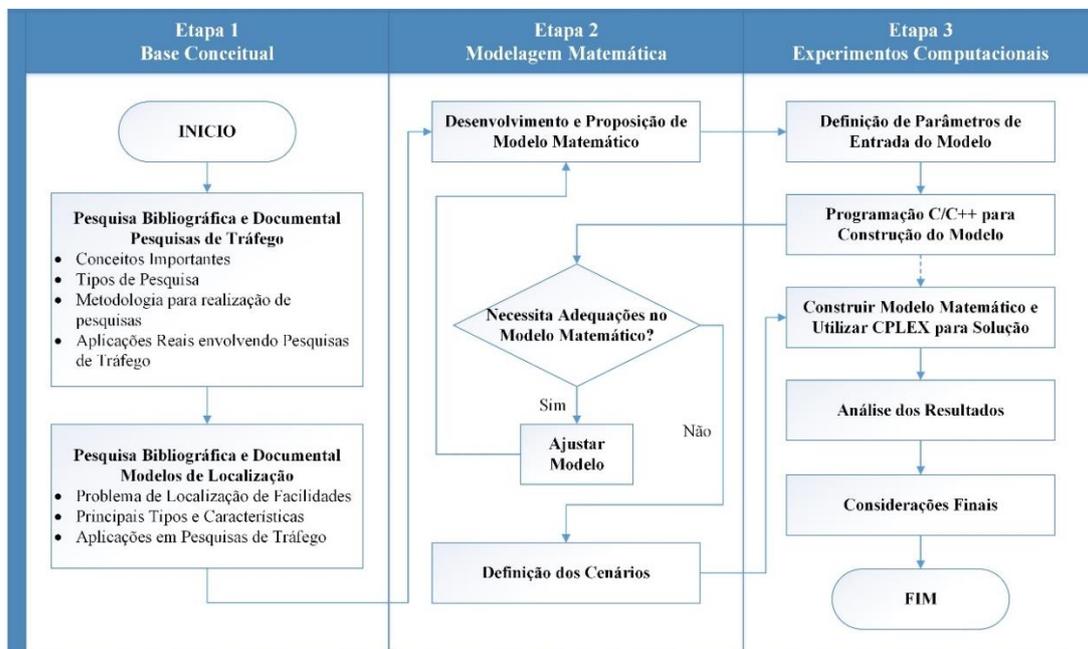


Figura 1.1 – Procedimento metodológico proposto

A primeira etapa consiste no levantamento bibliográfico de conceitos, características, metodologias, necessidades e restrições envolvidas na realização de pesquisas rodoviárias de tráfego de CVC e O/D, além de modelos matemáticos de localização existentes na literatura, de forma a estabelecer elementos consubstanciados, de fundamental importância, no processo de desenvolvimento do modelo matemático.

A segunda etapa consiste no desenvolvimento e proposição do modelo matemático de otimização para o PLUAAPT. Nesta etapa, codificações em linguagem C/C++ são necessárias para representação explícita do modelo matemático em função dos

parâmetros de entrada. Ainda nesta etapa, devem ser estabelecidos cenários, propostos com base nos resultados da Etapa 1.

Os experimentos computacionais realizados para os cenários estabelecidos devem ser realizados por meio do *solver* ILOG IBM CPLEX 12.6 (IBM, 2015) na Etapa 3. Além disso, esta etapa contempla ainda análises dos resultados e considerações finais.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro, apresenta-se esta introdução que discorre sobre o panorama geral do estudo, problema de pesquisa e objetivos. No Capítulo 2 são feitas considerações sobre pesquisas de tráfego rodoviário, principalmente, relacionadas aos conceitos envolvidos, metodologia e funcionamento destas pesquisas, além de um detalhamento de pesquisas já realizadas e os principais resultados obtidos.

O conteúdo apresentado no Capítulo 3 tem como objetivo fundamentar o desenvolvimento do modelo matemático proposto neste trabalho por meio de uma revisão bibliográfica acerca de modelos de localização-alocação de facilidades. Além disso, apresenta-se nesse capítulo, algumas aplicações de modelagem matemática relacionada com pesquisas de tráfego rodoviário.

O problema abordado neste trabalho, os parâmetros e premissas considerados no desenvolvimento do modelo matemático proposto para localização de Unidades de Apoio para auxiliar pesquisas de tráfego nas rodovias são apresentados no Capítulo 4. Este capítulo descreve de maneira detalhada o modelo matemático que envolve a função objetivo e as restrições envolvidas.

No Capítulo 5 apresentam-se aplicações computacionais do modelo matemático proposto. Inicialmente são apresentados três diferentes cenários que tem como objetivo:

- 1) Validar o modelo matemático;
- 2) Avaliar o comportamento do modelo matemático na nova pesquisa do DNIT, prevista para 2016 e 2017; e
- 3) Avaliar o desempenho do modelo matemático frente a variação dos dados de entrada.

O Capítulo 6 dedica-se às considerações finais do trabalho, com foco na avaliação de cumprimento dos objetivos propostos e nos principais resultados obtidos, além de considerações e recomendações para trabalhos futuros. Por último, apresenta-se as referências bibliográficas utilizadas.

2 PESQUISAS DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica referente a pesquisas de tráfego rodoviário de grande porte, incluindo conceitos básicos que auxiliam na compreensão do problema estudado, e as principais características referentes ao seu funcionamento, inclusive, relativo à escolha de locais para postos de pesquisa e Unidades de Apoio. Sendo assim, divide-se o capítulo em cinco seções: (1)-(4) pesquisas de tráfego já realizadas em território nacional; e (5) considerações finais do capítulo.

Estudos relacionados a Volume de Tráfego – VT são realizados para coletas de dados a respeito da quantidade de veículos que passam por uma determinada faixa, ou via, durante um período de tempo estabelecido (GARBER e HOEL, 2009). A unidade de representação VT em rodovias é, normalmente, expressa em veículos/dia ou veículos/hora.

Contudo, diferentes formas para representação do VT são encontradas na literatura, e para cada uma destas, existem algumas características associadas. As diferentes formas de representação e suas características, apresentadas a seguir, estão de acordo com GARBER e HOEL (2009) e HOMBURGUER *et al.* (1996).

- *Average Daily Traffic* (Volume Médio Diário – VMD) – é a média de contagens realizadas diariamente em períodos inferiores a um ano. É utilizada para: planejamento de atividades em rodovias; medições de demandas atuais; e avaliação de fluxos de tráfego existentes.
- *Annual Average Daily Traffic* (Volume Médio Diário Anual – VMDA) – representa a média de contagens realizadas diariamente durante um ano. É utilizada em muitas situações de análise de transportes, tais como: estimativas de rendimento com usuários de rodovias; cálculo de taxas de acidentes; para estabelecimento de tendências do volume de tráfego; avaliação de viabilidade de projetos de rodovias; desenvolvimento de programas de melhorias e manutenção de rodovias; e localizar áreas potenciais para instalação de novas facilidades.
- *Hourly Traffic* (Volume por Hora) – é representado em veículos/hora e é comumente utilizado para: determinar duração e magnitude de períodos/horários de pico; avaliação de deficiências de capacidade; avaliação da necessidade de instalação de dispositivos de controle de tráfego; e avaliação de necessidade de mudanças em vias e interseções.

- *Annual Traffic* (Tráfego Anual) – é representado em veículos/ano e é comumente utilizado para: determinar tendências de volume de viagens por ano em uma determinada área; estimar renda esperada pelo tráfego de usuários da rodovia (pedágios); computar taxas de acidentes; e para o monitoramento de longo prazo do desempenho/durabilidade do pavimento.

As contagens volumétricas podem ser realizadas de diferentes formas, utilizando técnicas manuais e automáticas (ROGER *et al.*, 2004). Nas contagens manuais, são utilizadas pessoas para, por exemplo, preenchimento de formulários de contagem e operação de equipamentos de contagem manual, já nas automáticas, utilizam-se equipamentos de contagem permanentes tais como: laços indutivos; sensores magnéticos ou piezométricos; sensores infravermelho; detectores por imagem (vídeo); e outros.

As contagens podem ser, também, classificatórias, no caso de ocorrer simultaneamente, denomina-se aqui, Contagem Volumétrica e Classificatória – CVC. Nestas, além da contagem de veículos (volume de tráfego) por sentido, os veículos devem ser classificados de acordo com classes pré-estabelecidas. As classes de veículos podem ser, por exemplo, em função do tipo de transporte (passageiro ou carga), categorias (leve ou pesado), quantidade de eixos, e outros.

Além dos estudos de VT, no planejamento de transportes, as Pesquisas de Origem e Destino (O/D) tem como objetivo identificar pontos de partida (as origens) e de término (os destinos) de viagens (SARKAR *et al.*, 2015). As pesquisas O/D podem ser realizadas de diferentes formas, a principal é por meio de entrevistas. Estas podem, ainda, coletar outras informações importantes no planejamento, tais como: motivação de viagens; características socioeconômicas; quantidade de passageiros; tipo, valor e peso de carga transportada; frequências de viagens; e outras.

Quando relacionado a aplicações reais envolvendo pesquisas de grande porte, na literatura pouco material científico foi encontrado. Em alguns casos, foram identificados documentos governamentais de regulamentação ou direcionamento (procedimentos) que devem ser seguidos no planejamento e realização de pesquisas de tráfego, como o *Travel Survey Manual* do Governo dos Estados Unidos da América (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 1996) e o *Roadside Interview Survey Guidance* do Governo da Escócia (SCOTTISH EXECUTIVE, 2004).

Em outros casos, são apresentadas pesquisas locais de O/D e CVC, como a realizada nas rodovias que ligam as cidades de Bhavnagar e Vataman e as cidades de

Rajkot e Ahmadabad, todas localizadas na Índia, e a pesquisa O/D realizada no Estado de NY nos Estados Unidos da América (ENVIRONMENTAL REVIEW, 2004).

As pesquisas realizadas na Índia ocorreram em setembro do ano de 2005, com duração de três dias, ou 72 horas, para coleta de dados de CVC e de 24 horas, no quarto dia, no caso das pesquisas de O/D (GIDB, 2005). Essas pesquisas tiveram como objetivo de avaliar o volume de tráfego na região e avaliar a viabilidade de implantação de um serviço de *ferry boat* para redução de custos e tempos de viagem.

Nos Estados Unidos, foram realizadas pesquisas de O/D, no ano de 2003, em cinco locais de travessia sobre o Rio Hudson (pontes e túneis). Nessas pesquisas, foram distribuídos cerca de 90.000 formulários, sendo que, destes, 11.496 formulários foram respondidos (ENVIRONMENTAL REVIEW, 2004).

Além dessas, a *National Travel Survey* realizada na Inglaterra desde a década de 1960, coleta dados de viagens no país por meio de uma pesquisa domiciliar com entrevista pessoal e preenchimento de um formulário referente à um diário de viagens para o período de uma semana. Na pesquisa realizada em 2014, foram abordados 7.000 domicílios e 16.000 formulários preenchidos (NTS, 2015).

Nas próximas seções, são apresentadas aplicações reais envolvendo pesquisas de tráfego, de grande porte, já realizadas em território nacional, com suas principais características e resultados obtidos.

2.1 Semana Nacional de Contagem de Tráfego – 2005

A Semana Nacional de Contagem de Tráfego – SNCT, no ano de 2005, foi realizada pelo DNIT com o principal objetivo de fornecer elementos que contribuíssem para a definição do posicionamento estratégico de balanças rodoviárias. Essa atividade foi realizada seguindo os preceitos do Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem – PDNEP, frente a retomada da implantação de postos de pesagem veicular (balanças), responsáveis pelo controle do peso dos veículos de cargas nas rodovias federais.

Os locais de instalação dos postos de pesquisa foram definidos em função dos seguintes aspectos: avaliação dos principais corredores de transporte rodoviário, dos volumes de tráfego do DNIT e dos principais centros de produção e consumo; bem como da localização dos principais pontos de distribuição de cargas (ferrovias e portos), das balanças implantadas na rede rodoviária federal, independentemente de estarem em funcionamento ou desativadas; e, da verificação do grau de importância dos pontos

escolhidos para as pesquisas, possibilitada pela reunião das principais rotas de transporte, obtida com a aplicação do *software* TransCAD.

Diante disso, foram planejados 109 postos de pesquisa, espalhados pelos principais corredores rodoviários nacionais. A região contemplada com o maior número de postos de coleta foi a Nordeste, com 30% do total, seguida do Sudeste, com 28% dos postos, e do Sul, com 23%. As regiões Centro-Oeste e Norte contaram com 12% e 6% dos postos de pesquisa, respectivamente.

A pesquisa de tráfego que ocorreu entre os dias 26 de novembro e 2 de dezembro de 2005 incluiu a realização ininterrupta de pesquisas volumétricas e classificatórias dos veículos, além da pesquisa de origem/destino, com duração de 12 horas diárias (das 6h às 18h). A Figura 2.1 ilustra a representação espacial da localização dos postos de pesquisa rodoviária.



Figura 2.1 – Representação espacial dos postos de pesquisa rodoviária.

Fonte: DNIT (2005).

Para a determinação da amostra, foram analisados os dados de tráfego nas rodovias federais, em cada Estado da Federação, a partir de dados disponibilizados no site do DNIT. Tais informações, relativas a 92 trechos de rodovia, incluíam o volume médio diário de tráfego, mês a mês, durante a série temporal disponível e algumas contagens volumétricas e classificatórias por tipo de veículo. Apesar da defasagem desses dados, as informações do comportamento do tráfego contribuíram para o dimensionamento da amostra para o primeiro dia de pesquisa. Para os dias seguintes, utilizou-se, também, os dados acumulados do primeiro dia, os quais serviam para avaliar a necessidade, ou não, de ampliar o quantitativo de entrevistas para os dias subsequentes.

A pesquisa volumétrica e classificatória, que tinha como finalidade identificar o tráfego ao longo dos corredores durante sete dias, constatou uma contagem total de aproximadamente 5 milhões de veículos nos 109 postos de coleta de tráfego. Já a pesquisa de origem/destino, com uma amostragem de mais de 400 mil entrevistas aplicadas, buscava identificar as principais rotas que se utilizam dos corredores estudados. Diante dos resultados obtidos foi possível caracterizar os veículos, as viagens e os tipos de carga transportados, entre outros dados para o planejamento, além de traçar um panorama das origens e destinos dos deslocamentos rodoviários no Brasil.

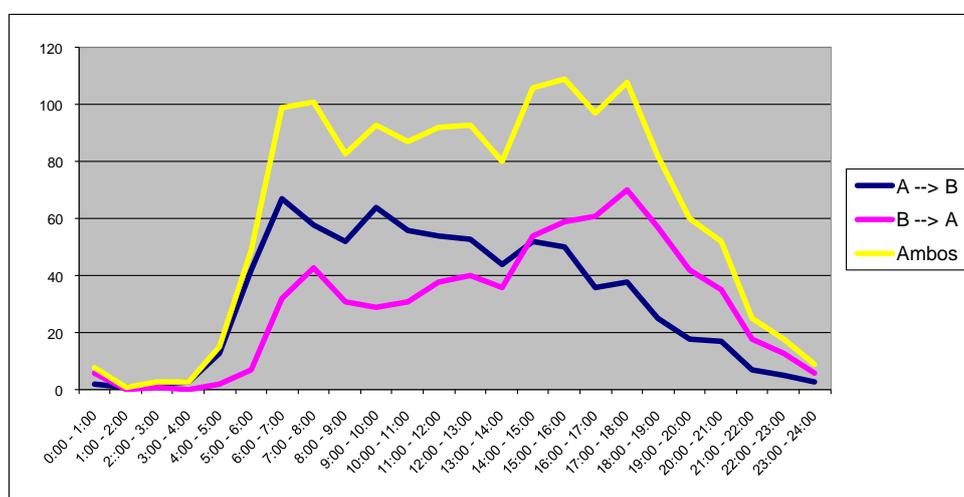


Figura 2.2 – Gráfico com o resumo da contagem de tráfego por turno: ambos os sentidos A/B e B/A.

Fonte: DNIT (2005).

Para tanto, a área de estudo foi segmentada em zonas, de forma a facilitar a obtenção e a análise das informações de tráfego. Em cada zona foi estabelecido um

centroide, o que significa que qualquer viagem com origem ou destino nessa zona passou a ser considerada como partindo ou chegando neste determinado ponto. Tal segmentação inclui os municípios brasileiros e os países com fronteira direta com o Brasil, resultando em mais de 5.500 origens e destinos. Isso faz com que a matriz O/D obtida seja de grande dimensão, uma vez que cada um deles pode ser a origem ou o destino dos respondentes. Os principais resultados desta pesquisa podem ser observados nas Figuras 2.2 e 2.3.

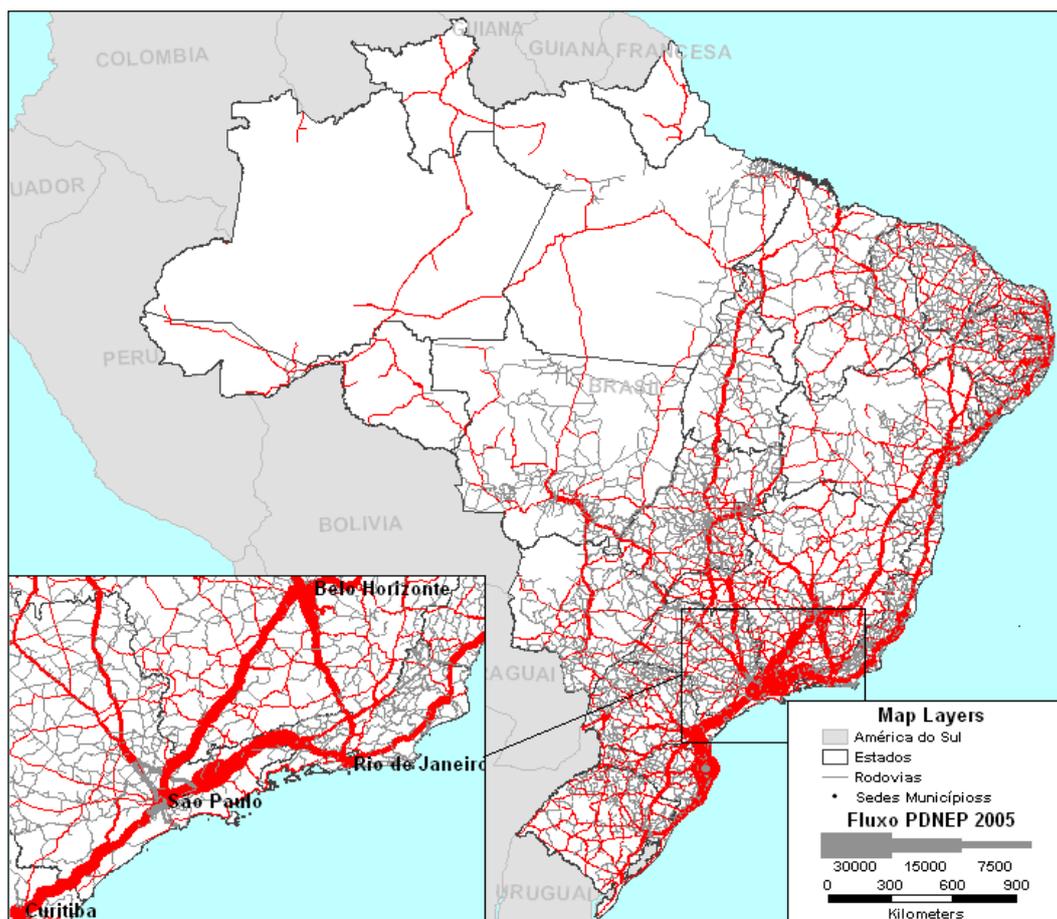


Figura 2.3 – Pesquisa de origem/destino: alocação do tráfego na rede de transporte rodoviário.

Fonte: DNIT (2005).

2.2 Plano de Investimento em Transportes para os Eixos Rodoviários de Escoamento da Soja – Operação Safra – 2006

De maneira similar ao ocorrido no ano de 2005, o DNIT estruturou uma pesquisa de campo para identificar o fluxo de veículos no modo rodoviário que objetivou fornecer base para a elaboração de um projeto direcionado à análise do escoamento de grãos, a Operação Safra 2006.

Como o objetivo era traçar o panorama do escoamento de grãos, a coleta de dados foi realizada em apenas 20 postos de contagem volumétrica e classificatória localizados nos eixos de escoamento desses grãos, com duração de sete dias. Com esse tipo de pesquisa, torna-se possível analisar dados relacionados à demanda de viagens, de forma a classificar os deslocamentos praticados. Além disso, foram realizados levantamentos a respeito da origem/destino dos veículos abordados, o que permite estimar o fluxo de movimentação de veículos no sistema viário no período que engloba a safra.

A localização dos 20 postos de pesquisa da Operação Safra 2006 foi estabelecida com base na localização dos 109 postos de pesquisa da Semana Nacional de Contagem de Tráfego do ano anterior. Esses pontos iniciais foram tratados com o auxílio da análise de rede, ou critério de *link* análise, obtido com a aplicação do *software* TransCAD. Por meio desse critério foi possível estabelecer quais postos eram efetivamente úteis para a pesquisa, uma vez que o mesmo tomou como base a localização das usinas esmagadoras de soja, dos armazéns graneleiros, dos portos, dos centros de produção de grãos, além de outros parâmetros logísticos.

Concluída a etapa de definição da localização dos postos, a pesquisa de campo aconteceu entre os dias 27 de agosto e 2 de setembro de 2006, durante as 24 horas do dia. Os 20 postos definidos estão apresentados na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Representação espacial dos postos de pesquisa rodoviária.

Fonte: DNIT – Plano de Investimento em Transportes para os Eixos Rodoviários de Escoamento da Soja (DNIT, 2006)

A definição da amostra foi outro ponto importante da pesquisa, tendo em vista a necessidade de adequação deste valor com o número de questionários aplicados à pesquisa O/D. Por isso, foram entregues às Organizações Militares 179.200 formulários, dos quais 154.854 (86,4% do total) foram aplicados. O período de aplicação da pesquisa O/D, bem como a delimitação das zonas de tráfego, foram definidos conforme dados da pesquisa de tráfego do ano de 2005, onde foram considerados os municípios brasileiros e os países que fazem fronteira com o Brasil para a definição das zonas e o período de destino às entrevistas foi estabelecido entre as 6h e 18h.

Diante dos resultados destas pesquisas tornou-se possível representar a demanda por transportes durante a o período de safra, por meio de matrizes com alguma medida da intensidade dos deslocamentos entre diferentes zonas, as quais expõem combinações espaciais da multiplicidade de origens e destinos individuais de cada deslocamento. Bem como no Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem, a alocação de tráfego foi baseada na definição do zoneamento, na expansão da matriz O/D obtida e na base de dados georreferenciada. Com isso, a alocação representou os fluxos de veículos entre os pares O/D considerados, como pode-se observar na Figura 2.5.

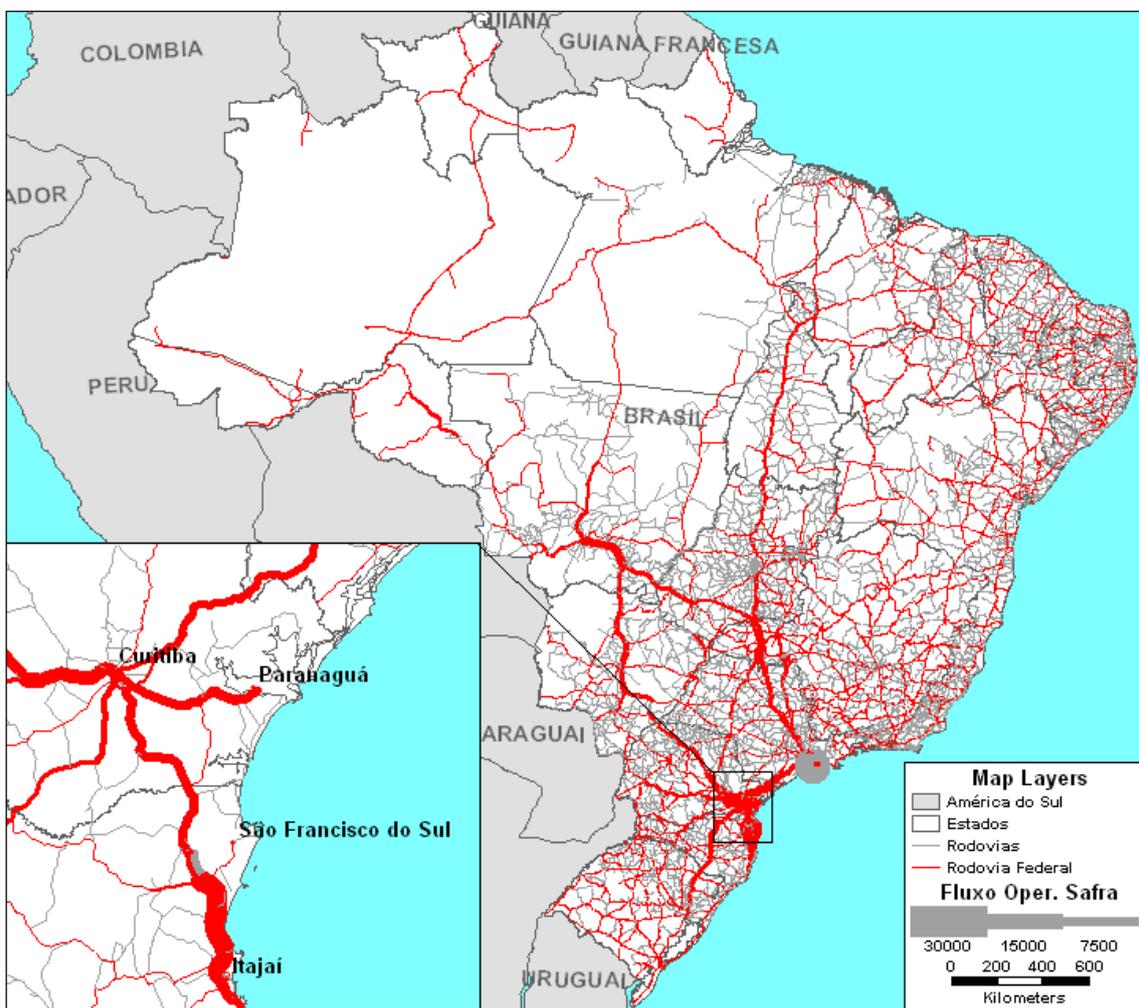


Figura 2.5 – Pesquisa de origem/destino: alocação do tráfego na rede de transporte rodoviário, Operação Safra – 2006.

Fonte: DNIT – Plano de Investimento em Transportes para os Eixos Rodoviários de Escoamento da Soja (DNIT, 2006)

2.3 Polo Rodoviário de Pelotas – 2008

De maneira similar ao ocorrido nos anos de 2005 e 2006, a pesquisa de tráfego rodoviário aplicada no Polo Rodoviário de Pelotas em 2008 foi realizada com a finalidade de obter informações relevantes a respeito do fluxo de veículos na região. Além disso, tal pesquisa forneceu dados utilizados na mensuração do impacto sobre o equilíbrio econômico e financeiro no contrato de concessão do trecho Pelotas - Porto do Rio Grande, tendo em vista às recentes obras de duplicação realizadas neste segmento, localizado na BR-392/RS.

A área de estudo, Polo Rodoviários de Pelotas, possui 623,4 km de extensão e compreende os trechos rodoviários da BR-116/RS (com 260,5 km entre os municípios de Camaquã, Pelotas e Jaguarão), BR-293/RS (com 161,1 km de extensão entre Pelotas e Bagé), e BR-392/RS (com 201,8 km de extensão entre Rio Grande, Pelotas e Santana da Boa Vista). A Figura 2.6 apresenta área de abrangência deste estudo.

Na mesma linha de pesquisa apresentada nas experiências anteriores, foram empregadas pesquisas CVC e pesquisa O/D. Já a alocação dos postos de pesquisa, foi feita exclusivamente pela técnica de *link* análise, com o auxílio do *software* TransCAD, a qual tomou como base as localizações das praças de pedágio existentes entre o Porto de Rio Grande e os segmentos rodoviários que compõem o Polo de Pelotas.

Como a finalidade da pesquisa era fornecer dados para a modelagem de transportes, as informações de tráfego foram levantadas por meio de pesquisas realizadas em duas etapas, ambas contemplando pesquisas CVC e de O/D, também realizadas por militares, tendo em vista o sucesso das operações anteriores. A primeira pesquisa ocorreu no município de Rio Grande (BR-392 e BR-471), entre 26 de agosto e 4 de setembro de 2008, e contou com três postos de pesquisa. A segunda etapa durou cinco dias, entre 12 e 16 de setembro, e foi realizada em seis postos de pesquisa (três na BR-116, um na BR-293 e dois na BR-392). A Figura 2.7 representa a localização geográfica dos postos de pesquisa.

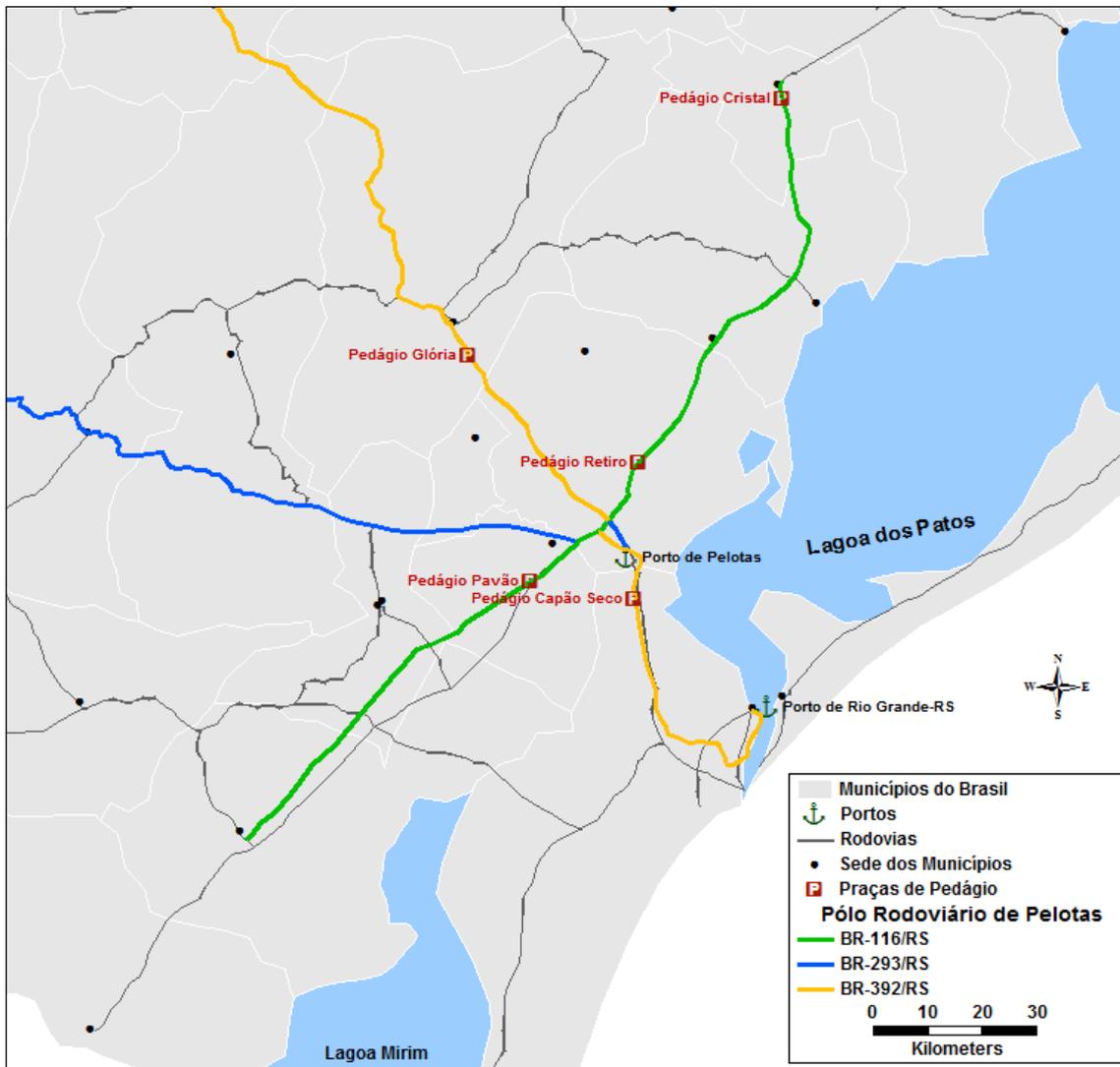


Figura 2.6 – Representação espacial do polo rodoviário de Pelotas.

Fonte: ANTT (2008)

O objetivo desta pesquisa foi alcançado, uma vez que, tornou-se possível identificar as origens e destinos das viagens, o perfil do usuário e as principais cargas (pesquisa O/D), bem como a quantidade e classes de veículos, (pesquisa de contagem volumétrica e classificatória). A obtenção dos dados foi realizada por meio de 27.448 entrevistas de O/D (12 horas diárias) e de pesquisa CVC (24 horas diárias).

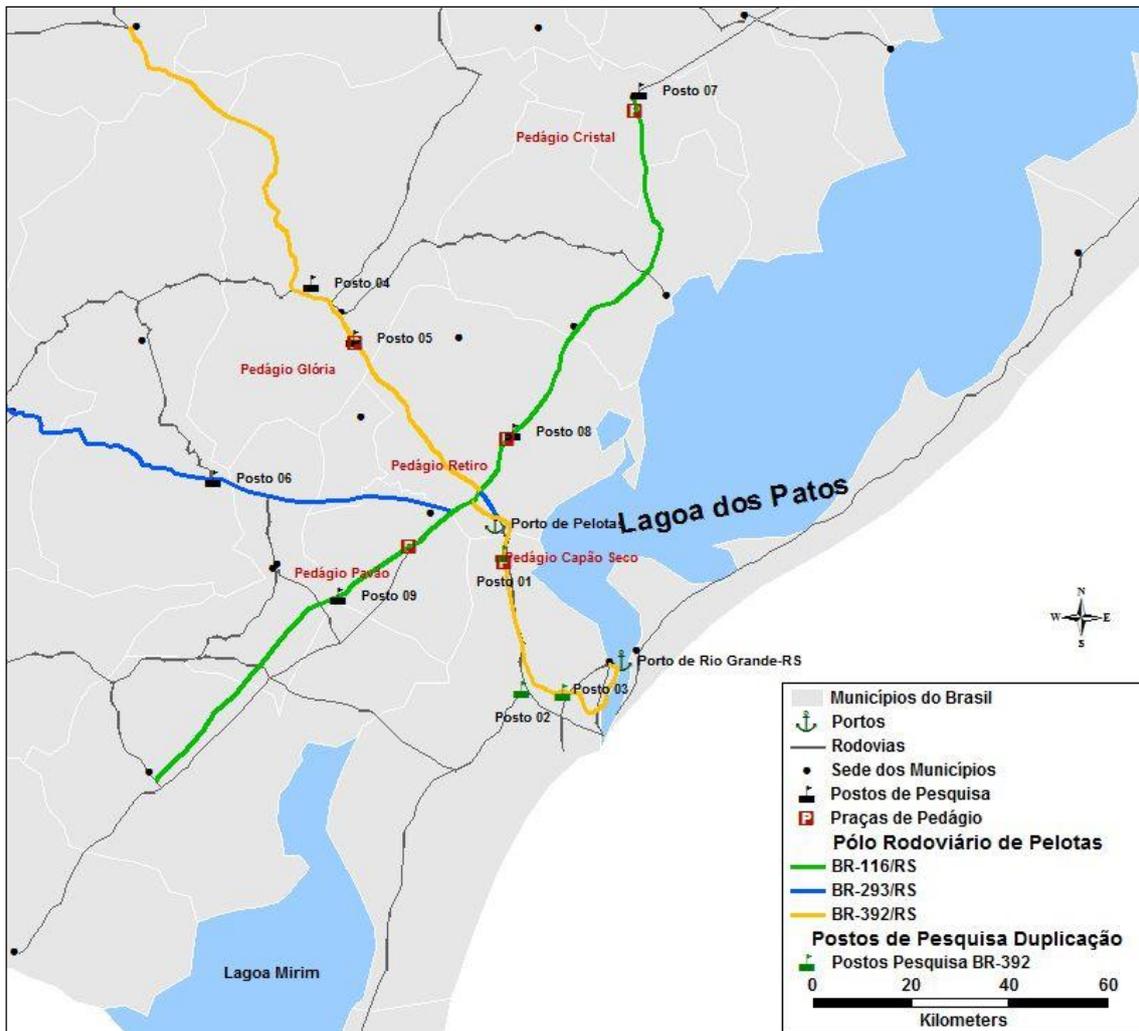


Figura 2.7 – Representação geográfica dos postos de pesquisa.

Fonte: ANTT (2008)

Mediante a apresentação dos resultados das pesquisas, foi possível realizar a modelagem de transportes da região, de forma a estabelecer o volume médio diário anual tanto para o ano-base quanto para os anos subsequentes. Foi possível ainda, a partir dos dados da CVC, extrair diversas outras informações, como a quantidade total de viagens de veículos em determinado posto de pesquisa, em um dado dia da semana, por exemplo, o que facilita a identificação dos postos que recebem os maiores volumes diariamente. Além disso, constatou-se que os maiores volumes de tráfego se concentravam no período de aplicação da pesquisa de origem/destino, ou seja, das 6h às 18h.

Diante dos resultados obtidos, que incluem o zoneamento de transportes, as matrizes O/D consolidadas e a base georreferenciada de rodovias, tornou-se praticável a alocação de tráfego, a qual representa os fluxos de veículos na base georreferenciada entre

os pares O/D. Com isso, os resultados da alocação em rede para o ano-base estão apresentados na Figura 2.8.

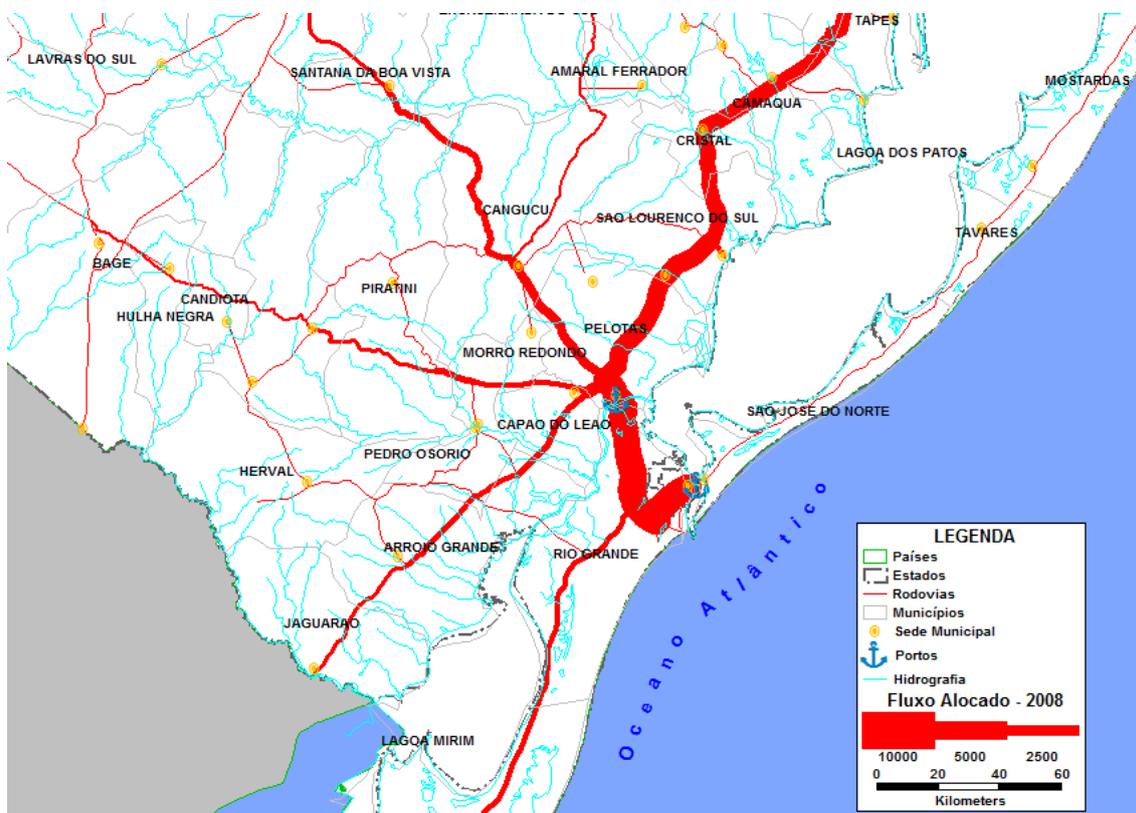


Figura 2.8 – Alocação de tráfego para o ano-base – 2008

Fonte: ANTT (2008)

2.4 Pesquisa Nacional de Tráfego – 2011

Como nas demais pesquisas, o objetivo da pesquisa de tráfego de 2011 foi determinar, com o apoio de métodos sistemáticos de coleta de dados de tráfego e modelagem de transportes, a quantidade de veículos que passam por determinada via, bem como as origens e destinos das viagens realizadas por esses veículos, em um dado período de tempo.

O grande diferencial do planejamento da Pesquisa Nacional de Tráfego de 2011, foi a realização de um estudo para o posicionamento estratégico dos postos de coleta de dados nas rodovias brasileiras. Para tanto, ponderou-se questões técnicas e os resultados das pesquisas anteriores, o que possibilita a comparação de resultados em períodos distintos, de modo a facilitar a avaliação dos critérios para localização de postos de pesquisa. A localização destes postos considerou, ainda, as principais rotas de cargas e de passageiros das rodovias.

Como em 2005, a pesquisa de 2011 considerou todo o território nacional como área de estudo, subdividindo-o em zonas de tráfego (municípios). Mais uma vez foram realizadas pesquisas CVC e O/D, no entanto, desta vez elas foram divididas em três etapas distintas ao longo do ano.

As ferramentas utilizadas para a determinação dos locais de instalação dos postos de pesquisa, como a *link* análise do *software* TransCAD, resultaram na delimitação de 120 postos para aplicação de questionário, ao longo de todo o território nacional. Destes, 22 postos foram escolhidos para a realização de duas pesquisas de menor abrangência, aplicadas em períodos anterior e posterior ao da execução da pesquisa principal de 120 postos. Com isso, esperava-se avaliar a sazonalidade do tráfego rodoviário. A Figura 2.9 mostra a localização dos 120 postos de pesquisa de tráfego utilizados em 2011.

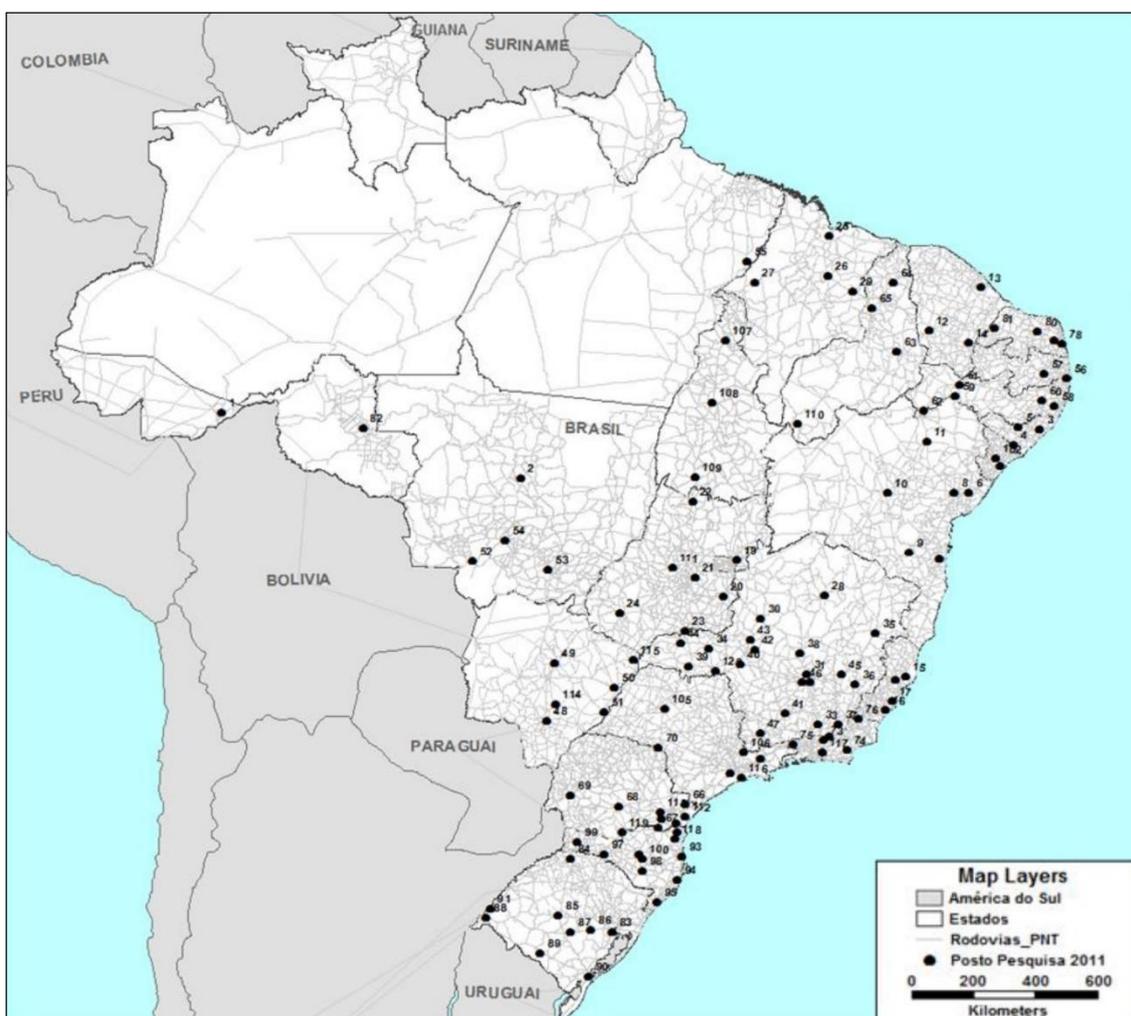


Figura 2.9 – Distribuição territorial dos 120 postos de pesquisa de tráfego

Fonte: Pesquisa Nacional de Tráfego (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT, 2011)

A segunda fase da pesquisa, considerada a mais importante delas, ocorreu entre os dias 23 e 30 de setembro de 2011, em período integral, no caso das pesquisas CVC. Esse tipo de pesquisa foi realizada nos trechos rodoviários selecionados, com anotações a cada 15 minutos para identificação da quantidade de veículos. A partir desses dados foram detectadas diversas informações, entre as quais, o total de viagens de veículos durante os oito dias de pesquisa.

Pode-se dizer, então, que a pesquisa CVC possibilitou a avaliação, de diferentes formas, do tráfego de veículos por categoria (associados ao transporte de passageiros ou cargas). Tais informações foram analisadas e empregadas na formulação de modelos de transportes. Além disso, esses dados também foram utilizados para complementar a análise das pesquisas de origem/destino, de forma a facilitar a geração de matrizes de viagens entre os pares de O/D. Esse elemento técnico torna-se fundamental na execução dos procedimentos e métodos de estimativa de tráfego ao longo dos segmentos das rodovias selecionadas.

Já no que tange à pesquisa de origem/destino, ela também foi aplicada a condutores de veículos de transporte de passageiro e de cargas. A quantidade de dados obtidos diariamente variou devido à quantidade de pesquisadores definidos no planejamento da pesquisa, para cada posto, dimensionado de acordo com o fluxo médio de veículos, para cada segmento viário. No total, foram aplicadas 807.565 entrevistas, das quais 798.013 foram consideradas válidas após realizados os descartes necessários.

Por intermédio das pesquisas O/D foi possível observar a frequência das viagens realizadas, considerado um dos dados mais relevantes para este estudo. Este parâmetro é capaz de apontar o perfil das viagens (locais, de médias ou de longas distâncias) em determinado segmento rodoviário. Possibilita, também, o conhecimento do motivo da viagem, informação fundamental para os estudos de modelagem de transportes, já que, a partir dele, pode-se verificar as razões socioeconômicas responsáveis pelas decisões dos usuários da rodovia para a execução de uma viagem.

Frente aos resultados auferidos, que incluem o zoneamento de transportes, as matrizes O/D consolidadas e a base georreferenciada de rodovias, tornou-se possível realizar a alocação de tráfego. Com isso, o zoneamento de transporte definido pela PNT pode ser observado na Figura 2.10.

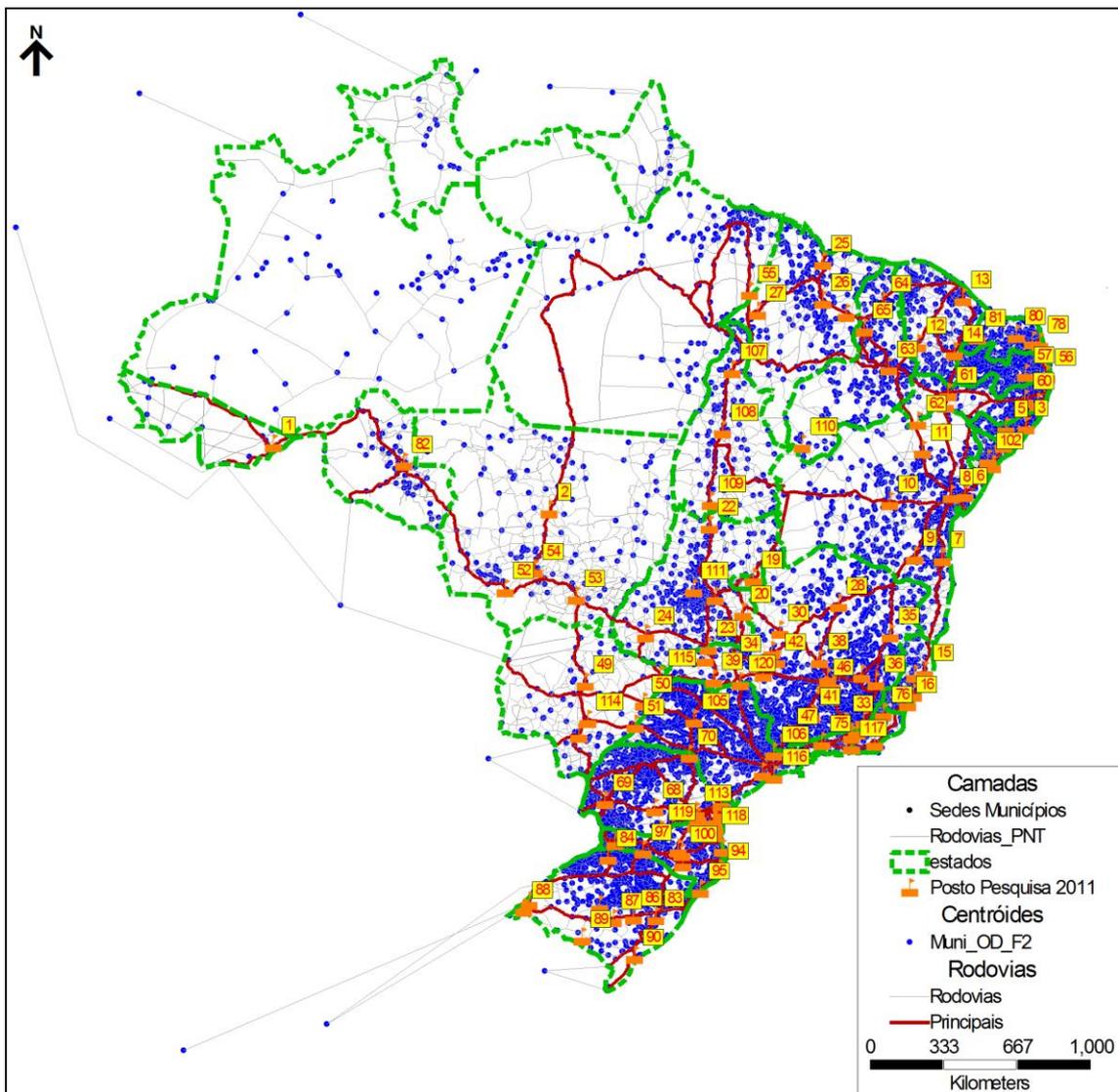


Figura 2.10 – Mapa geral com o zoneamento da PNT.

Fonte: Pesquisa Nacional de Tráfego (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT, 2011)

2.5 Considerações Finais do Capítulo 2

Neste capítulo foram apresentadas informações referentes a pesquisas de tráfego de grande porte em território nacional. Foi possível identificar nessa revisão o objetivo de cada pesquisa, os princípios seguidos pelas equipes de planejamento, a definição da área de estudo e das equipes responsáveis pela aplicação da pesquisa e coleta de dados, além da segmentação do estudo e dos tipos de pesquisa realizadas.

No que tange ao detalhamento das pesquisas, foram identificados aspectos relevantes para a definição dos locais de instalação dos postos de pesquisa, bem como as

ferramentas utilizadas para tanto, o número de postos planejados, de acordo com a amostra definida e o período de aplicação da pesquisa, com a duração da mesma.

Contudo, nessa revisão bibliográfica realizada, não foi possível identificar metodologias específicas para localização de Unidades de Apoio para auxiliar pesquisas de tráfego. Dessa forma, acredita-se que nas pesquisas já realizadas, identificadas nessa revisão, a escolha desses pontos de apoio foi realizada por pessoas de liderança e àquelas envolvidas no planejamento das pesquisas, utilizando conhecimento adquirido de outros trabalhos.

Com isso, no próximo capítulo, torna-se importante na revisão referente aos problemas de localização de facilidades, identificar modelos e aplicações correlacionadas com o problema de pesquisa apresentado, de maneira a subsidiar o desenvolvimento da modelagem matemática proposta nessa dissertação.

3 MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar um levantamento de trabalhos encontrados na literatura científica, referentes ao Problema de Localização de Facilidades – PFLs, de maneira a subsidiar o desenvolvimento do modelo matemático proposto neste trabalho. Com essa finalidade, divide-se o capítulo em quatro seções: (1) inicialmente, são apresentados os conceitos e a importância dos PLFs, destacando suas classificações (tipos) e aplicações em âmbitos públicos e privados; (2) os principais modelos matemáticos relacionados a esses problemas e suas principais características; (3) são apresentadas aplicações, utilizando modelagem matemática, para auxiliar pesquisas de tráfego rodoviário; e por último, (4) as considerações finais do capítulo.

3.1 Conceitos Sobre Localização de Facilidades

O estudo de localização de facilidades, ou instalações, têm se estabelecido como uma importante área da Pesquisa Operacional (MELO *et al.*, 2009). Os PLFs têm como objetivo determinar a localização de facilidades que devem interagir com outros elementos, que podem possuir locais fixos, tais como produtores, normalmente, distantes uns dos outros (COSTA, 2014).

Segundo ARAKAKI e LORENA (2006), os PLFs envolvem a decisão da localização de facilidades que podem ser fábricas, depósitos, antenas, escolas e outros, que devem atender clientes para otimizar algum critério, ou objetivo, sujeito à um conjunto de restrições (IRAWAN e SALHI, 2015). Da mesma forma, esses problemas também são conhecidos como Problemas de Localização-Alocação de Facilidades (LORENA *et al.*, 2001), isso porque além de localizar, geralmente, as facilidades devem ser alocadas aos clientes que devem ser servidos.

CRAINIC (2002) e ARAKAKI (2003) definem que os PLFs podem ser identificados como redes, compostas por pontos (nós ou vértices) que podem representar as facilidades e os clientes que devem ser atendidos e linhas (arcos ou arestas) representando a conexão entre eles. Dessa forma torna-se possível descrever, de forma natural, vias públicas, conexões de sistemas de tubulações de água, redes de energia e outros.

A teoria relacionada à localização de facilidades é extensa e influenciada pela grande diversidade de fatores envolvidos. Com base nos estudos de BALLOU (2006), CHUANG (2001), GALVÃO *et al.* (2003), LOPEZ e HENDERSON (1989), YANG e

LEE (1997), ROMERO (2006), BHATNAGAR *et al.* (2003) e CALDAS *et al.* (2009), alguns itens podem ser elencados como àqueles de maior importância no processo de escolha da localização de facilidades, tais como:

- Áreas para implantação – localização, custos de aquisição, aspectos demográficos e de renda, proximidade com vias urbanas, características geográficas e topológicas;
- Utilidades públicas – disponibilidade de água, energia, telecomunicações e outros;
- Matéria-prima – disponibilidade e custos de insumos nas regiões próximas de cada local potencial,
- Questões mercadológicas – proximidade com o mercado consumidor do serviço oferecido pela facilidade, lojas complementares e centros de distribuição regionais, quantidade e tipos de concorrentes presentes na região e atratividade local;
- Mão-de-obra – disponibilidade e produtividade esperada da mão-de-obra disponível nas proximidades, inclusive níveis de qualificação destes;
- Disponibilidade de transportes e acessibilidade – disponibilidade de outros meios de transportes, senão o rodoviário, fluxos de tráfego de veículos e pedestres, níveis de congestionamento e disponibilidade de estacionamentos;
- Questões legais – zoneamentos territoriais, regulamentações locais de emissões de poluentes e leis e entraves ambientais; e
- Impostos e taxas – políticas governamentais para possíveis incentivos fiscais e tributários, taxas de descarte de rejeitos, impostos em geral.

No que se refere às aplicações dos PLFs, na literatura são encontradas nas mais diversas áreas, tais como: logística de distribuição e integração modal (COSTA *et al.*, 2008; ALUMUR *et al.*, 2012; GUIMARÃES, 2015; GELAREH *et al.*, 2015); localização de centrais de ambulâncias (YIN e MU, 2012; CHANTA *et al.*, 2014; ANSARI *et al.*, 2015); localização de centros de coleta de resíduos (FERRI *et al.*, 2015); e outros. Na sequência são apresentados os principais modelos relacionados aos PLFs e suas principais características.

3.2 Principais Modelos e suas Características

Com relação à taxonomia dos PLFs, na literatura muitos autores apresentam diferentes formas de classificação, na maioria das vezes, complementares. Contudo, algumas destas são comuns em trabalhos científicos, tais como as classificações de BRANDEAU e CHIU (1989) e KRARUP e PRUZAN (1990) que indicam que os PLFs podem ser classificados em Modelos: Planares ou Contínuos; Discretos; Único e Multi Produtos; Estáticos e Dinâmicos; Determinísticos e Estocásticos; Mono e Multi Objetivo; e Capacitados e Não-Capacitados (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Classificação dos PLFs

Modelos	Descrição
Planares ou Contínuos	Nos modelos planares os componentes dos PLFs, as facilidades e pontos de demanda, podem ser representados em um espaço contínuo, ou seja, em qualquer lugar do plano.
Discretos	Os modelos discretos são mais comumente encontrados na literatura. Nestes casos, as facilidades e os pontos de demanda são representados espacialmente por meio de uma rede, também conhecida como grafo. Essas redes são compostas por vértices, que representam as facilidades e pontos de demanda, e arestas que representam as conexões entre eles.
Único e Multi Produtos	Na maioria dos casos, os PLFs indicam que uma facilidade atende à um único produto ou fornecem um único serviço de atendimento. Contudo, em modelos com multiprodutos, os pontos de demanda, ou clientes, podem necessitar de diferentes produtos ou serviços das facilidades.
Estáticos e Dinâmicos	Nos modelos Estáticos, os dados que representam os PLFs não são dependentes do tempo. Em contrapartida, nos Dinâmicos, os dados são dependentes da variável tempo. Nesse caso, os PLFs podem ser utilizados no planejamento, indicando, inclusive, o momento de fechamento de algumas facilidades.
Determinísticos e Estocásticos	Nos modelos denominados determinísticos, parâmetros relacionados aos PLFs, tais como a localização e demanda dos clientes, são conhecidos. No caso dos modelos estocásticos, esses parâmetros são representados de forma probabilística.
Mono e Multi Objetivos	No caso dos PLFs multiobjetivo, é desejável que diferentes funções objetivo sejam otimizadas simultaneamente. Nesse caso, por exemplo, pode-se buscar a minimização de custos e maximização de cobertura, normalmente conflitantes.
Capacitados e Não-Capacitados	Nos modelos capacitados, as facilidades possuem capacidade limitada, ou faixas de capacidade, para atendimento dos pontos demandadores. No entanto, as facilidades podem também ser representadas com capacidade ilimitada, ou pelo menos, suficientemente grande para atendimento de toda a demanda.

Fonte: Elaborado com base nos trabalhos de BRANDEAU e CHIU (1989), KRARUP e PRUZAN (1990), DASKIN (1995), HAMACHER e NICKEL (1996), KLOSE e DREXL (2005), HURTER e MARTINICH (1989), NOGUEIRA (2007), FARAHANI *et al.* (2010), DASKIN (2013), FARAHANI *et al.* (2013) e CAMARA *et al.* (2015)

Na sequência, são apresentadas as formulações matemáticas referentes aos principais modelos de cada um dos três grupos, p -Medianas, Cobertura e p -Centro, de acordo com a classificação de CRAINIC e LAPORTE (1997), MLADENOVIC *et al.*

(2003), DUBKE (2006), DIAZ e FERNANDEZ, (2006), CHAVES *et al.* (2007). Para todos os modelos matemáticos a seguir, considere: J como o conjunto que representa os locais potenciais para receber uma facilidade; e I o conjunto que representa todos os pontos que demandam atendimento, ou serviço, das facilidades.

3.2.1 Modelo p -Medianas

O problema de localização de p -Medianas foi inicialmente proposto na literatura por HAKIMI (1964). Este problema consiste em localizar p facilidades (medianas) de maneira que o somatório das distâncias entre os pontos de demanda e a facilidade mais próxima seja minimizada (REBREYEND *et al.*, 2015).

A formulação matemática do problema p -Medianas pode ser descrita conforme o trabalho de SENNE *et al.* (2005). Para este modelo, considere que:

- d_{ij} – é a distância entre o ponto de demanda $i \in I$ e a facilidade $j \in J$. Esta distância pode representar a distância Euclidiana entre os pontos i e j , por exemplo, mas também, distância rodoviária, conforme necessidade e aplicação do modelo;
- p – é a quantidade de facilidades que deseja-se instalar, abrir, ou localizar;
- x_{ij} – é uma variável de decisão binária que, recebe 1 caso a facilidade $j \in J$ seja designada para atender ao ponto de demanda $i \in I$ e, recebe 0 caso contrário; e
- y_j – é uma variável de decisão binária que recebe 1 caso a localização $j \in J$ seja escolhida para receber uma facilidade.

Nesse caso, a Função Objetivo (3.1) deve minimizar a distância total entre cada uma das facilidades e os pontos de demanda que estas são designadas para atender. Nesse caso a distância representa uma impedância entre os pontos de demanda e da facilidade. Por isso, é comum encontrar aplicações do modelo p -Medianas onde a impedância também é representada pelo custo monetário, tempo, entre outros.

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Após a definição da Função Objetivo, a seguir são descritas as restrições envolvidas. As Restrições (3.2) devem garantir que todos os pontos de demanda $i \in I$ devem ser atendidos por apenas uma facilidade $j \in J$.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

De maneira complementar às Restrições (3.2), é necessário garantir que um ponto de demanda $i \in I$ só seja atendido por uma facilidade $j \in J$ se esta for aberta (Restrições 3.3).

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.3)$$

A Restrição (3.4) garante que p facilidades serão abertas.

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3.4)$$

As Restrições (3.5) e (3.6) garantem que as variáveis do modelo matemático são todas binárias.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.5)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.6)$$

Ainda relacionado ao problema de p -Medianas, uma variação é comumente encontrada na literatura, a do problema de p -Medianas Capacitado, que passa a considerar que cada ponto $i \in I$ possui uma demanda q_i e que cada uma das facilidades $j \in J$, que podem ser abertas, possuem uma capacidade máxima de atendimento Q_j (LORENA e SENNE, 2004; YAGHINI *et al.*, 2013).

Sendo assim, pode-se descrever o p -Medianas Capacitado por meio das Expressões (3.1) – (3.6), adicionando as Restrições (3.7). As novas restrições garantem que a quantidade total demandada pelos pontos $i \in I$ atendidos por uma facilidade $j \in J$ deve ser menor ou igual à sua capacidade máxima.

$$\sum_{j \in J} q_i x_{ij} \leq Q_j y_j \quad \forall i \in I \quad (3.7)$$

3.2.2 Modelos de Cobertura

Relacionado aos problemas de cobertura, as primeiras referências encontradas na literatura são os trabalhos de BERGE (1957) e HAKIMI (1965), entretanto, sua primeira formulação matemática foi proposta por TOREGAS *et al.* (1971). Para esses modelos, deve-se introduzir o conceito de Cobertura, que neste caso, está relacionada aos pontos de demanda que cada uma das facilidades consegue atender. Ou seja, um ponto de demanda $i \in I$ é dito coberto por uma facilidade $j \in J$, se esta puder atendê-lo.

De maneira análoga, denomina-se como cobertura de uma facilidade $j \in J$, o conjunto de pontos de demanda que esta facilidade pode atender. Sendo assim, para cada ponto de demanda $i \in I$ existe um subconjunto de $j \in J$, denominado N_j , que representa as facilidades que podem atender ao ponto i .

. Dessa forma, para este modelo, considere que:

- a_{ij} – é um parâmetro do modelo que, recebe 1 se uma facilidade $j \in J$ pode atender a um ponto de demanda $i \in I$ e, recebe 0 caso contrário;
- f_j – é o custo de abertura de uma facilidade na localização $j \in J$; e
- X_j – variável de decisão binária que, recebe 1 se uma facilidade for aberta no local $j \in J$ e, recebe 0 caso contrário.

Assim, o modelo matemático que representa o Problema de Cobertura de Conjuntos é apresentado a seguir. A Função Objetivo (3.8) deve minimizar o custo total de abertura das facilidades.

$$\text{Minimizar } \sum_{j \in J} f_j X_j \quad (3.8)$$

A Restrições (3.9) garantem que todos os pontos de demanda $i \in I$ devem ser atendidos por pelo menos uma facilidade, e ainda, que o ponto de demanda será atendido por uma facilidade cuja cobertura inclui o referido ponto de demanda.

$$\sum_{j \in J} a_{ij} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.9)$$

As Restrições (3.10) garantem que as variáveis de decisão do modelo matemático são binárias.

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

O Problema de Cobertura de Conjuntos possui uma variação importante que é o Problema de Localização de Máxima Cobertura, proposto por CHURCH e REVELLE (1974), que tem como característica principal, a busca pelo atendimento da maior demanda possível. Neste problema também prevalecem o conceito de cobertura e o número fixo de facilidades que podem ser abertas.

Dessa forma, considere:

- a_{ij} – é um parâmetro do modelo que, recebe 1 se uma facilidade $j \in J$ pode atender a um ponto de demanda $i \in I$ e, recebe 0 caso contrário;
- h_i – é a quantidade demandada por um ponto $i \in I$;
- p – é a quantidade de facilidades que deseja-se instalar, abrir, ou localizar;
- X_j – é uma variável de decisão, conforme descrito anteriormente nesta seção;
- e
- Z_i – é uma variável de decisão que, recebe 1 se o ponto de demanda é atendido e, recebe 0 caso contrário.

A formulação matemática do Problema de Localização de Máxima Cobertura está descrita a seguir. A Função Objetivo (3.12) deve maximizar a quantidade de pontos de demanda atendidos pelas facilidades abertas.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} h_i Z_i \quad (3.12)$$

As Restrições (3.13) garantem que um ponto de demanda $i \in I$ só pode ser atendido por uma facilidade $j \in J$ que seja aberta, e ainda, cuja cobertura atende ao local de demanda. Nesse caso, o parâmetro a_{ij} é o responsável por garantir que as coberturas sejam respeitadas.

$$Z_i \leq \sum_{j \in J} a_{ij} X_j \quad \forall i \in I \quad (3.13)$$

A Restrição (3.14) garante que a quantidade máxima de facilidades abertas seja respeitada. A quantidade de facilidades deve ser menor ou igual a p .

$$\sum_{j \in J} X_j \leq p \quad (3.14)$$

As Restrições (3.15) e (3.16) garantem que as variáveis de decisão do modelo são do tipo binárias.

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.15)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (3.16)$$

3.2.3 Modelo p -Center

O problema de localização do tipo p -Center consiste em localizar p facilidades, que devem ser alocadas aos pontos de demanda, de maneira a minimizar a máxima distância entre cada ponto de demanda e a facilidade que o atende (SUZUKI e DREZNER, 1996). De acordo com TANSEL *et al.* (1983) pode-se considerar também como a minimização da máxima perda para fornecimento de um bem ou serviço, por uma facilidade.

Para este modelo, devemos considerar que:

- W – é a máxima distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e a facilidade no local $j \in J$ mais próxima deste;
- Y_{ij} – é a fração da demanda de um ponto $i \in I$ atendido por uma facilidade na localização $j \in J$;
- d_{ij} – é a distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e uma facilidade no local $j \in J$;
- p – é a quantidade de facilidades que devem ser abertas; e
- X_j – é uma variável de decisão que, recebe 1 caso uma facilidade seja aberta no local $j \in J$ e, recebe 0 caso contrário;

Dessa forma, o modelo matemático é apresentado a seguir. A Função Objetivo (3.17) deve minimizar a máxima distância entre um ponto de demanda e a facilidade mais próxima que o atende.

$$\text{Minimizar } W \quad (3.17)$$

As Restrições (3.18) garantem que cada ponto de demanda deve ser completamente atendido. Nesse caso o somatório das frações de atendimento deve ser igual a 1.

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.18)$$

A Restrição (3.19) garante que p facilidades serão abertas.

$$\sum_{j \in J} X_j = p \quad (3.19)$$

As Restrições (3.20) garantem que a demanda de um ponto $i \in I$ só pode ser atendida por uma facilidade $j \in J$ se esta estiver aberta.

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.20)$$

As Restrições (3.21) garantem que a máxima distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e a facilidade de atendimento mais próxima deve ser maior que a distância entre qualquer outro ponto de demanda e a facilidade que o atende.

$$W \geq \sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i \in I \quad (3.21)$$

As Restrições (3.22) garantem que a variável de decisão $X_j, \forall j \in J$, seja binária e as Restrições (3.23) garantem que as variáveis de decisão envolvidas são pertencentes ao conjunto dos números reais positivos (\mathbb{R}^+).

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.23)$$

3.3 Aplicação de Modelos de Localização-Alocação de Facilidades em Pesquisas de Tráfego Rodoviário

Relacionado aos modelos matemáticos de localização para aplicações em pesquisas de tráfego, localização de postos de pesquisa ou contadores de tráfego, os estudos encontrados na literatura estão voltados, principalmente, para localização de contadores automáticos de veículos.

YANG e ZHOU (1998) propuseram formalmente o *Traffic Counting Location Problem* (TCL) que, desde então, tem sido amplamente estudado (KIM *et al.*, 2003; CHOOTINAN *et al.*, 2005; GAN *et al.*, 2005; SUN *et al.*, 2012), com o propósito de determinar de maneira ótima, a quantidade e localização de postos (estações) de contagem de tráfego que permitam maior cobertura da rede de transportes para estimativa de matrizes O/D (CHEN *et al.*, 2007). O TCL pode, ainda, ser encontrado como *Sensor Location Problem* (SLP), tais como nos estudos de BIANCO *et al.* (2001), ZHOU e LIST (2010) e BERA e RAO (2011).

Contudo, conforme introduzido no Capítulo 2, aplicações relacionadas à localização de Unidades de Apoio para atendimento de pesquisas de tráfego, realizadas por meio de entrevistas, representam uma lacuna na literatura. Com essa finalidade, foi o identificado o Problema de Localização-Alocação de Organizações Militares a Postos de Pesquisa (PL-AOMPP) proposto por CAMARA *et al.* (2015), que considera os conceitos apresentados nas seções anteriores e se constitui como um primeiro trabalho científico desta dissertação, publicado no ano de 2015.

O modelo apresentado por esses autores busca, dado um conjunto de locais que possuem Organizações Militares – OM, determinar quais OM devem ser utilizadas para atender a um conjunto de postos de pesquisa de tráfego em território nacional, considerando a capacidade das OM e sua área de cobertura. Como aplicação para o modelo, os autores utilizaram dados preliminares da nova pesquisa prevista pelo DNIT para os anos de 2016 e 2017, com um total de 300 postos de pesquisa e 221 OM disponíveis para atendimento.

No total, as OM possuem 395 pelotões de militares, contudo, as áreas de cobertura para atendimento dos postos mostraram-se como elementos restritivos da aplicação, inviabilizando o atendimento de todos os postos.

CAMARA *et al.* (2015) estabeleceram sete cenários para aplicação do modelo, variando, nestes cenários, a quantidade máxima de OM que poderiam ser selecionadas

para atendimento dos postos. O Quadro 3.2 apresenta o resumo dos resultados da aplicação do modelo para os sete cenários estabelecidos.

Quadro 3.2 – Resumo dos resultados da aplicação de CAMARA *et al.* (2015)

Cenário	Tempo Total de Deslocamento (Min)	MAX_{OM}	Total de Postos de Pesquisa Atendidos	Total de OM Utilizadas
1	6.174,74	30	90	30
2	30.729,42	60	178	60
3	40.731,50	90	231	90
4	46.102,73	120	261	120
5	44.822,99	150	286	150
6	42.848,17	180	286	172
7	42.848,17	221	286	172

Fonte: Adaptado de CAMARA *et al.* (2015)

Por meio do Quadro 3.2 é possível observar que, mesmo para o Cenário 7 que permite utilizar todas as OM disponíveis, a quantidade máxima de postos atendidos foi igual a 286. Dessa forma, os resultados mostram que, para atendimento de todos os postos, considerando, dentre outros fatores, que apesar do número de OM disponíveis ser igual a 221, acredita-se que um número bem inferior deve ser estabelecido como quantidade máxima permitida para ser utilizada, tendo em vista que o EB possui outras demandas para uso seus militares.

Com isso, evidencia-se a necessidade de divisão dos 300 postos em estágios, ou etapas, de realização. Tal fato justifica a necessidade do desenvolvimento de um novo modelo matemático para localização das OM e alocação aos postos que considere uma nova pesquisa de tráfego com múltiplos estágios.

3.4 Considerações Finais do Capítulo 3

Neste capítulo foram apresentados conceitos e modelos matemáticos para problemas de localização de facilidades existentes na literatura. Com o estudo desses modelos referentes às três principais classes de problemas, *p*-Medianas, de Cobertura e *p*-Centro, foi possível extrair elementos consubstanciados para desenvolvimento do modelo matemático a ser apresentado no próximo capítulo.

No PLUAAPT, as principais características desses modelos apresentados estão relacionadas com o problema de *p*-Medianas Capacitado, no que se refere aos mínimos

custos para a função objetivo e nas restrições que garantem o atendimento de todos os pontos de demanda e capacidade de atendimento das facilidades. Já para o problema de Cobertura, as principais características correlacionadas com o PLUAAPT são a do modelo de Máxima Cobertura. Neste, as facilidades só podem atender pontos de demanda em sua área de cobertura e, uma quantidade máxima de facilidades selecionadas deve ser respeitada.

Além disso, foi identificado na literatura uma abordagem relacionada com a localização de Unidades de Apoio em pesquisas de tráfego, cujos resultados comprovam a necessidade de um modelo matemático que aborde as pesquisas de tráfego com múltiplos estágios. Sendo assim, o próximo capítulo utiliza desses elementos identificados para subsidiar a modelagem matemática proposta.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a modelagem matemática proposta para localização de Unidades de Apoio para atendimento de postos de pesquisa de tráfego que, leva em consideração, os conceitos apresentados nos capítulos anteriores. Com este fim, divide-se o capítulo em três seções: (1) descrição do problema com as premissas e principais questões que devem ser consideradas na modelagem bem como os dados de entrada do modelo matemático; (2) modelo matemático proposto para o PLUAAPT e seu respectivo detalhamento da função objetivo, das restrições e do domínio das variáveis; e (3) considerações finais do capítulo.

4.1 Descrição do Problema, Premissas e Parâmetros Adotados

O PLUAAPT tem como objetivo determinar, dentre um conjunto de possíveis locais, aqueles que devem ser utilizados como Unidades de Apoio para concentrar equipes de pesquisadores alocadas a postos de pesquisa de tráfego rodoviário. No entanto, essas pesquisas também podem ser realizadas em diferentes instantes temporais, aqui denominados estágios, por isso, além dos locais, o modelo matemático deve indicar em quais estágios cada unidade de apoio deve ser utilizada (ou aberta, conforme literatura científica citada no Capítulo 3).

No que concerne aos postos de pesquisa, no caso de pesquisas de tráfego com múltiplos estágios, a modelagem matemática deve permitir que o conjunto de postos, referente a cada um dos estágios, seja indicado previamente, e ainda, ser capaz de indicar em qual estágio cada posto deve ser atendido caso não seja estabelecido a priori, tomando como base os custos logísticos a serem minimizados.

Quanto as Unidades de Apoio, as principais características associadas estão relacionadas à capacidade e à cobertura de atendimento. No que diz respeito à capacidade, cada uma dessas unidades possui uma quantidade máxima de postos de pesquisa que poderá realizar atendimento, ou simplesmente, que poderá ser alocada. Já a cobertura, relaciona-se com a área de cobertura de cada unidade, que pode limitar o conjunto de postos possíveis de serem atendidos. Nesse sentido, a cobertura de uma unidade refere-se ao conjunto de postos que tal unidade pode atender.

Feitas essas observações, para o PLUAAPT anteriormente descrito, consideram-se as seguintes premissas para o desenvolvimento do modelo matemático:

- i. As Unidades de Apoio selecionadas para atender a postos de pesquisa de tráfego rodoviário devem ser escolhidas a partir de um conjunto de pontos candidatos pré-estabelecidos;
- ii. A escolha pela utilização de uma determinada unidade de apoio deve estar associada ao custo de deslocamento das equipes de pesquisadores até o posto de pesquisa ao qual estas foram designadas;
- iii. Deve-se considerar, também, o custo de utilização (abertura) de uma unidade de apoio. No caso de pesquisas com múltiplos estágios, a reutilização de unidades em diferentes estágios pode implicar na redução de custos, como, por exemplo, treinamento de pesquisadores e compra de materiais acessórios como mesas e cadeiras. Tal fato torna interessante que unidades selecionadas atendam a postos de pesquisa em diferentes estágios;
- iv. A quantidade de postos de pesquisa pode implicar na necessidade de divisão da pesquisa em múltiplos estágios. Nesse caso, o conjunto de postos que deve ser atendido em cada estágio pode ou não ser definido previamente. Contudo, a quantidade de postos que deverá compor cada estágio deve ser pré-estabelecida;
- v. Pode ser interessante que o planejamento da pesquisa de tráfego rodoviário considere, por diferentes motivos, como limitações orçamentárias, por exemplo, que um número máximo de Unidades de Apoio seja utilizado em todos os estágios ou até mesmo que um número máximo de Unidades de Apoio seja empregado por estágio. Tal premissa deve ser, fundamentalmente, contemplada no modelo matemático;
- vi. Além da capacidade de cada unidade de apoio, deve-se considerar sua área de cobertura. Esta área pode ser definida por um raio máximo de cobertura, ou mesmo, como um conjunto de postos possíveis de atendimento como nos modelos apresentados no Capítulo 2; e
- vii. Como regra geral, todos os postos de pesquisa devem ser atendidos por uma unidade de apoio. Entretanto, no caso de impossibilidade de atendimento por falta de capacidade operacional ou por restrições de cobertura (falta de Unidades de Apoio para atendimento de uma determinada região), o modelo matemático deve indicar, com mecanismos específicos, quais foram os postos de pesquisa não atendidos.

Dessa forma, seja S o conjunto que representa todas as Unidades de Apoio disponíveis para utilização, P o conjunto composto por todos os postos de pesquisa de tráfego que devem ser atendidos, N o conjunto cujos elementos representam o número de estágios em que a pesquisa será realizada; e Q um conjunto cujos elementos indicam a quantidade de estágios que cada um dos pontos de apoio pode ser usado. Para exemplificar, se uma pesquisa possui quatro estágios, então $N = \{1, 2, 3, 4\}$ e, cada unidade de apoio pode: não ser utilizada, ser utilizada uma única vez, duas vezes, três vezes ou até mesmo quatro vezes (em todos os estágios). Neste caso, $Q = \{0, 1, 2, 3, 4\}$.

Com base nas definições acima, considera ainda que:

- U_p : representa o conjunto de Unidades de Apoio candidatas a atender ao posto de pesquisa $p \in P$, tal que, $U_p \subseteq S$. Uma unidade candidata a atendimento de um posto de pesquisa significa que o posto de pesquisa em questão pertence à área de cobertura da unidade de apoio;
- A_n : representa o conjunto de postos que devem ser atendidos em cada estágio $n \in N$ da pesquisa, tal que, $A_n \subseteq P$. Caso seja interessante no planejamento, pode-se deixar em aberto o estágio da pesquisa em que alguns postos serão atendidos. Nesse caso, todos os postos cujos estágios não estão definidos devem estar contidos em $A_n \forall n \in N$;
- *dummy*: representa uma unidade de apoio fictícia, de capacidade infinita, utilizada como forma de atender às exigências da Premissa (vii). Sendo assim, a unidade de apoio *dummy* só deve ser utilizada em casos de falta de capacidade de atendimento por questões de mão-de-obra ou de cobertura. Entretanto, uma penalidade deve estar associada a utilização de unidade;
- c_{sp} : representa o custo de deslocamento de uma equipe de pesquisadores de uma determinada unidade de apoio $s \in S$ até um posto de pesquisa $p \in P$, sendo $c_{sp} \geq 0$;
- γ : representa a penalidade (custo) de alocação de uma unidade de apoio *dummy* a um posto de pesquisa. A referida penalidade deve ser representada por um valor elevado, comparado com uma alocação comum, isso porque, como citado anteriormente, a alocação a partir de um local fictício só deve ser realizada em casos de falta de capacidade operacional ou por falta de cobertura;

- θ : representa a penalidade (custo) de utilização, ou abertura, de uma OM denominada *dummy*;
- δ_{qs} : representa o custo de utilização de uma determinada unidade de apoio. Esse custo está associado com a quantidade de estágios $q \in Q$ que cada unidade de apoio $s \in S$ é utilizada durante toda a pesquisa. Neste caso $\delta_{qs} \geq 0 \forall q \in Q, s \in S$;
- $MAXUA_n$: número máximo de Unidades de Apoio que podem ser abertas por estágio $n \in N$, sendo $MAXUA_n \geq 0$;
- MAX : número máximo de Unidades de Apoio distintas que podem ser abertas durante toda a pesquisa, sendo $MAX \geq 0$;
- $QTDP_n$: quantidade de postos de pesquisa que devem ser atendidos em cada um dos estágios $n \in N$, sendo $QTDP_n \geq 0$;
- κ_{ns} : representa a quantidade de equipes de pesquisadores que, para cada estágio $n \in N$ da pesquisa, poderá ser disponibilizada pela unidade de apoio $s \in S$ para atendimento dos postos de pesquisa;
- $x_{nsp} \in \{0,1\}$: variáveis de decisão binárias. Caso uma unidade de apoio $s \in S$ seja alocada à um posto de pesquisa $p \in P$ no estágio $n \in N$, então $x_{nsp} = 1$, caso contrário $x_{nsp} = 0$;
- $y_{ns} \in \{0,1\}$: variáveis de decisão binárias. Caso uma unidade de apoio $s \in S$ seja utilizada no estágio $n \in N$, então $y_{ns} = 1$, caso contrário, $y_{ns} = 0$; e
- $l_{qs} \in \{0,1\}$: variáveis de decisão binárias. Caso uma determinada unidade de apoio $s \in S$ seja escolhida para utilização em $q \in Q$ estágio(s) da pesquisa, então $l_{qs} = 1$, caso contrário $l_{qs} = 0$.

Em consonância com a descrição do problema apresentado e, ao mesmo tempo, atendendo às premissas estabelecidas, o modelo matemático proposto para o PLUAAPT é apresentado detalhadamente na seção a seguir.

4.2 Modelo Matemático

Com base na descrição do PLUAAPT, a função objetivo é apresentada na Expressão (4.1).

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar } z = & \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} c_{sp} x_{nsp} + \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} \delta_{qs} l_{qs} \\
& + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \gamma x_{n,dummy,p} + \sum_{n \in N} \theta y_{n,dummy}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

A Função Objetivo (1), que deve ser minimizada, representa o custo total que envolve deslocamento dos pesquisadores e utilização de Unidades de Apoio. Esta função é composta por quatro termos:

- o primeiro refere-se aos custos de deslocamento das equipes de pesquisadores, a partir do local escolhido como unidade de apoio até os postos de pesquisa alocados;
- o segundo consiste nos custos associados à utilização das unidade de apoio em todos os estágios, ou seja, está relacionado com a quantidade de vezes (quantidade de estágios) que cada unidade de apoio foi utilizada; e
- os últimos dois termos (o terceiro e quarto), referem-se às penalidades inerentes à alocação de Unidades de Apoio *dummy* a postos de pesquisa, e também, da utilização desses locais nos estágios da pesquisa.

Na sequência, após definição da Função Objetivo, são descritas as restrições do PLUAAPT. O conjunto de Restrições (4.2) garante que todos os postos de pesquisa sejam atendidos uma única vez. Para tal atendimento, uma unidade de apoio, convencional¹ ou *dummy*, deve ser alocada ao posto de pesquisa.

$$\sum_{n \in N} \sum_{s \in U_p} x_{nsp} + \sum_{n \in N} x_{n,dummy,p} = 1 \quad \forall p \in P \tag{4.2}$$

O conjunto de Restrições (4.3) garante que, em cada estágio $n \in N$, somente os postos de pesquisa planejados para o referido estágio serão atendidos. Além disso, a quantidade de postos atendidos em cada estágio deve respeitar o parâmetro $QTDP_n$. Da mesma forma que nas Restrições (4.2), as variáveis relacionadas à unidade de apoio *dummy* devem ser consideradas.

¹ Uma unidade de apoio dita convencional é aquela cuja localização pertence ao Conjunto S .

$$\sum_{p \in A_n} \sum_{s \in U_p} x_{nsp} + \sum_{p \in A_n} x_{n,dummy,p} = QTDP_n \quad \forall n \in N \quad (4.3)$$

As Restrições (4.4) garantem que, para cada estágio da pesquisa $n \in N$, a quantidade máxima de Unidades de Apoio, $MAXUA_n$, deve ser respeitada. Com esse conjunto de restrições, limites orçamentários impostos, para um ou mais estágios da pesquisa, podem ser resolvidos com a redução de Unidades de Apoio utilizadas no respectivo estágio.

$$\sum_{s \in S} y_{ns} \leq MAXUA_n \quad \forall n \in N \quad (4.4)$$

De forma similar às Restrições (4.4), a Restrição (4.5) garante que uma quantidade máxima de Unidades de Apoio distintas, MAX , seja utilizada em todos os estágios da pesquisa de tráfego. Esse limite pode ser definido por diversos motivos, tais como restrições orçamentárias, ou até mesmo, mão-de-obra disponível, caso seja necessário, por exemplo, um gestor para cada unidade escolhida.

$$\sum_{s \in S} \sum_{q \in Q} l_{qs} \leq MAX \quad (4.5)$$

O conjunto de Restrições (4.6) garante que, para cada estágio $n \in N$ e para cada unidade de apoio $s \in \{U_p, dummy\}$, um posto de pesquisa só poderá ser atendido por uma unidade s , se, e somente se, esta estiver disponível e for selecionada para receber uma unidade de apoio no referido estágio n . Dessa forma, fica proibida a alocação de Unidades de Apoio não selecionadas a postos de pesquisa.

$$x_{nsp} \leq y_{ns} \quad \forall n \in N, s \in \{U_p, dummy\}, p \in P \quad (4.6)$$

As Restrições (4.7) estão relacionadas com a capacidade operacional de cada unidade de apoio. Dessa forma, em cada estágio $n \in N$, a quantidade de postos de pesquisa atendidos por uma unidade de apoio deve respeitar a quantidade disponível de equipes de pesquisadores (capacidade da unidade de apoio).

$$\sum_{p \in P / s \in U_p} x_{nsp} \leq \kappa_{ns} y_{ns} \quad \forall n \in N, s \in S \quad (4.7)$$

Os conjuntos de Restrições (4.8) e (4.9) garantem, conjuntamente, que o número de estágios que uma unidade de apoio for utilizada deve ser igual à quantidade definida por $q l_{qs}$. Além disso, as Restrições (4.9) garantem que um local s pode ou não ser selecionado durante toda a pesquisa para uma unidade de apoio.

$$\sum_{n \in N} y_{ns} - \sum_{q \in Q} q l_{qs} = 0 \quad \forall s \in S \quad (4.8)$$

$$\sum_{q \in Q} l_{qs} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (4.9)$$

Por último, as Restrições (4.10), (4.11) e (4.12) garantem o domínio das variáveis de decisão do modelo matemático.

$$x_{nsp} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, s \in \{S, dummy\}, p \in P \quad (10)$$

$$y_{ns} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, s \in \{S, dummy\} \quad (11)$$

$$l_{qs} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, s \in \{S, dummy\} \quad (12)$$

4.3 Considerações Finais do Capítulo 4

Neste capítulo apresentou-se a modelagem matemática proposta para localização de Unidades de Apoio para atendimento de postos de pesquisa de tráfego rodoviário. Para isso, foi estabelecido um conjunto de sete premissas referentes às pesquisas de tráfego, que são base para compreensão do seu funcionamento, aspectos relacionados aos custos, de deslocamento e utilização das Unidades de Apoio e características que podem limitar as pesquisas (restrições do problema).

Com base nas premissas adotadas, foram definidos os elementos que compõem o modelo matemático: os conjuntos que representam as Unidades de Apoio, os postos de pesquisa, o número de estágios e a quantidade estágios que cada Unidade de Apoio pode ser utilizada durante toda a pesquisa; os parâmetros de entrada do modelo; e as variáveis de decisão envolvidas. Sendo assim, com a definição e compreensão de todos esses elementos enunciados acima, o próximo capítulo apresenta aplicações computacionais

para o PLUAAPT com objetivo de validar o modelo proposto e avaliar seus resultados para uma aplicação real prevista e outra projetada.

Dessa forma, o resumo do modelo matemático proposto, referente à Função Objetivo e às Restrições, é apresentado na Figura 4.1.

Função Objetivo:

Minimizar Z =

$$\sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} c_{sp} x_{nsp} + \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} \delta_{qs} l_{qs} + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \gamma x_{n,dummy,p} + \sum_{n \in N} \theta y_{n,dummy}$$

Sujeito a:

$$\sum_{n \in N} \sum_{s \in U_p} x_{nsp} + \sum_{n \in N} x_{n,dummy,p} = 1 \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{p \in A_n} \sum_{s \in U_p} x_{nsp} + \sum_{p \in A_n} x_{n,dummy,p} = QTDP_n \quad \forall n \in N$$

$$\sum_{s \in S} y_{ns} \leq MAXUA_n \quad \forall n \in N$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{q \in Q} l_{qs} \leq MAX$$

$$x_{nsp} \leq y_{ns} \quad \forall n \in N, s \in \{U_p, dummy\}, p \in P$$

$$\sum_{p \in P / s \in U_p} x_{nsp} \leq \kappa_{ns} y_{ns} \quad \forall n \in N, s \in S$$

$$\sum_{n \in N} y_{ns} - \sum_{q \in Q} q l_{qs} = 0 \quad \forall s \in S$$

$$\sum_{q \in Q} l_{qs} \leq 1 \quad \forall s \in S$$

$$x_{nsp} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, s \in \{S, dummy\}, p \in P$$

$$y_{ns} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, s \in \{S, dummy\}$$

$$l_{qs} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, s \in \{S, dummy\}$$

Figura 4.1 – Modelo matemático proposto para o PLUAAPT

5 APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MODELO

Este capítulo tem como objetivo apresentar aplicações do modelo matemático proposto, considerando casos reais, que permitem avaliar suas soluções e complexidades. Sendo assim, este capítulo está dividido em duas seções: (1) descrição da aplicação real do modelo matemático e apresentação dos cenários proposto, com seus parâmetros, características e objetivos; e (2) apresentação dos resultados e as análises dos cenários propostos.

5.1 Descrição dos Cenários Propostos

Nesse capítulo, são propostos três cenários para aplicação do modelo matemático. O primeiro é referente a uma aplicação utilizando os dados da Pesquisa Nacional de Tráfego de 2011, visando, por meio de comparação de resultados, validar o modelo matemático proposto. O segundo trata-se de uma aplicação com base em informações preliminares de uma nova pesquisa prevista para os próximos anos. Por último, o terceiro, refere-se a uma aplicação para uma pesquisa fictícia, de maior porte, comparado com os casos anteriores. Sendo assim, as Unidades de Apoio descritas no Capítulo 4 são agora representadas por OM do EB.

Nas subseções seguintes são apresentados os parâmetros comuns aos três cenários propostos para validação do modelo matemático recomendado para o PLUAAPT, auxiliando assim, no planejamento de pesquisas de tráfego com múltiplos estágios. Para cada cenário são apresentados os parâmetros utilizados e as respectivas descrições, características e particularidades.

5.1.1 Parâmetros comuns para todos os três cenários propostos

Os diferentes cenários são apresentados, entre outros motivos, para permitir uma avaliação dos resultados do modelo matemático para diferentes situações como, pesquisas com diferentes quantidades de postos e estágios, diferentes parâmetros de custo, ou mesmo, diferentes quantidades de postos por estágio da pesquisa. No entanto, alguns parâmetros comuns foram adotados para todos os cenários.

No que se refere às OM disponíveis e suas capacidades, destaca-se que se tratam de dados sigilosos e estratégicos do Exército Brasileiro. Adotou-se então aqueles disponibilizados em CAMARA *et al.* (2015) que se referem a 221 OM distribuídas pelo território nacional com suas respectivas capacidades em quantidade de pelotões.

CAMARA *et al.* indicam que, cada OM tem uma capacidade disponível que varia de 1 a 3 pelotões. Essas 221 OM representam aquelas disponibilizadas pelo EB para ceder militares para realização das pesquisas.

Além disso, considera-se que, para cada estágio das pesquisas nos cenários propostos, todas as OM estão disponíveis, não havendo diferenciação de disponibilidade por estágio, ou seja, $MAXUA_n = MAX = |S|, \forall n \in N$, sendo que $|\cdot|$ representa a quantidade de elementos do conjunto-argumento.

No que tange aos custos, nessa aplicação real, a estimativa do custo de deslocamento das equipes de pesquisadores (os pelotões de militares), pode ser considerada mais precisa quando comparada com os custos de utilização de uma OM. Pode-se afirmar isso pois, de acordo com informações da PNT de 2011, são necessários dois caminhões do tipo *Truck* para transportar os militares e equipamentos necessários para montagem dos postos, o que facilita a precisão na estimativa dos custos.

Dessa forma, seja $distância_{sp}$ a distância em km entre uma unidade de apoio $s \in S$ e um posto de pesquisa $p \in P$. Assim, ao considerar que o consumo médio de um caminhão *Truck* é de 2,5 km/litro (BATAGLIN *et al.*, 2014) e que o preço médio do combustível (Óleo Diesel) no Brasil é de R\$ 2,96/litro (CNT, 2015), tem-se que o custo de deslocamento c_{sp} é dado por:

$$c_{sp} = \frac{2 \cdot 2,96 \text{ distância}_{sp}}{2,5} = 2,37 \text{ distância}_{sp} \text{ R\$/km} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (5.1)$$

Com isso, para realizar o cálculo do custo de deslocamento, então, é necessário conhecer a matriz de distâncias entre OM e Postos de Pesquisa. Nesse sentido, a partir dos dados georreferenciados, o *software* TransCAD 5.0 (CALIPER, 2008) foi utilizado para obtenção da referida matriz de distâncias. Vale ressaltar que, para tal operação, adotou-se as distâncias Euclidianas entre as unidades e os postos, pois a rede rodoviária disponível não apresentava conectividade adequada entre os pontos da rede que permitisse o cálculo das distâncias reais.

Destaca-se que, no caso da aplicação do modelo com finalidade científica, a utilização do modelo matemático nos experimentos computacionais, ainda que, em cenários com dados próximos ou coincidentes de situações reais, não tem seus resultados e análises prejudicados pelo uso das distâncias Euclidianas.

Contudo, na utilização do modelo, efetivamente, no planejamento de transportes, tais distâncias devem ser consideradas como um parâmetro de grande relevância. Isso porque, principalmente, em estudos com ampla extensão territorial, dentre outros fatores, a densidade de rodovias pode ser diferenciada em função das regiões. Como exemplo, cita-se a região Norte do Brasil que apresenta baixa densidade de rodovias se comparada com as demais e, além disso, as características geográficas da região podem ser impeditivas, até mesmo para ligar dois pontos próximos um do outro.

Com isso, o Cenário 1 propõe uma comparação de resultados entre a solução adotada na pesquisa realizada em 2011, onde não houve utilização de modelos matemáticos, com a solução obtida por meio do modelo proposto. Para este caso, o uso das distâncias Euclidianas não invalida a comparação, visto que, a mesma matriz de distâncias foi usada para os cálculos de custos da solução real adotada em 2011, conforme pode ser melhor observado na Seção 5.2.2.

Já o custo de utilização de uma Unidade de Apoio, além de ser dependente da quantidade de vezes que cada unidade é empregada em diferentes estágios da pesquisa, trata-se de um valor que está sujeito a muitos fatores de difícil estimativa, tais como, treinamento dos pesquisadores, custos de gerenciamento de equipe, materiais utilizados, entre outros.

Por esse motivo, para cada um dos cenários propostos, foram criadas cinco variações desses custos. Os custos unitários, dos Grupos de Custos, foram determinados, de maneira que, permitiu-se a avaliação desses custos a partir de um valor unitário bem pequeno até um valor consideravelmente alto, permitindo uma análise mais completa do impacto desses custos. Sendo assim, conforme apresentado na Tabela 5.1, cinco Grupos de Custos foram adotados para os experimentos computacionais. Cabe, entretanto, destacar que esses custos precisam ser mensurados de acordo com a pesquisa de tráfego a ser realizada para que o modelo matemático possa fornecer resultados confiáveis.

Tabela 5.1 – Grupos de Custos para utilização de OM por quantidade de estágios

Grupo de Custos (R\$)	Quantidade de estágios atendidos por uma unidade de apoio				
	1	2	3	4	5
Grupo 1	10	18	24	28	30
Grupo 2	50	90	120	140	150
Grupo 3	250	450	600	700	750
Grupo 4	1250	2250	3000	3500	3750
Grupo 5	6250	11250	15000	17500	18750

O Grupo 1 possui os menores valores unitários (uso de uma OM por estágio). Por outro lado, o Grupo 5 apresenta os maiores valores. O multiplicador cinco foi empregado para obtenção dos custos intermediários. Por exemplo, o Grupo 2 possui valores unitários cinco vezes maior que aqueles do Grupo 1, o Grupo 3 possui valores unitários cinco maior que aqueles do Grupo 2, e assim sucessivamente até o Grupo 5. Com isso, espera-se criar condições adequadas para avaliar um possível *trade-off* entre a quantidade de OM utilizadas durante toda a pesquisa e as distâncias totais percorridas pelas tropas de militares.

O *trade-off* esperado, nesse caso, refere-se a possibilidade de que o modelo matemático indique o uso de um número elevado de OM quando seus custos de utilização forem baixos (resultado esperado para o Grupo 1) e, à medida que esses custos crescem, até o Grupo 5, possivelmente o número de OM adotadas seja menor, porém, deve-se observar um aumento nas distâncias a serem percorridas, o que, por consequência, aumentaria os custos de deslocamento.

Os Grupos de Custos variam em função da quantidade de estágios que uma OM participa durante a pesquisa de tráfego e, apesar desses custos terem sido construídos a partir de valores aleatórios, sua composição atende ao princípio de que, quanto maior o número de estágios que uma OM atende em uma mesma pesquisa, menor o custo unitário por estágio. Dessa forma, a Figura 5.1 ilustra os custos por quantidade de estágios envolvidos no Grupo de Custos 1, cujo comportamento da curva é não-linear.

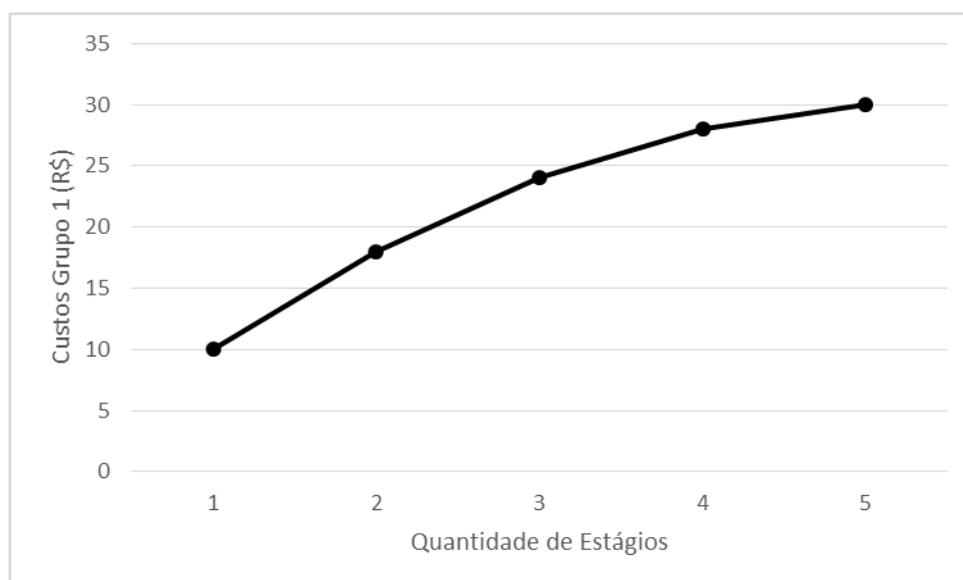


Figura 5.1 – Representação da Curva de Custos para o Grupo 1

Como penalidades de alocação e de utilização de uma Unidade de Apoio do tipo *dummy*, adotou-se valores suficientemente grandes para que essas só fossem utilizadas em casos de falta de equipes de pesquisadores (pelotões) para atendimento dos postos, ou ainda, de quantidade insuficiente de Unidades de Apoio para realização das pesquisas. Portanto, estabeleceu-se como penalidade de alocação de uma OM *dummy*, $\gamma = 1.000.000$, e de uso de uma OM *dummy*, $\theta = 1.000.000$.

Ressalta-se que, foge aos objetivos desse trabalho estudos específicos relacionados à composição dos custos de deslocamento e de utilização das Unidades de Apoio, de maneira que, as estimativas, ainda que simplificadas, adotadas para determinação destes, não interfere na proposição do modelo matemático e nas análises realizadas.

É importante destacar, também, que o modelo matemático proposto pode ser considerado uma ferramenta de apoio à decisão no planejamento de pesquisas de tráfego, contudo, para sua aplicação efetiva em uma situação real, existe a necessidade do desenvolvimento de estudos específicos para estimativas precisas e composição dos referidos custos, de maneira que os parâmetros de entrada do modelo sejam adequados e os resultados representativos.

5.1.2 Cenário 1

Para o Cenário 1, sugere-se a aplicação do modelo matemático proposto para o PLUAAPT utilizando os parâmetros e características da Pesquisa Nacional de Tráfego de 2011 (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT, 2011). Com isso, o cenário permite a comparação dos custos totais da pesquisa, relativos ao deslocamento e à utilização de OM, com a configuração (alocação) realizada em 2011 e os novos custos totais obtidos após aplicação do modelo matemático.

Com a adoção de tal procedimento torna-se possível avaliar, diante dos resultados comparativos, o potencial de redução nos custos totais da pesquisa de tráfego, caso o modelo matemático proposto tivesse sido usado no planejamento da PNT no ano de 2011.

Na PNT de 2011, foram realizadas pesquisas de tráfego rodoviário em 120 postos distintos, divididos em três estágios, incluindo pesquisas de CVC e O/D. No primeiro e terceiro estágios, foram realizadas pesquisas em 22 postos, enquanto no segundo estágio todos os 120 postos de pesquisa foram utilizados.

No modelo matemático são considerados postos de pesquisa sem repetição nos diferentes estágios, por isso, considerou-se, neste estudo, $|P| = 164$ Postos de Pesquisa

(22 + 120 + 22). A listagem de todos os postos de pesquisa considerados, seus respectivos estágios de utilização em 2011 e sua localização (Estado e Município) encontra-se no Apêndice I.

Com relação às OM alocadas a cada posto de pesquisa, nos diferentes estágios, foram utilizadas no total, 83 OM distintas, sendo que, no primeiro e terceiro estágios da pesquisa foram necessárias 19 OM para atendimento dos postos e, no segundo estágio, 83 OM. De acordo com os dados da PNT (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT, 2011), foi possível identificar e georreferenciar as OM efetivamente usadas na pesquisa, no entanto a relação de todas as OM disponíveis no processo de planejamento e escolha das OM efetivamente adotadas naquela ocasião é desconhecida.

Por esse motivo, de forma a minimizar possíveis impactos negativos dessa localização desconhecida e para fins de aplicação desse estudo, adotou-se como Unidades de Apoio disponíveis as 221 OM do estudo de CAMARA *et al.* (2015). Além dessas, foram incluídas 10 OM utilizadas em 2011, as quais não foram relacionadas pelo autor. Assim, com auxílio do *software* Google Earth® versão 7.1, foram georreferenciadas as novas OM identificadas.

No que diz respeito à cobertura das OM, ou seja, a relação de postos de pesquisa que cada OM pode atender, segundo CAMARA *et al.* (2015), aquelas que estão subordinadas à Comandos Militares de Área – CMA, a princípio só podem atender postos de pesquisa que pertencem à área de cobertura do mesmo CMA do Exército Brasileiro. Seguindo esta premissa, este estudo considerou informações dos CMA para definir os conjuntos $U_p \forall p \in P$.

Atualmente, o Exército Brasileiro está dividido em oito CMA (Figura 5.2): Comando Militar do Sudeste; Comando Militar do Sul; Comando Militar do Leste; Comando Militar do Nordeste; Comando Militar da Amazônia; Comando Militar do Planalto; Comando Militar do Oeste; e Comando Militar do Norte (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2015a).



Figura 5.2 – Divisão do território nacional em CMA do Exército Brasileiro

Fonte: EXÉRCITO BRASILEIRO (2015b)

Levando em conta essas informações, para aplicação do modelo matemático proposto nos experimentos computacionais, além dos parâmetros comuns a todos os cenários, foram considerados os dados apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resumo dos parâmetros utilizados no Cenário 1

Parâmetros	Valor Adotado	Comentários Relevantes
$ P $	164	Para fins de modelo matemático, utilizou-se os 120 postos distintos da PNT de 2011, e considerou-se os 22 postos que se repetem nos estágios 1 e 3, como sendo postos diferentes, totalizando os 164 postos.
$ S $	231	Considerou-se as 221 OM do estudo de CAMARA <i>et al.</i> (2015) mais as 10 OM efetivamente utilizadas em 2011 que não constam nessa lista.
N	3	Número de estágios da pesquisa de 2011.
$ Q $	3	Permite-se nessa aplicação que uma OM pode ser utilizada em todos os 3 estágios da pesquisa.
$QTDP_3$	{22, 120, 22}	Indica a quantidade de postos de pesquisa por estágio.
κ_{ns}	1-3	A capacidade das OM, em quantidade de pelotões, varia de 1 a 3, conforme o estudo de CAMARA <i>et al.</i> (2015).

Considerando os cinco Grupos de Custos apresentados na Tabela 5.1, 10 instâncias² foram utilizadas nesse Cenário. As cinco primeiras são referentes à aplicação dos Grupos 1 a 5 com as alocações de OM-Postos efetivamente realizadas na PNT de 2011 (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT, 2011) e as demais instâncias referem-se, novamente, à aplicação dos Grupos 1 a 5, agora, considerando o modelo matemático proposto em busca do melhor resultado. A Tabela 5.3 apresenta o resumo das instâncias propostas.

Tabela 5.3 – Resumo de Instâncias propostas para o Cenário 1

Cenário	Instância	Grupo de Custos	N	P	S	QTDP ₁	QTDP ₂	QTDP ₃
Cenário 1	2011	Grupo 1	3	164	231	22	120	22
		Grupo 2	3	164	231	22	120	22
		Grupo 3	3	164	231	22	120	22
		Grupo 4	3	164	231	22	120	22
		Grupo 5	3	164	231	22	120	22
	Modelo Matemático	Grupo 1	3	164	231	22	120	22
		Grupo 2	3	164	231	22	120	22
		Grupo 3	3	164	231	22	120	22
		Grupo 4	3	164	231	22	120	22
		Grupo 5	3	164	231	22	120	22

5.1.3 Cenário 2

A proposta de experimentos computacionais para o Cenário 2 relaciona-se com uma nova pesquisa de tráfego rodoviário prevista para os anos de 2016 e 2017, resultado de uma parceria entre a UFRJ, o DNIT e o EB, conforme detalhado no Capítulo 1.

Informações preliminares da pesquisa indicam que, em proporções ainda maiores, comparado com a PNT de 2011, esta deverá ser realizada em quatro estágios e com um total de 300 postos distintos abrangendo todo território nacional. Nesse sentido, considerou-se mais 10 instâncias (Instâncias 11-20) com a aplicação dos cinco Grupos de Custos em duas configurações distintas.

Com o objetivo de representar a nova pesquisa de tráfego de forma realista, cinco instâncias (Instâncias 11-15), correspondentes à Configuração 1, dividem os postos de pesquisa de maneira diferente entre os estágios: 60 postos nos Estágios 1, 3 e 4, e 120

² Para os resultados da Pesquisa Nacional de Tráfego de 2011, o modelo matemático foi aplicado apenas para computar os resultados, visto que, os valores das variáveis de decisão são conhecidos. No entanto, de maneira a uniformizar as nomenclaturas utilizadas e para facilitar a leitura do capítulo, mesmo para esses casos, adotou-se a denominação instâncias.

postos no Estágio 2, totalizando 300 postos. Essa configuração foi adotada de acordo com informações preliminares da divisão dos postos de pesquisa entre os quatro estágios.

As demais instâncias (instâncias 16-20) dividem igualmente os postos de pesquisa entre os estágios, ou seja, 75 postos em cada um dos quatro estágios. Esta segunda configuração é proposta como ferramenta de análise para demonstrar possíveis benefícios que a nova divisão de postos entre os estágios da pesquisa pode representar. Dessa forma, a Tabela 5.4 apresenta o resumo dos parâmetros estabelecidos para o Cenário 2.

Tabela 5.4 – Resumo dos parâmetros utilizados no Cenário 2

Parâmetros	Valor Adotado	Comentários Relevantes
$ P $	300	A localização dos 300 postos da pesquisa prevista para os anos de 2016 e 2017 está de acordo com o trabalho de CAMARA <i>et al.</i> (2015).
$ S $	221	Foram consideradas nesse cenário as 221 OM do estudo de CAMARA <i>et al.</i> (2015).
N	4	Número de estágios da nova pesquisa prevista para 2016 e 2017.
$ Q $	4	Permite-se nessa aplicação que uma OM pode ser utilizada em todos os 4 estágios da pesquisa.
$QTDP_4$	{60, 120, 60, 60} e {75, 75, 75, 75}	Adotou-se duas configurações nesse Cenário: Configuração 1 – seguindo a divisão da pesquisa de 2011, adotou-se 120 postos no segundo estágio e 60 nos demais; e Configuração 2 – divisão igualitária da quantidade de postos por estágio.
κ_{ns}	1-3	A capacidade das OM, em quantidade de pelotões, varia de 1 a 3, conforme o estudo de CAMARA <i>et al.</i> (2015).

É importante ressaltar que, para fins de uma análise comparativa entre as duas configurações propostas, com exceção do parâmetro $QTDP_n$, relacionado à quantidade de postos por estágio da pesquisa, todos os demais parâmetros utilizados no modelo matemático e nos experimentos computacionais são iguais nas duas configurações. A Tabela 5.5 resume a composição das 10 instâncias propostas para o Cenário 2.

Tabela 5.5 – Resumo de Instâncias propostas para o Cenário 2

Cenário	Instância	Grupo de Custos	N	P	S	QTDP ₁	QTDP ₂	QTDP ₃	QTDP ₄
Cenário 2	Configuração 1	Grupo 1	4	300	221	60	120	60	60
		Grupo 2	4	300	221	60	120	60	60
		Grupo 3	4	300	221	60	120	60	60
		Grupo 4	4	300	221	60	120	60	60
		Grupo 5	4	300	221	60	120	60	60
	Configuração 2	Grupo 1	4	300	221	75	75	75	75
		Grupo 2	4	300	221	75	75	75	75
		Grupo 3	4	300	221	75	75	75	75
		Grupo 4	4	300	221	75	75	75	75
		Grupo 5	4	300	221	75	75	75	75

5.1.4 Cenário 3

A proposta do Cenário 3, apesar de ter relação direta com os demais cenários, tem como principal objetivo avaliar, por meio de experimentos computacionais, o comportamento do modelo matemático, no que diz respeito à complexidade computacional dada uma pesquisa de tráfego fictícia, ainda maior que a pesquisa prevista para 2016 e 2017 descrita no Cenário 2.

Com isso, espera-se, nessa aplicação, que o modelo matemático auxilie, também, na avaliação da possível viabilidade de realização de pesquisas de tráfego maiores, com disponibilidade de recursos similares ao atual. Para isso, o Cenário 3 propõe uma pesquisa de tráfego rodoviário com 500 postos de pesquisa e 500 Unidades de Apoio para atendê-los.

A Tabela 5.6 apresenta o resumo dos parâmetros adotados nesse cenário. Destaca-se que, por se tratar de uma pesquisa fictícia, a localização dos pontos, tanto para os postos de pesquisa quanto para as Unidades de Apoio, foi definida de forma aleatória com auxílio do *software* TransCAD 5.0 (CALIPER, 2008) e da base georreferenciada do Brasil.

Tabela 5.6 – Resumo dos parâmetros utilizados no Cenário 3

Parâmetros	Valor Adotado	Comentários Relevantes
$ P $	500	Foram definidas 500 localizações no território brasileiro para postos de pesquisa de forma aleatória utilizando o TransCAD 5.0 (CALIPER, 2008).
$ S $	500	Foram definidas 500 localizações no território brasileiro para Unidades de Apoio de forma aleatória utilizando o TransCAD 5.0 (CALIPER, 2008).
N	5	Número de estágios da pesquisa.
$ Q $	5	Permite-se nessa aplicação que uma Unidade de Apoio pode ser utilizada em todos os cinco estágios da pesquisa.
$QTDP_5$	{100, 100, 100, 100, 100}	Dividiu-se igualmente a quantidade de postos pela quantidade de estágios da pesquisa.
κ_{ns}	1-5	A capacidade das OM, em quantidade de pelotões, varia de 1 a 5.

Assim como nos demais cenários, a demanda de um posto de pesquisa equivale a uma equipe de pesquisadores. No que se refere à disponibilidade dessas equipes, por parte das Unidades de Apoio, a quantidade máxima de equipes que cada unidade pode fornecer durante a pesquisa também foi definida de forma aleatória.

Seguindo o padrão das capacidades de cada OM para as situações reais apresentadas nos demais cenários, neste caso, as capacidades de cada Unidade de Apoio foram obtidas considerando o intervalo de 1 a 5.

Considerando como premissa as informações das pesquisas anteriormente realizadas (Cenário 1) e da nova pesquisa (Cenário 2), acredita-se que, nessa proposta, a quantidade de postos de pesquisa por estágio tem como possível limitação a disponibilidade de equipes de pesquisadores para atendimento dos postos. Dessa maneira, definiu-se para este cenário, que os 500 postos estão divididos, igualmente, em cinco estágios.

O resumo das cinco instâncias propostas para o Cenário 3 apresenta-se na Tabela 5.7. E, assim como nos Cenários 1 e 2, a variação nas instâncias está relacionada com os Grupos de Custos (ver Tabela 5.1).

Tabela 5.7 – Resumo de Instâncias propostas para o Cenário 3

Cenário	Instância	Grupo de Custos	N	P	S	QTDP ₁	QTDP ₂	QTDP ₃	QTDP ₄	QTDP ₅
Cenário 3	21	Grupo 1	5	500	500	100	100	100	100	100
	22	Grupo 2	5	500	500	100	100	100	100	100
	23	Grupo 3	5	500	500	100	100	100	100	100
	24	Grupo 4	5	500	500	100	100	100	100	100
	25	Grupo 5	5	500	500	100	100	100	100	100

5.2 Análise dos Resultados dos Cenários

Para resolução do modelo matemático de alocação de Unidades de Apoio a Postos de pesquisa de tráfego proposto no Capítulo 4, aplicado aos três cenários definidos na Subseção 5.2, utilizou-se um computador equipado com processador AMD Phenom X4 1.9 GHz e 4 GB de memória RAM, com sistema operacional Windows 7 e *software* de otimização IBM ILOG CPLEX 12.6 (IBM, 2015) que foi utilizado por no máximo duas horas em cada instância.

Além disso, para construção do modelo matemático, foi desenvolvido um procedimento codificado em linguagem C/C++ que lê arquivos contendo dados de entrada do modelo, como por exemplo, as distâncias entre Unidades de Apoio e postos de pesquisa. Destaca-se que, sem um procedimento automatizado, tal como foi feito, a construção do modelo torna-se inviável de ser feita manualmente, devido ao tamanho dos problemas (instâncias propostas) e quantidade de restrições envolvidas.

O resumo dos resultados para as 25 instâncias dos três cenários propostos apresenta-se na Tabela 5.8. Nas subseções seguintes estão representadas, separadamente, as análises dos resultados para estes cenários.

Tabela 5.8 – Resumo dos resultados dos Cenários

Cenários / Instâncias	Postos Atendidos ⁽¹⁾					OM Utilizadas ⁽¹⁾						Custos Deslocamento – CD ⁽¹⁾						Custos OM ⁽³⁾	CPLEX				
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	D ⁽²⁾	N1	N2	N3	N4	N5	Total CD		FO ⁽⁴⁾	Tempo ⁽⁵⁾	GAP% ⁽⁶⁾		
Cenário 1	2011	1	22	120	22	-	-	19	83	19	-	-	83	6.843,6	34.152,9	6.843,6	-	-	47.840,2	1.096,0	48.936,2	0,53	0
		2	22	120	22	-	-	19	83	19	-	-	83	6.843,6	34.152,9	6.843,6	-	-	47.840,2	5.480,0	53.320,2	0,53	0
		3	22	120	22	-	-	19	83	19	-	-	83	6.843,6	34.152,9	6.843,6	-	-	47.840,2	27.400,0	75.240,2	0,53	0
		4	22	120	22	-	-	19	83	19	-	-	83	6.843,6	34.152,9	6.843,6	-	-	47.840,2	137.000,0	184.840,2	0,53	0
		5	22	120	22	-	-	19	83	19	-	-	83	6.843,6	34.152,9	6.843,6	-	-	47.840,2	685.000,0	732.840,2	0,55	0
	Modelo Matemático	6	22	120	22	-	-	18	82	18	-	-	82	4.595,5	24.381,0	4.595,5	-	-	33.572,0	1.072,0	34.644,0	1,57	0
		7	22	120	22	-	-	18	78	18	-	-	78	4.595,5	24.466,2	4.595,5	-	-	33.657,3	5.160,0	38.817,3	1,59	0
		8	22	120	22	-	-	16	64	16	-	-	64	4.694,5	26.317,3	4.694,5	-	-	35.706,4	21.600,0	57.306,4	2,11	0
		9	22	120	22	-	-	11	44	11	-	-	44	7.136,4	36.545,0	7.136,4	-	-	50.817,8	74.750,0	125.567,8	6,75	0
		10	22	120	22	-	-	9	41	9	-	-	41	12.076,9	42.983,7	12.076,9	-	-	67.137,5	335.000,0	402.137,8	462,46	0
Cenário 2	Configuração 1	11	60	120	60	60	-	39	80	38	40	-	116	15.750,4	25.913,9	21.230,6	17.342,5	-	80.237,5	1.728,0	81.965,5	15,6	0
		12	60	120	60	60	-	38	71	37	39	-	108	15.787,5	29.991,8	18.408,8	16.388,0	-	80.576,2	8.050,0	88.624,2	16,57	0
		13	60	120	60	60	-	30	62	34	34	-	86	16.640,7	31.385,4	18.555,7	17.197,8	-	83.779,8	34.250,0	118.029,8	53,15	0
		14	60	120	60	60	-	24	46	23	23	-	60	20.617,7	41.858,0	23.600,4	21.215,9	-	107.292,1	122.750,0	230.042,1	1.265,00	0
		15	60	120	60	60	-	21	42	21	21	-	50	30.351,6	48.939,4	25.724,2	29.352,2	-	134.367,6	538.750,0	673.117,6	7.200,00	0,29
	Configuração 2	16	75	75	75	75	-	52	48	50	48	-	106	14.709,6	20.179,3	22.150,3	18.476,6	-	75.515,9	1.666,0	77.181,9	13,21	0
		17	75	75	75	75	-	47	49	43	46	-	96	19.053,2	17.756,6	20.454,6	18.588,7	-	75.853,3	7.740,0	83.593,3	41,31	0
		18	75	75	75	75	-	39	41	40	39	-	75	19.449,4	19.060,3	20.452,3	20.480,1	-	79.442,3	32.250,0	111.692,3	1.463,27	0
		19	75	75	75	75	-	28	28	28	29	-	40	28.572,0	27.689,5	27.025,8	24.149,6	-	107.437,0	105.750,0	213.187,0	7.200,00	1,29
		20	75	75	75	75	-	26	27	26	26	-	30	34.832,8	29.575,8	26.807,5	33.021,5	-	124.237,8	472.500,0	596.737,8	7.200,00	1,29
Cenário 3	Modelo Matemático	21	100	100	100	100	100	63	66	62	67	63	310	11.317,2	13.984,7	11.658,0	12.191,1	11.664,1	60.815,4	3.184,0	63.999,4	1.903,32	0
		22	100	100	100	100	100	62	53	57	63	55	281	11.522,9	13.794,3	11.103,0	12.901,5	12.439,1	61.760,9	14.400,0	76.160,9	1.803,98	0
		23	100	100	100	100	100	43	46	43	38	48	206	14.132,5	13.777,4	14.101,9	14.567,3	14.458,8	71.038,1	53.000,0	124.038,1	7.200,00	5,59
		24	100	100	100	100	100	27	27	25	27	27	128	19.463,6	21.307,9	22.477,6	20.213,9	20.847,3	104.310,5	163.500,0	267.810,5	7.200,00	21,57
		25	100	100	100	100	100	23	22	25	23	22	58	43.570,1	45.865,9	44.690,0	41.500,4	37.816,6	213.443,1	580.000,0	793.434,1	7.200,00	31,83

Nota: (1) As abreviações, N1, N2, N3, N4 e N5, referem-se aos Estágios 1, 2, 3, 4 e 5 de uma pesquisa de tráfego. (2) Refere-se à quantidade total de OM distintas durante todos os estágios da pesquisa; (3) Os custos de utilização de OM não foram separados por estágio, referem-se ao custo total durante a pesquisa; (4) Função Objetivo do modelo matemático; (5) O tempo de processamento está representado em segundos; e (6) Variação percentual entre os limitantes inferior e superior (*lower bound* e *upper bound*).

5.2.1 Resultados Cenário 1

No Cenário 1, a situação proposta permite uma comparação entre as decisões gerenciais da equipe de planejamento da PNT de 2011, no que refere à alocação de pelotões de militares, a partir de OM do Exército Brasileiro, e tal alocação realizada a partir dos resultados do modelo matemático proposto nessa dissertação, de forma a atender os 164 postos de pesquisa de tráfego na ocasião.

Em 2011, esses 164 postos foram divididos em três estágios de pesquisa, 22 Postos (Estágio 1), 120 Postos (Estágio 2) e 22 Postos (Estágio 3), o que totaliza 164 postos em localizações distintas (44 postos foram repetidos no Estágio 2). Dessa forma, por meio de alguns indicadores que o modelo matemático fornece ao planejador, comparado com os valores desses mesmos indicadores calculados, também, pelo modelo matemático, porém definindo 1 para todas as variáveis que correspondem às alocações efetivamente usadas em 2011 como entrada do modelo matemático, e as demais recebem 0.

Os indicadores anteriormente citados referem-se, por exemplo, à quantidade de OM utilizadas (por estágio e durante toda a pesquisa), ao custo de deslocamento dos pelotões de militares até os postos de pesquisa, ao custo de utilização das OM, ao valor total para a Função Objetivo, entre outros. Além da análise desses indicadores, outras comparações podem ser feitas, nas quais atribui-se maior importância ao tempo e esforço computacional necessários durante o processo de solução.

O gráfico mostrado na Figura 5.3 apresenta os resultados do Cenário 1, relacionados à quantidade de OM utilizadas. Essas quantidades estão divididas para cada um dos três estágios (N1, N2 e N3) e, representa-se ainda, a quantidade de OM distintas utilizadas em toda a pesquisa. Vale destacar que, para as Instâncias 1-5, a quantidade de OM utilizadas é a mesma, dessa forma, nessa análise, estas foram agrupadas.

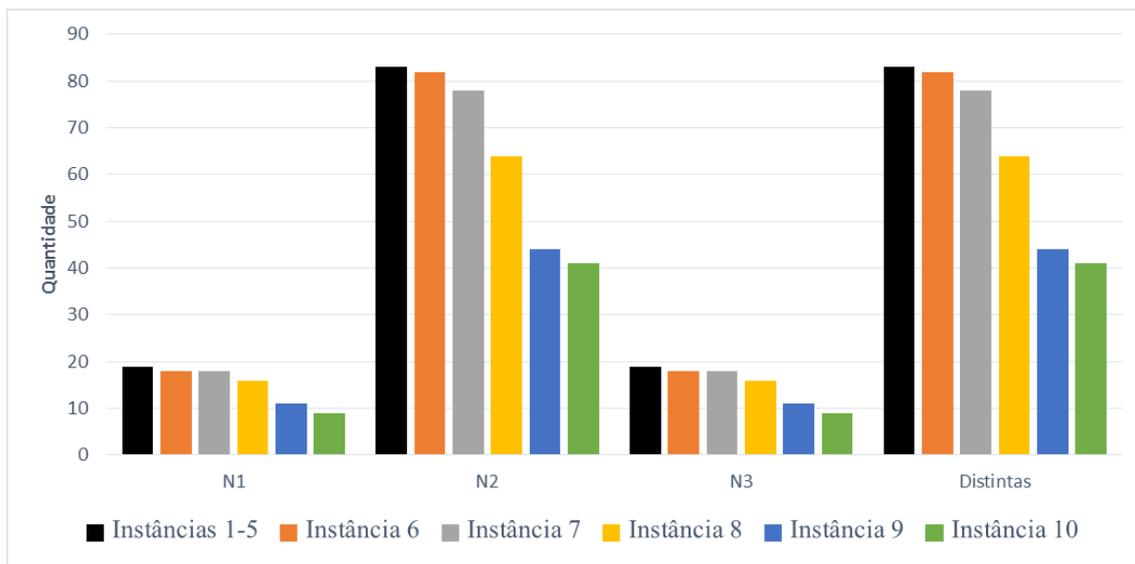


Figura 5.3 – Quantidade de OM utilizadas por estágio e total de OM distintas na pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 1

Dado o exposto é possível observar que, no que diz respeito à quantidade de OM (independentemente da análise ser realizada por estágio da pesquisa ou pela quantidade de OM distintas), os resultados do modelo matemático são melhores em todos os casos. Isso significa que nas Instâncias 6-10, referentes à aplicação do modelo matemático que define quais OM e em quais períodos estas devem atender aos 164 Postos da PNT de 2011, um menor número de OM são necessárias para atendê-los.

Na PNT de 2011 (Instâncias 1-5), no primeiro e terceiro estágios da pesquisa (N1 e N3) foram utilizadas 19 OM para atender aos 22 postos de pesquisa, já no segundo estágio (N2), foram utilizadas 83 OM. É possível observar, então, nas Instâncias 6-10, para o Estágio 2, relacionado à quantidade de OM distintas, foram alcançados os melhores resultados.

O gráfico da Figura 5.3 mostra que, a cada aumento nos custos de utilização das OM ou variação dos Grupos de Custos, um número menor de OM é escolhido para atendimento dos postos de pesquisa. Por esse motivo, para as Instâncias 6 e 7, os ganhos são bem menores, em relação às demais instâncias. Na Instância 6, a quantidade de OM utilizadas em N1 e N3 foi igual a 18 e, em N2 igual a 82 e na Instância 7, igual a 78. Já nas Instâncias 8, 9 e 10, a redução na quantidade de OM é mais acentuada à medida que os custos de utilização aumentam. As Instâncias 8, 9 e 10 utilizaram 16, 11 e 9 OM, respectivamente, em N1 e N3, e em N2, 64, 44 e 41 OM, também respectivamente.

A situação apresentada para o Cenário 1 possui uma característica muito particular, onde os 22 postos de N1 e N3 coincidem, em localização, com 22 dos 120 postos de N2. Assim, como era esperado, os resultados do modelo matemático mostram que a quantidade de OM distintas utilizadas durante toda a pesquisa coincide com a quantidade de OM empregadas em N2.

Tal situação ocorre porque as OM selecionadas para N2 também precisam atender aos 22 postos de N1 e N3, já que suas localizações coincidem. De maneira análoga, observa-se que as quantidades de OM de N1 e N3 são iguais em todos os casos (todas as instâncias). Este fato é comprovado em análise específica dos resultados, a qual identifica que, não somente em quantidade, mas as OM escolhidas também são iguais.

Sendo assim, quando se observa as quantidades de OM para atendimento dos postos de pesquisa considerados no Cenário 1, os melhores resultados são obtidos com o Grupo 5. Nesse grupo (Instância 10), em N1 e N3, apenas 56,25% das OM utilizadas na PNT de 2011 seriam suficientes para atendimento dos postos. Para N2 o resultado é ainda melhor, apenas 49,4% das OM seria suficiente, em quantidade.

De forma geral, ou seja, no que se refere à quantidade total de OM distintas em toda a pesquisa, como apresentado anteriormente, o benefício é coincidente com os resultados de N2. Portanto, seguindo as configurações e parâmetros apresentados para esse cenário e desconsiderando, então, fatores externos que podem ter influenciado na escolha das OM em 2011, o atendimento dos postos poderia ter sido realizado com 41 OM ao invés de 83 escolhidas naquela situação³.

Destaca-se, no entanto, que os resultados do modelo matemático mostram que essa quantidade está diretamente relacionada às variações nos custos estabelecidos para utilização das OM. Diante disso, além das quantidades de OM, deve-se analisar também, os demais indicadores obtidos a partir da variação desses custos.

De forma complementar, a Figura 5.4 (a) e a Figura 5.4 (b), apresentam, por meio de mapas georreferenciados, as alocações estabelecidas para as Instâncias 1 e 10. Percebe-se visualmente as maiores distâncias entre OM e Postos de Pesquisa obtidos na Instância 10, em função da menor quantidade de OM selecionadas para atendimento dos postos.

³ É importante ressaltar que não foi possível a obtenção da relação de OM disponíveis para seleção na PNT de 2011, sendo reutilizada a aquelas disponibilizadas no trabalho de Camara *et al.* (2015). Além disso, outros fatores como, por exemplo, uma possível mudança nas áreas de cobertura das OM, podem ter influenciado na escolha em 2011.

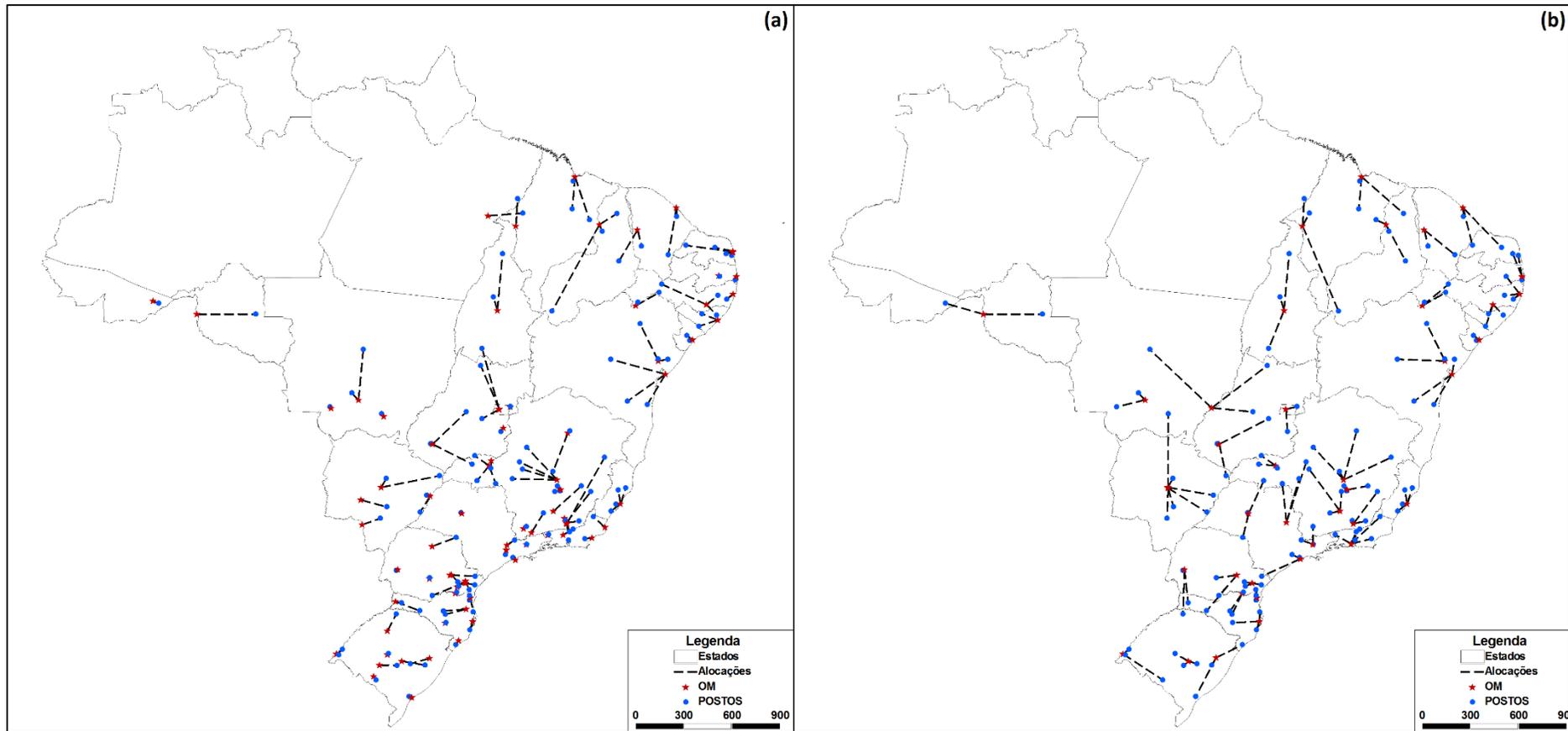


Figura 5.4 – Mapa comparativo das alocações estabelecidas nas Instâncias 1(a) e 10(b)

Na Figura 5.5, o gráfico representa o comportamento dos custos de deslocamento para as instâncias apresentadas, enquanto a Figura 5.6 mostra os custos totais de deslocamento, considerando, então, os custos referentes aos três estágios da pesquisa. Dessa forma, novamente, torna-se possível avaliar os resultados, agora, em função dos custos de deslocamento.

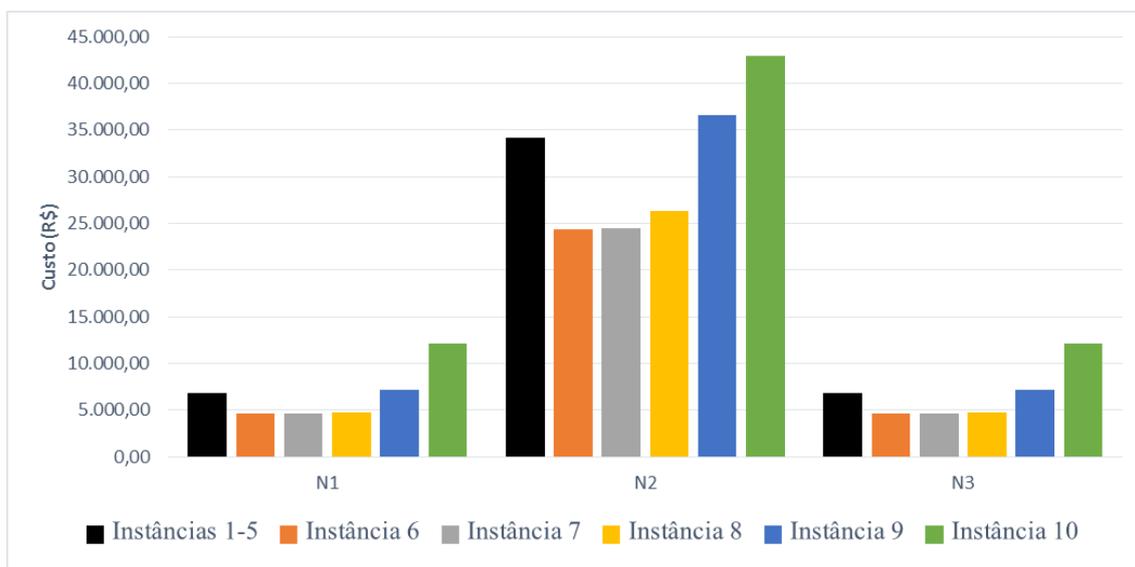


Figura 5.5 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 1

Quando se compara os resultados das Instâncias 6-10 com os custos da alocação da pesquisa de 2011, observa-se que em 3 dos 5 casos, além das vantagens em termos de quantidade de OM utilizadas, os custos relacionados ao deslocamento de tropas de militares até os postos de pesquisa também são menores.

No primeiro e terceiro estágios (N1 e N3), as reduções nos custos de deslocamento foram de: 32,85% (Instância 6); 32,85% (Instância 7); e 31,40% (Instância 8). Já para o Estágio 2, as reduções são ainda mais significativas, já que, nesse estágio, o número de postos é muito maior comparado aos demais. Neste, os potenciais ganhos são de: 28,61% (Instância 6); 28,36% (Instância 7); e 22,94% (Instância 8).

No entanto, no caso das Instâncias 9 e 10, os elevados benefícios em relação à quantidade de OM, influenciou negativamente nos custos de deslocamento. Em N1 e N3, observa-se um crescimento de 4,28% (Instância 9) e 76,47% (Instância 10), e em N2, 7,00% (Instância 9) e 25,86% (Instância 10), justificado pela redução significativa de OM utilizadas durante a pesquisa.

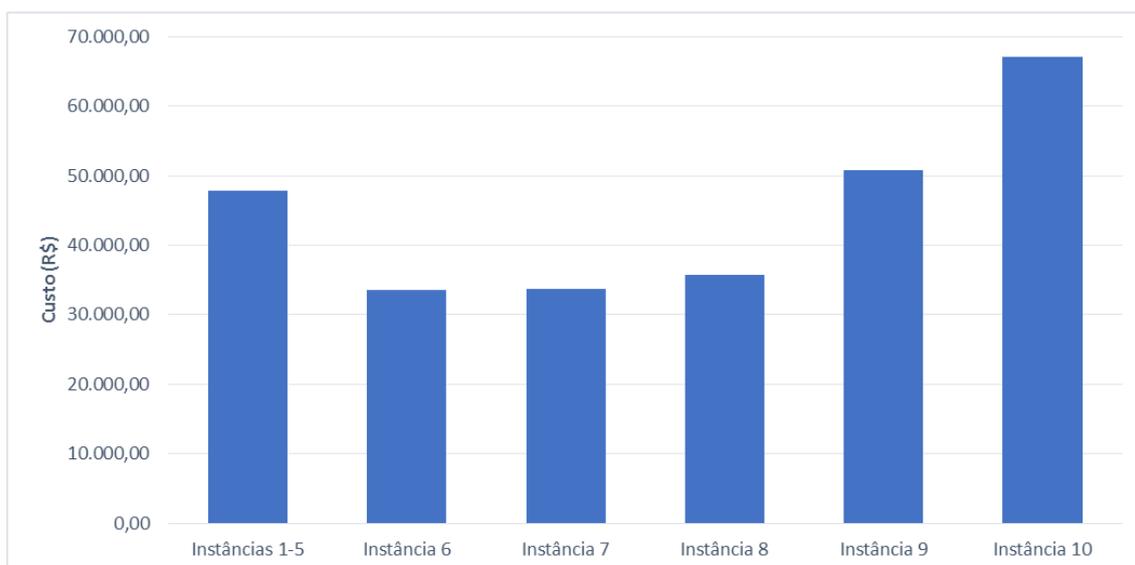


Figura 5.6 – Custo de deslocamento total para cada uma das instâncias do Cenário 1

Para os custos totais de deslocamento (Figura 5.6), o resultado acompanha as tendências apresentadas anteriormente por estágio. Novamente, as Instâncias 6, 7 e 8, apresentam melhores resultados, permitindo uma redução nos custos de 29,82%, 29,65% e 25,36%, respectivamente, enquanto que as Instâncias 9 e 10 podem elevar em 6,22% (Instância 9) e 40,34% (Instância 10) esses custos.

No que tange aos custos de utilização de OM, ao avaliar os resultados das instâncias, para cada Grupo de Custos (1-5), observa-se que, ao comparar os resultados a partir do modelo matemático (Instâncias 6-10) e das instâncias que representam as alocações da PNT de 2011, respectivamente por Grupo de Custos, em todos os casos, os resultados do modelo matemático são superiores (Figura 5.7).

Portanto, é esperado que quanto maiores os custos unitários de utilização de uma OM, nesse caso, o Grupo 5 de custos, maiores serão os benefícios potenciais do uso do modelo matemático proposto.

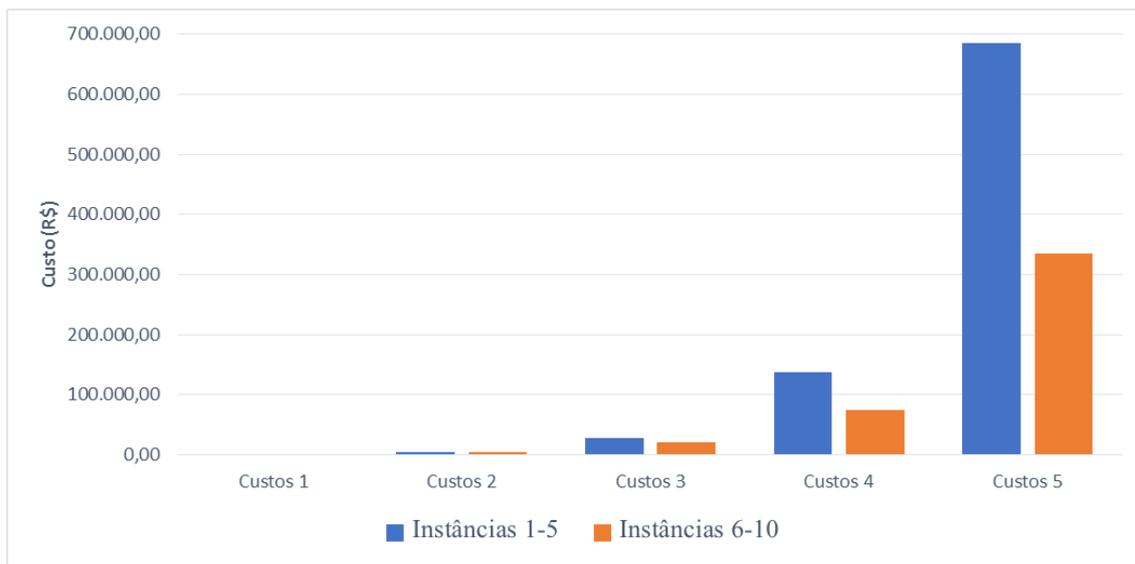


Figura 5.7 – Custos de utilização de OM por Grupo de Custos para cada uma das Instâncias do Cenário 1

Esses resultados são reflexo, também, das reduções na quantidade de OM utilizadas, como mostrado na Figura 5.3. Portanto, pode-se afirmar que, nos resultados comparativos, as reduções potenciais nos custos de utilização de OM são de: 2,19% com o Grupo 1; 5,84% com o Grupo 2; 21,17% com o Grupo 3; 45,44% com o Grupo 4; e 51,09% com o Grupo 5.

Para os resultados da Função Objetivo, com as mesmas comparações realizadas anteriormente, aplicadas aos Grupos de Custos, novamente as maiores reduções de custos são possíveis com um maior custo unitário de uso das OM. No entanto, percentualmente, as reduções não são crescentes. Nos três primeiros casos, Instâncias 6, 7 e 8 e Instâncias 1, 2 e 3; os ganhos potenciais são, respectivamente, de 29,21%, 27,20% e 23,84%, ou seja, há um comportamento decrescente, enquanto na comparação entre as Instâncias 9 e 10 com as Instâncias 4 e 5, as reduções potenciais são, respectivamente, de 32,07% e 45,13% nos custos da Função Objetivo (Figura 5.8).

Uma possível justificativa para esse comportamento está, novamente, na variação dos custos de utilização de OM, já que, como os custos de deslocamento para as Instâncias 1-5 são iguais, os maiores impactos na Função Objetivo ocorrem, justamente, quando um menor número de OM são utilizadas.

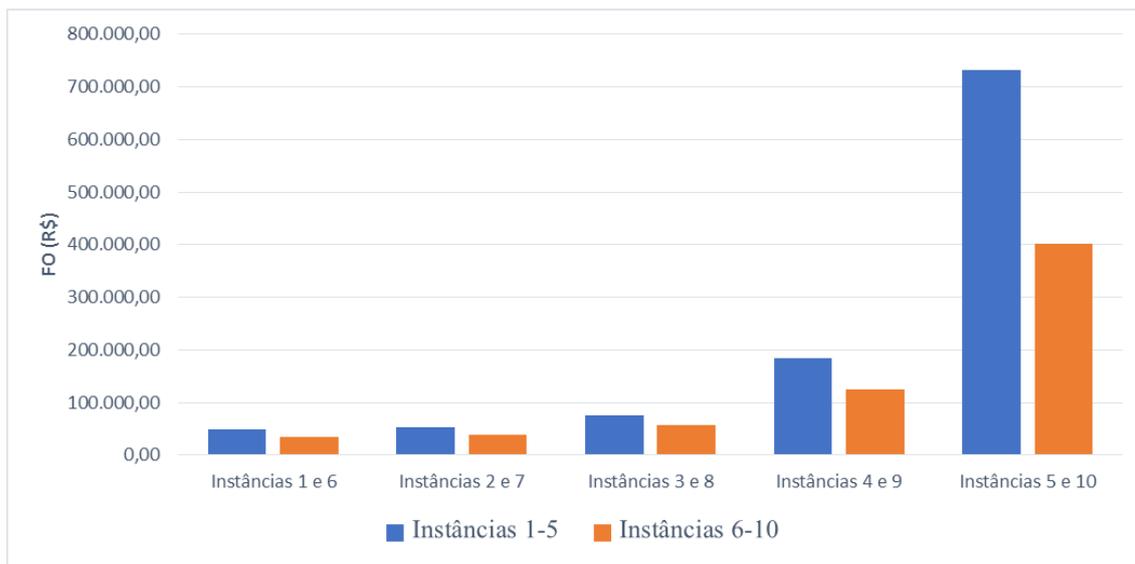


Figura 5.8 – Função Objetivo para cada uma das Instâncias do Cenário 1

Com relação à complexidade computacional associada ao modelo matemático proposto, o gráfico da Figura 5.9 mostra que, no caso das Instâncias 1-5, o tempo para encontrar a solução ótima foi praticamente constante e pequeno, já que as variáveis de decisão foram inseridas no modelo com as respectivas escolhas realizadas em 2011. Conforme descrito na Seção 5.1.2, nessas instâncias o modelo matemático foi utilizado apenas para computar os resultados. Já para as demais instâncias (6-10), o tempo computacional inicia um crescimento mais acentuado na Instância 9, com 6,75 segundos, e chega a 462,46 segundos na Instância 10.

Apesar dos tempos computacionais estarem abaixo dos 10 minutos, o comportamento apresentado pela Figura 5.9 dá indícios de que em instâncias maiores, como nas instâncias apresentadas nos Cenários 2 e 3, a complexidade computacional pode estar relacionada, principalmente, às variações nos Grupos de Custos, o que pode tornar difícil a obtenção da solução ótima por meio de *software* convencionais de otimização.

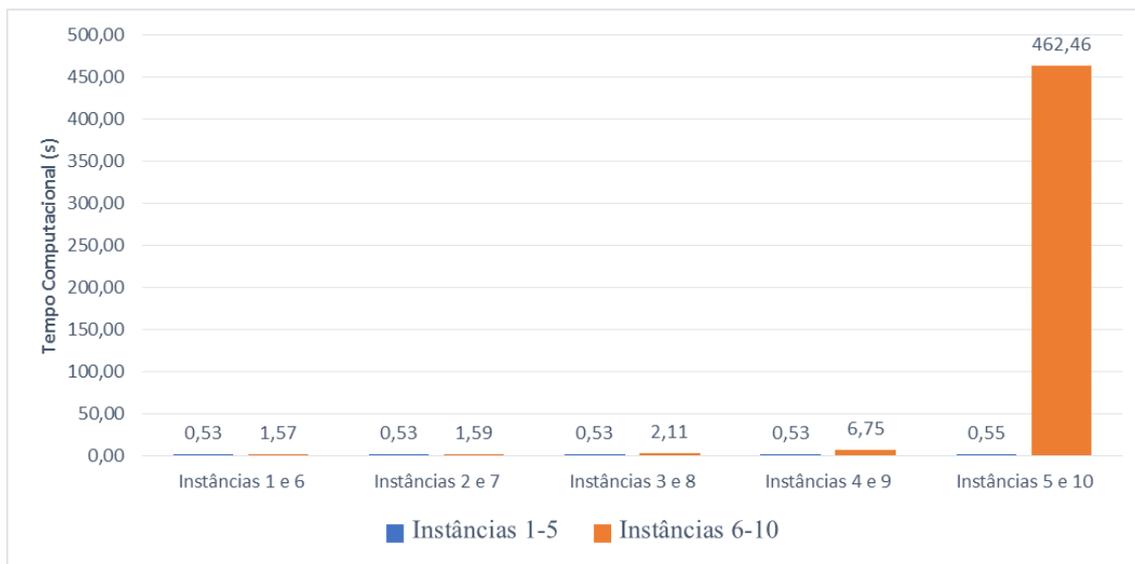


Figura 5.9 – Tempo computacional para cada uma das instâncias do Cenário 1

5.2.2 Resultados Cenário 2

No Cenário 2, ao considerar como parâmetros de entrada dados e informações da nova pesquisa de maior porte, se comparada com a PNT de 2011, espera-se que o modelo matemático proposto e validado com os resultados apresentados no Cenário 1 possa ser utilizado como ferramenta de apoio gerencial na escolha de OM para atendimento de postos de pesquisa de tráfego nas pesquisas de 2016 e 2017.

Assim como no cenário anterior, foram propostas 10 instâncias que se diferenciam, principalmente, pelos custos de utilização de OM. Nessa nova pesquisa, estão previstos 300 postos, divididos em quatro estágios. Parte das instâncias propostas (11-15), a denominada Configuração 1, divide os Estágios para os casos 1, 3 e 4 em 60 postos, enquanto o Estágio 2, recebe 120 postos, conforme informações preliminares da pesquisa. As instâncias restantes (16-20), denominadas Configuração 2, propõem uma divisão igualitária com 75 postos em cada estágio como forma de comparar possíveis benefícios da nova divisão.

Como na avaliação do Cenário 1, os indicadores utilizados para avaliação dos resultados das instâncias estão relacionados à quantidade de OM efetivamente utilizadas para atendimento dos postos, aos custos de deslocamento dos militares até os postos de pesquisa (por estágio e o total da pesquisa), aos custos de utilização das OM, ao valor da Função Objetivo do modelo matemático e ao tempo computacional do processo de solução. Além disso, deve-se dedicar especial atenção ao GAP % residual nos casos em

que a solução ótima do modelo matemático não for encontrada durante o tempo máximo de processamento definido

A Figura 5.10 apresenta, graficamente, as quantidades de OM indicadas pelo modelo matemático para atendimento dos postos de pesquisa, por estágio da pesquisa e o total de OM distintas utilizadas durante todos os estágios, para a Configuração 1 (Instâncias 11-15). Observa-se que o Estágio N2 é o que requer maior quantidade de OM devido à maior quantidade de postos que devem ser atendidos (120 postos).

Além disso, a diferença nos resultados encontrados para as instâncias está relacionada aos custos de utilização de uma OM durante a pesquisa. Dessa forma, observa-se que, quando os custos de utilização aumentam, a solução ótima do modelo matemático indica que um número menor de OM deve ser utilizado.

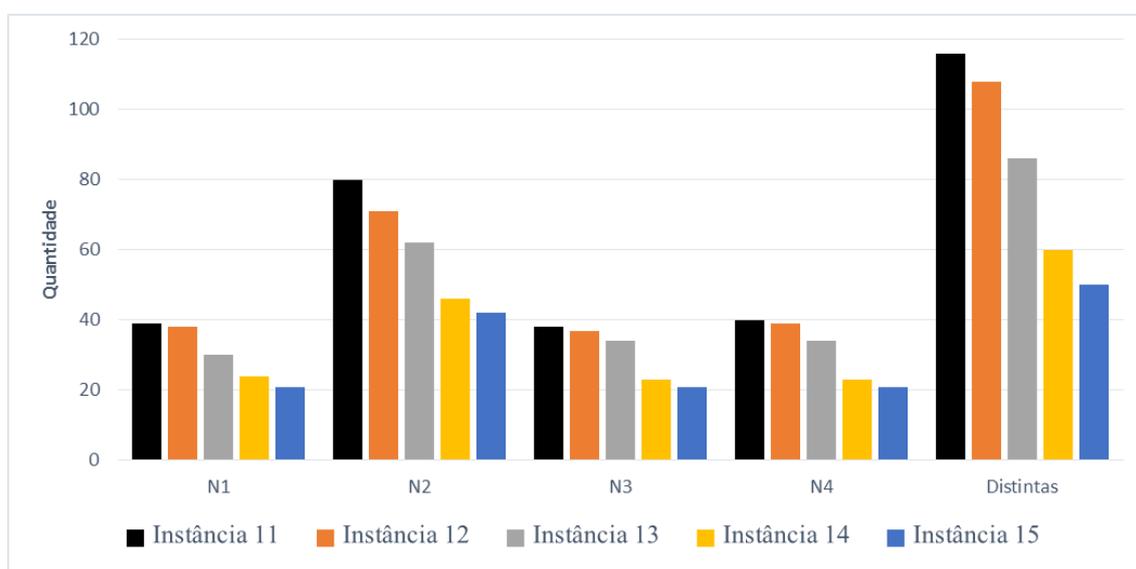


Figura 5.10 – Quantidade de OM utilizadas por estágio e total de OM distintas na pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 1

No pior dos casos (Instância 11), aquele que utiliza os parâmetros do Grupo 1, em N1, N2, N3 e N4 são necessárias 39, 80, 38 e 40 OM, respectivamente, totalizando 116 OM distintas. No entanto, os resultados das demais instâncias mostram que, com o aumento dos custos de utilização, essa quantidade pode ser reduzida em cerca de 56,90%. Isso porque, na Instância 15, que utiliza como parâmetro os custos de utilização do Grupo 5, para garantir o atendimento de todos os postos de pesquisa, seriam necessárias 21, 42, 21 e 21 OM nos Estágios N1, N2, N3 e N4, respectivamente. Nesse caso, o número total de OM distintas seria igual a 50.

No caso das instâncias da Configuração 2, a Figura 5.11 mostra que, com a divisão igualitária de postos de pesquisa entre os períodos, uma quantidade ainda menor de OM distintas é suficiente para atendimento dos postos. Entre os estágios da pesquisa, as Instâncias 19 e 20 se destacam, pois, mesmo com o aumento nos custos de utilização, a quantidade de OM utilizada é muito próxima nessas instâncias. No entanto, a diferenciação é melhor percebida na quantidade de OM distintas, sendo necessárias 40 OM distintas para a Instância 19 e apenas 30 OM para a Instância 20.

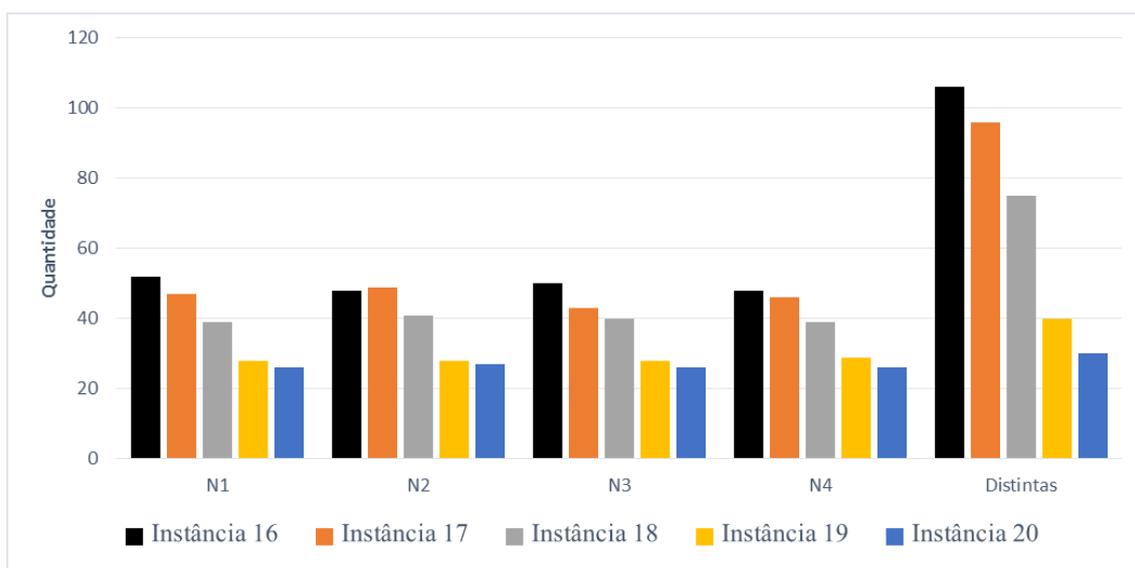


Figura 5.11 – Quantidade de OM utilizadas por estágio e total de OM distintas na pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 2

Dessa forma, destaca-se, no que diz respeito a quantidade de OM durante a pesquisa de tráfego, que a divisão de postos proposta para as instâncias da Configuração 2 apresenta melhores resultados que a divisão da Configuração 1. Por outro lado, é importante destacar que critérios técnicos foram empregados para realizar a divisão de postos da Configuração 1 que não são conhecidos.

A Figura 5.12 (a) apresenta a alocação realizada na Instância 11 e a Figura 5.12(b) a alocação da Instância 20. Novamente percebe-se que quando o número de OM reduz, distâncias mais longas precisam ser vencidas pelos pelotões. Com isso, fatores que influenciaram nessa decisão podem não ser explicados somente com o indicador de quantidade de OM, tornando necessária a avaliação dos demais indicadores propostos na análise desse cenário.

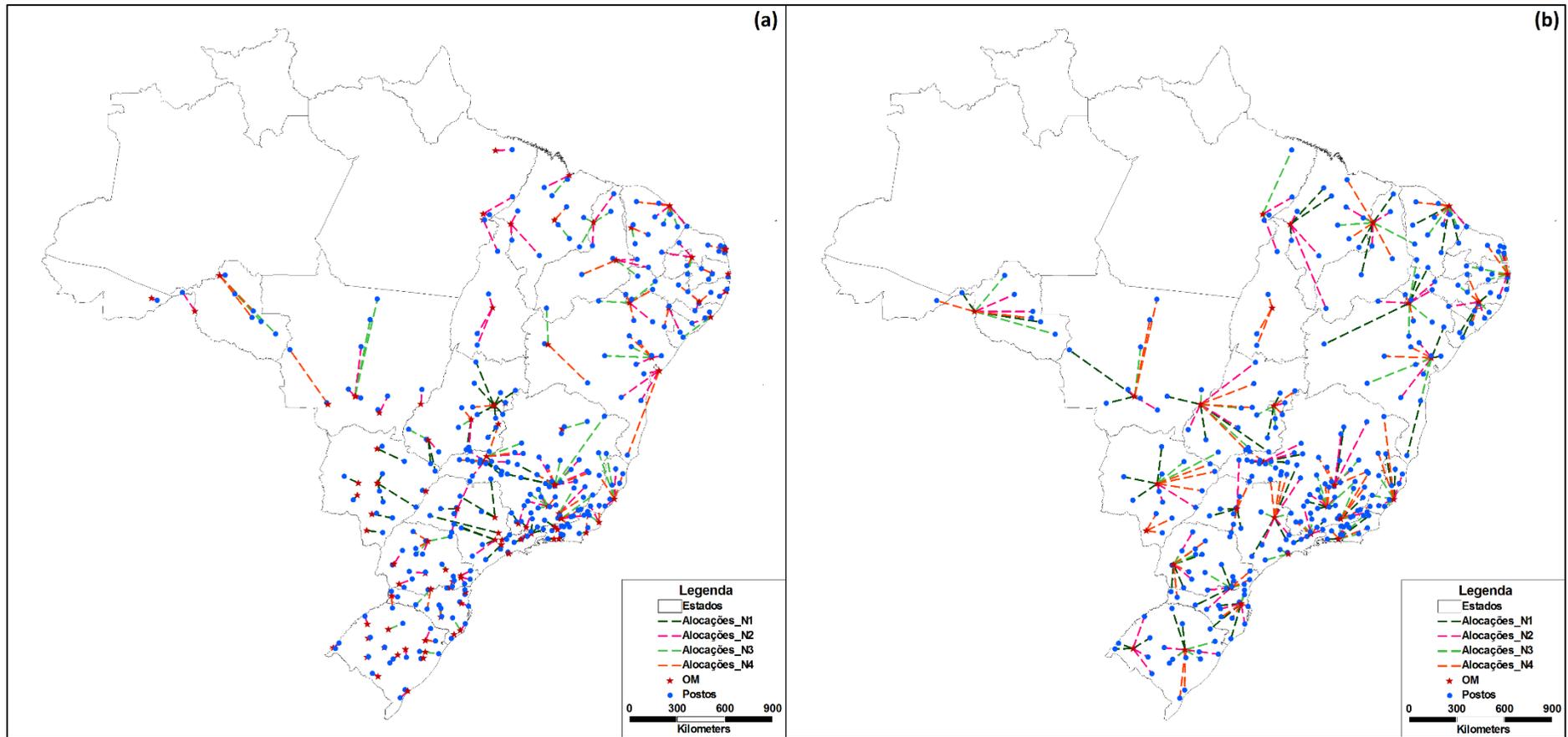


Figura 5.12 – Mapa comparativo das alocações estabelecidas, por estágio, nas Instâncias 11(a) e 20(b)

Em contrapartida, a análise voltada para os custos de deslocamento (Figuras 5.13 e 5.14) indica que, as reduções significativas nas quantidades de OM necessárias para realização das pesquisas, proporcionadas pelo aumento dos custos de utilização de OM, influenciam negativamente nos custos de deslocamento dos pelotões de militares durante as pesquisas.

Já a Figura 5.14, referente aos custos de deslocamento por estágio, para as instâncias da Configuração 1 (Instâncias 11-15) mostra que os comportamentos dos Estágios N3 e N4 se destacam visto que, diferentemente dos Estágios N1 e N2, mesmo com o aumento dos custos unitários de utilização e o comportamento decrescente da quantidade de OM em função desses custos, nesses estágios foi possível obter os menores custos de deslocamento, ainda que houvessem maiores custos unitários de utilização das OM. Isso ocorreu nas Instâncias 12 e 13 que apresentaram potenciais de redução de 13,29% e 12,60% para N3 e 5,50% e 0,83% para N4, respectivamente.

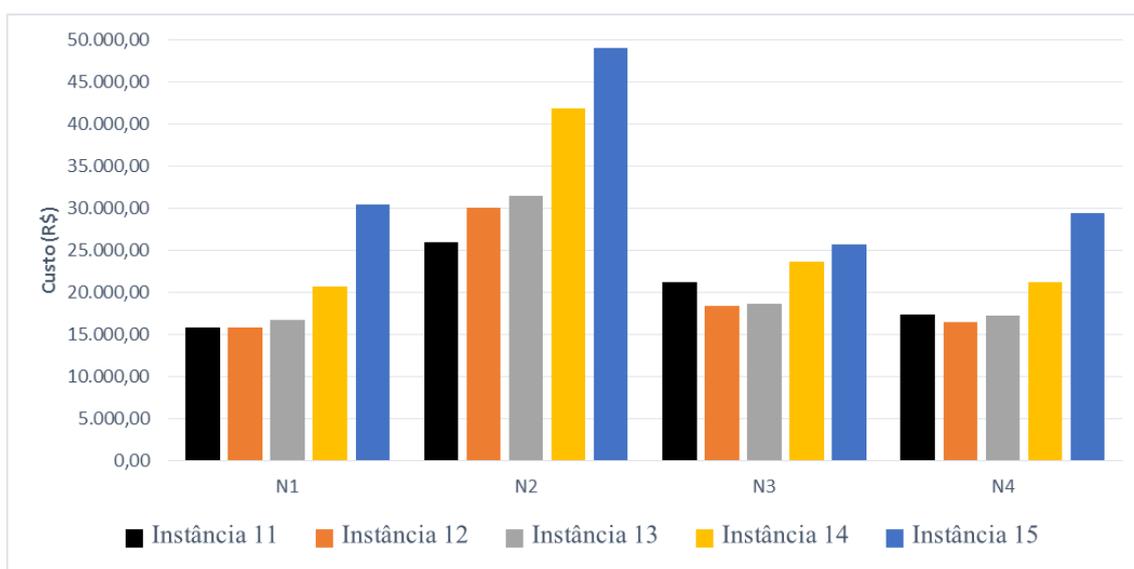


Figura 5.13 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 1

Nos resultados das instâncias referentes à Configuração 2, os custos de deslocamento estão distribuídos de forma similar entre os estágios, pois eles apresentam a mesma quantidade de postos atendidos. Assim como nas instâncias da Configuração 1, em dois estágios (N2 e N3), o comportamento dos custos não é crescente em todas as instâncias.

No caso das Instâncias 17 e 18, nos Estágios N2 e N3, apesar dos custos de utilização das OM serem maiores (Grupos de Custos 2 e 3), comparados à Instância 16 (Grupo de Custos 1), os custos são 12,01% e 5,55% menores para N2 e 7,66% e 7,67% menores para N3, respectivamente (Figura 5.14). Dessa forma, uma análise global dos custos pode ser feita por meio de comparação com os custos totais de deslocamento (Figura 5.15).

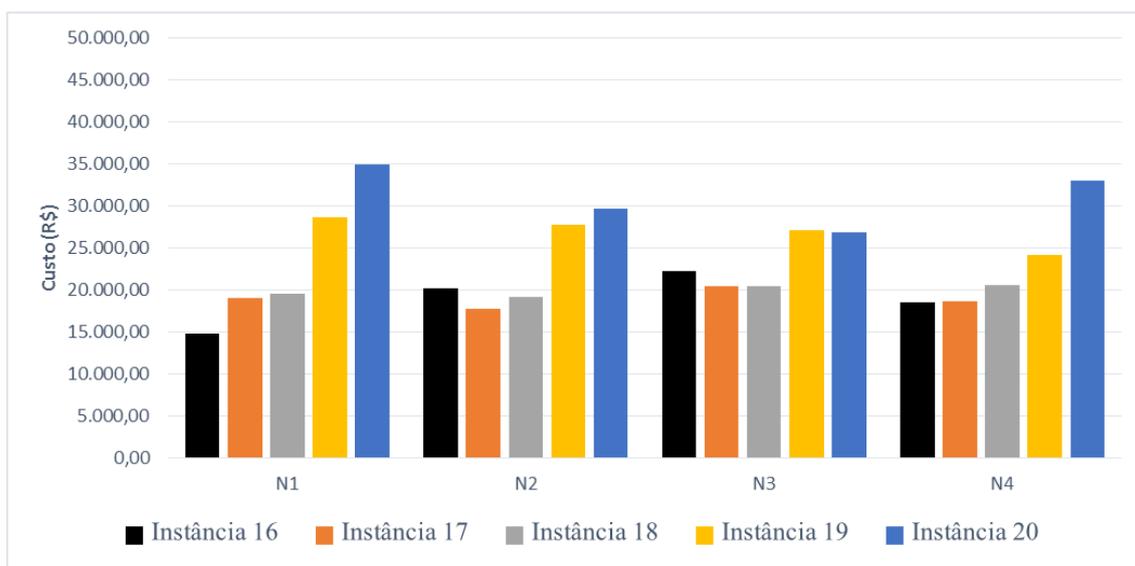


Figura 5.14 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 2 – Configuração 2

Ao comparar os custos totais de deslocamento entre as instâncias de Configuração 1 e 2 (Figura 5.15) para os pares de instâncias que possuem Grupos de Custos distintos, ou seja, Instâncias 11 e 16, 12 e 17, sucessivamente até as Instâncias 15 e 20, com exceção do par de Instâncias 14-19, todas as instâncias da Configuração 2, com 75 postos em cada um dos estágios, possuem melhores resultados.

Os ganhos potenciais com relação à redução dos custos de deslocamento são de: 5,88% para o Grupo 1 (Instâncias 11 e 16); 5,86% para o Grupo 2 (Instâncias 12 e 17); 5,18% para o Grupo 3 (Instâncias 13 e 18); e 7,54% para o Grupo 5 (Instâncias 15 e 20). Mesmo para o Grupo de Custos 4, onde ocorreu um aumento nos custos observados, este foi de apenas 0,14%.

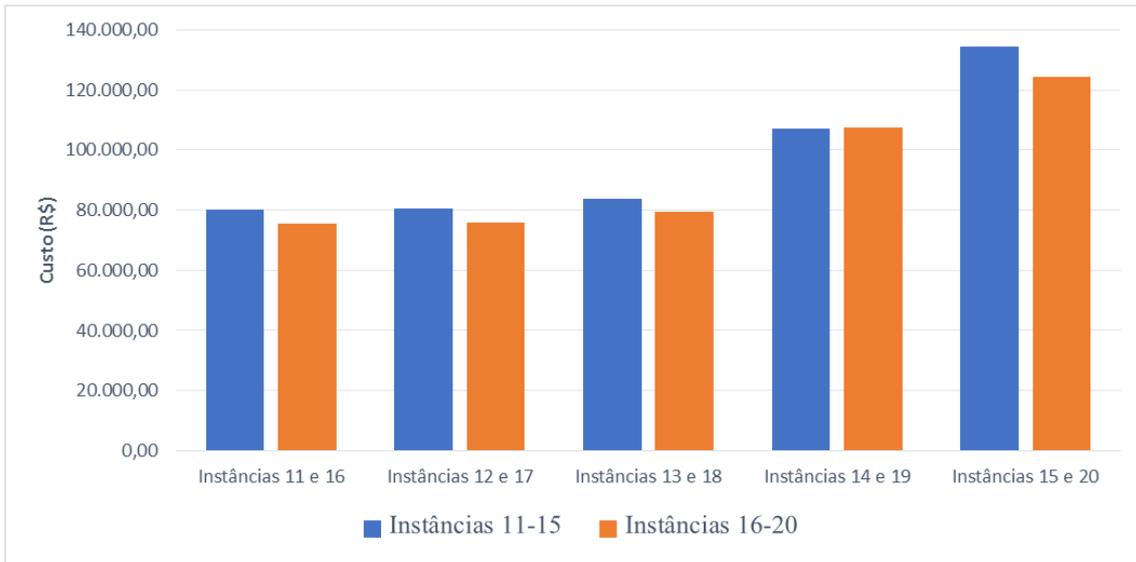


Figura 5.15 – Custo de deslocamento total para cada uma das instâncias do Cenário 2

Como previsto inicialmente, devido aos bons resultados das instâncias da Configuração 2 em termos de quantidade de OM utilizadas, em todas as comparações entre instâncias da Configuração 1 e 2, as Instâncias 16, 17, 18, 19 e 20 apresentam potenciais reduções nos custos de utilização de OM a partir da divisão igualitária de postos de pesquisa entre os Estágios N1, N2, N3 e N4.

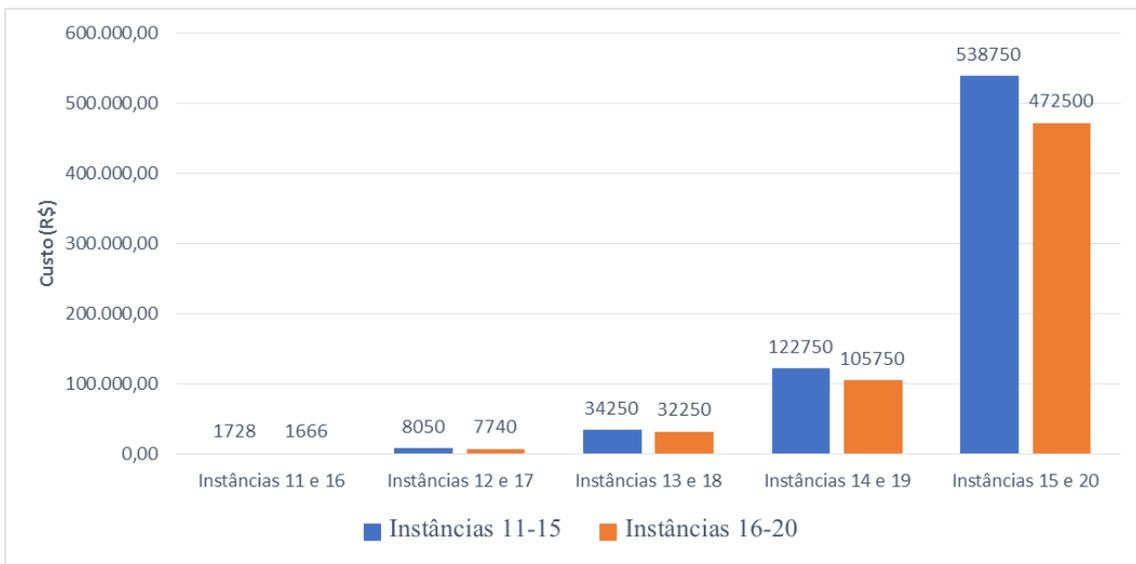


Figura 5.16 – Custos de utilização de OM por Grupo de Custos para cada uma das Instâncias do Cenário 2

As curvas que representam os custos de utilização de OM (Figura 5.16) mostram um crescimento significativo dos valores em função dos Grupos de Custos, ao mesmo tempo, os melhores resultados (menores custos) foram os das Instâncias da Configuração 2. As reduções de custo percentuais comparativas são de: 3,59% para o Grupo 1; 3,85% para o Grupo 2; 5,84% para o Grupo 3; 13,85% para o Grupo 4; e 12,30% para o Grupo 5.

Já a Figura 5.17, apresenta o comportamento dos resultados relacionados à Função Objetivo do modelo matemático, ou seja, a soma dos custos de alocação das OM aos postos de pesquisa de tráfego e os custos de utilização das mesmas durante todos os estágios da pesquisa, prevista para aplicação em 300 postos, divididos em quatro estágios.

Nesse caso, apesar dos benefícios que as instâncias da Configuração 2 apresentaram comparados à Configuração 1, para três Grupos de Custos (1, 2 e 3), quando se refere à Função Objetivo, o ganho potencial com a divisão dos postos de pesquisa em 75 postos por estágio, é inferior à 6,00%. Na comparação entre as Instâncias 11 e 16 a redução é de 5,84%, entre as Instâncias 12 e 17 já é de 5,68% e para as Instâncias 13 e 18 a redução é de 5,37%. No caso das Instâncias dos Grupos 4 e 5, as reduções proporcionadas pela Configuração 2 são de 7,33% e 11,35%, respectivamente.

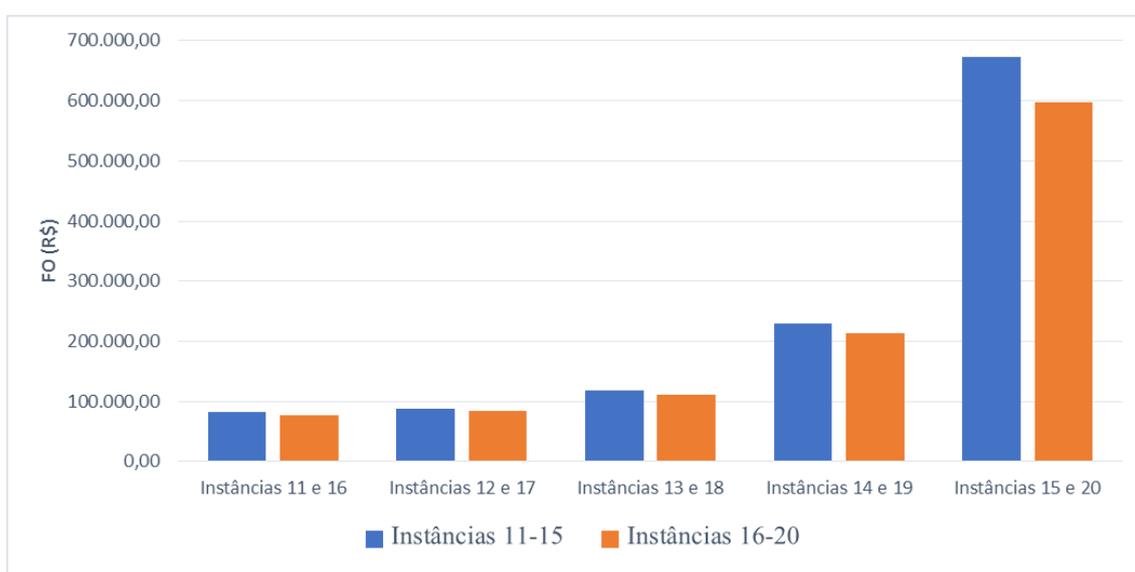


Figura 5.17 – Função Objetivo para cada uma das Instâncias do Cenário 2

No que se refere ao esforço e complexidade computacional para o Cenário 2, a Figura 5.18 mostra que, em três instâncias (15, 19 e 20), para o tempo máximo de processamento estabelecido (7.200,00 segundos) não foi possível obtenção da solução

ótima do problema. Nesses casos, o GAP % residual entre os limitantes inferior e superior (*lower bound* e *upper bound*) são de 0,29%, 1,29% e 1,29%, respectivamente (ver Tabela 5.8).

Apesar dos GAP % residuais encontrados para as Instâncias 15, 19 e 20 serem pequenos (inferiores a 2,00%), quando comparados os resultados do Cenário 2 com aqueles do Cenário 1, mostra-se que há indícios de que o modelo matemático, além de sensível aos parâmetros de entrada, é, possivelmente, sensível também à quantidade de postos de pesquisa para atendimento e quantidade de estágios da mesma.

Isso porque, assim como no Cenário 1, nas instâncias referentes aos Grupos de Custos com custos unitários de utilização de OM mais altos, o tempo necessário para resolver as instâncias foi maior. Além disso, quando a quantidade de postos de pesquisa foi ampliada (de 164 para 300) e o número de estágios passou de três para quatro, os tempos computacionais aumentaram também.

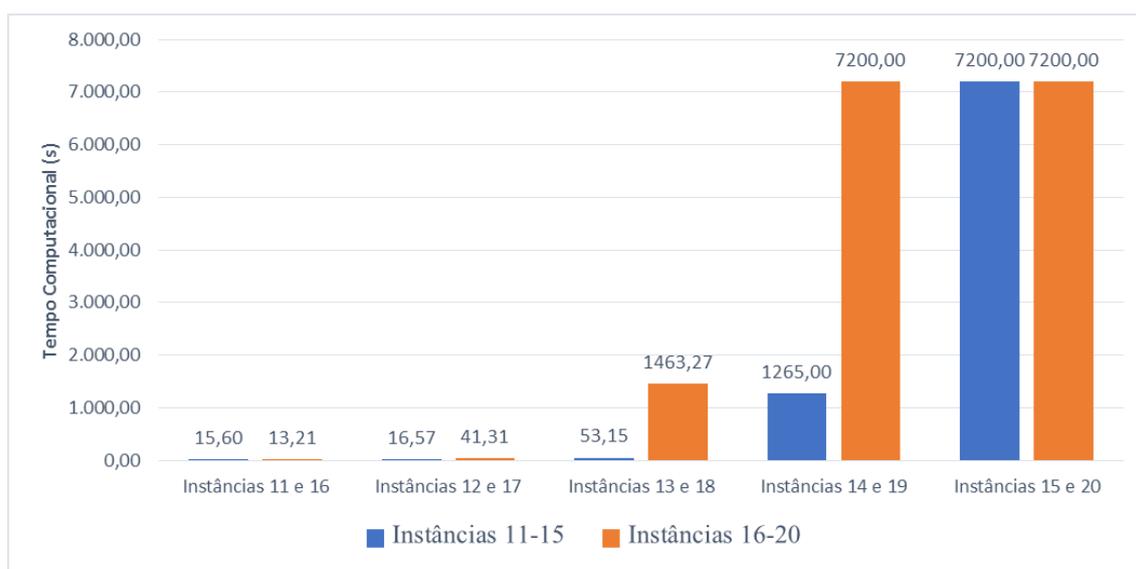


Figura 5.18 – Tempo computacional para cada uma das Instâncias do Cenário 2

O Cenário 3 apresenta instâncias maiores que aquelas do Cenário 2. Dessa forma, além das sensibilidades relacionada ao número de postos e custos, indicadas nos resultados do Cenário 2, outros fatores, como a nova quantidade de OM disponíveis (500) pode elevar ainda mais a complexidade de solução do modelo matemático.

5.2.3 Resultados Cenário 3

Como citado anteriormente, no Cenário 3, instâncias, referentes à uma pesquisa de tráfego fictícia, foram propostas. Neste cenário, 500 locais foram definidos de maneira aleatória no território nacional para receber postos de pesquisa, que devem ser atendidos em cinco estágios. Da mesma maneira, definiu-se 500 locais que representam possíveis Unidades de Apoio disponíveis para alocação de equipes de pesquisadores aos postos.

Neste novo cenário, então, têm-se cinco instâncias, que se diferenciam pelos custos de utilização das Unidades de Apoio, também chamadas nesse cenário de OM. Como indicadores de desempenho, utilizam-se os mesmos já definidos nos Cenários 1 e 2 a seguir listados: quantidade de OM por estágio durante toda a pesquisa; custo total de utilização de OM; valor total da Função Objetivo do modelo matemático; tempo computacional para solução do modelo; e GAP % residual nos casos em que o tempo máximo estipulado não for suficiente para encontrar a solução ótima.

A Figura 5.19 representa graficamente, para cada uma das instâncias, a quantidade de OM em cada estágio da pesquisa definida para o Cenário 3. Como percebido nos cenários anteriores, novamente é possível notar que a medida que os custos unitários de utilização das OM aumentam, os resultados do modelo indicam a necessidade de um número menor de OM para atendimento dos postos.

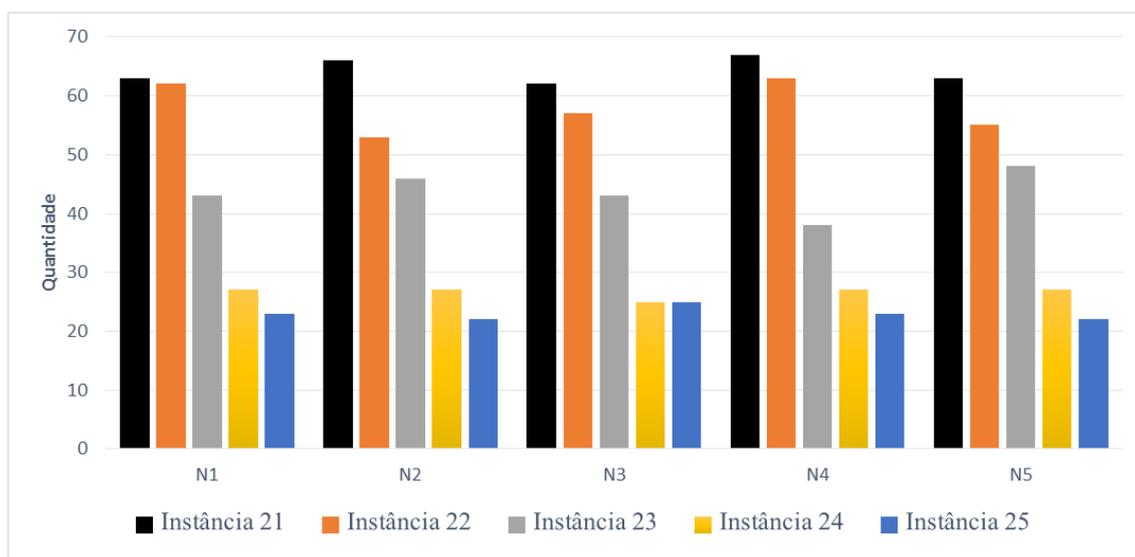


Figura 5.19 – Quantidade de OM utilizadas por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 3

Para todas as instâncias, o comportamento da quantidade de OM por estágio da pesquisa mostrou-se decrescente em função dos custos unitários de utilização das OM. No caso da Instância 21, que apresenta o maior quantitativo, para o atendimento de 100 postos de pesquisa em cada um dos estágios foram indicadas 63, 66, 62, 67 e 63 OM para os Estágios N1, N2, N3, N4 e N5, respectivamente.

Na Instância 22, que representa o Grupo 2, apesar dos resultados serem melhores comparado com a Instância 21, os resultados podem ser considerados indiferentes devido à pequena diferença encontrada entre estes. As melhorias mais significativas são percebidas a partir da Instância 23, onde os percentuais de redução, em relação à Instância 21, são de: 31,75% (N1); 30,33% (N2); 30,65% (N3); 43,28% (N4); e 23,81% (N5).

No caso da Instância 24, as reduções são ainda maiores comparado com a Instância 21, chegando à 59,70% (N4). No entanto, os melhores resultados em termos da quantidade de OM por estágio são encontrados na Instância 25, onde são necessárias entre 22 e 25 OM por estágio para atendimento de todos os postos. Cabe ressaltar que neste cenário, o número de equipes de pesquisadores varia de 1 a 5, enquanto nos demais cenários (Cenários 1 e 2), estão disponíveis no máximo 3 pelotões em cada OM.

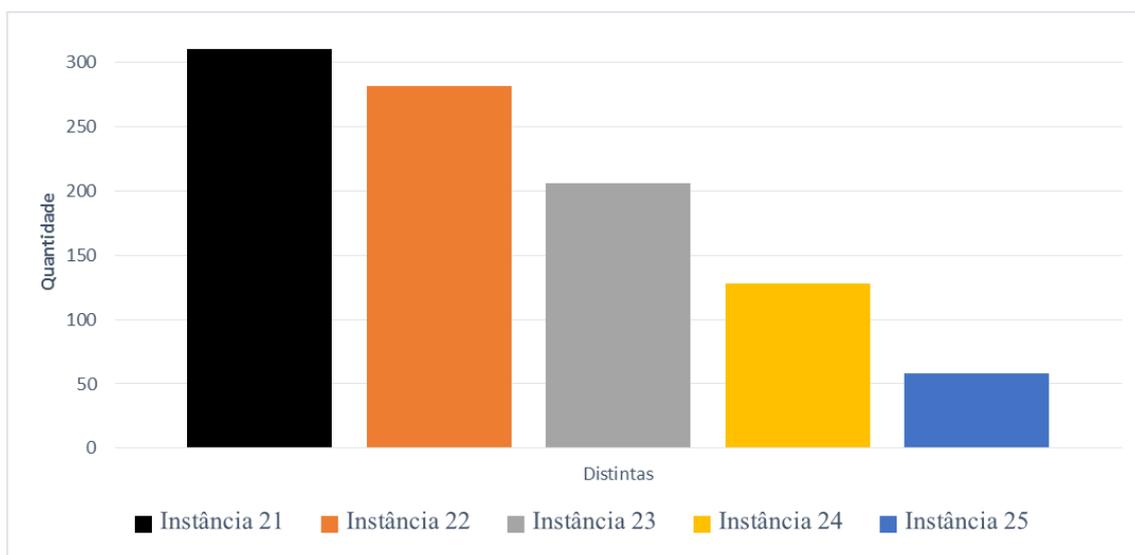


Figura 5.20 – Quantidade de OM distintas utilizadas em toda pesquisa para cada uma das instâncias do Cenário 3

De maneira análoga, a Figura 5.20 apresenta as quantidades de OM distintas utilizadas durante toda a pesquisa necessárias para atendimento dos postos. Percebe-se que entre as Instâncias 21 e 25, existe uma grande variação (81,29%). Na Instância 21 foram designadas 310 Unidades de Apoio para atendimento dos 500 postos de pesquisa, já na Instância 25, apenas 58 Unidades de Apoio são necessárias.

O Cenário 3 se diferencia dos demais uma vez que, os resultados, relativos à quantidade de Unidades de Apoio selecionadas para atendimento dos postos e os custos totais de deslocamento, são ainda mais claros. Pode-se observar isso quando comparadas, por exemplo, as Instâncias 21 e 25, pior e melhor resultado, respectivamente, referente aos indicadores estabelecidos para as análises. A Figura 5.21(a) representa as alocações para a Instância 21 e a Figura 5.21(b) para a Instância 25.

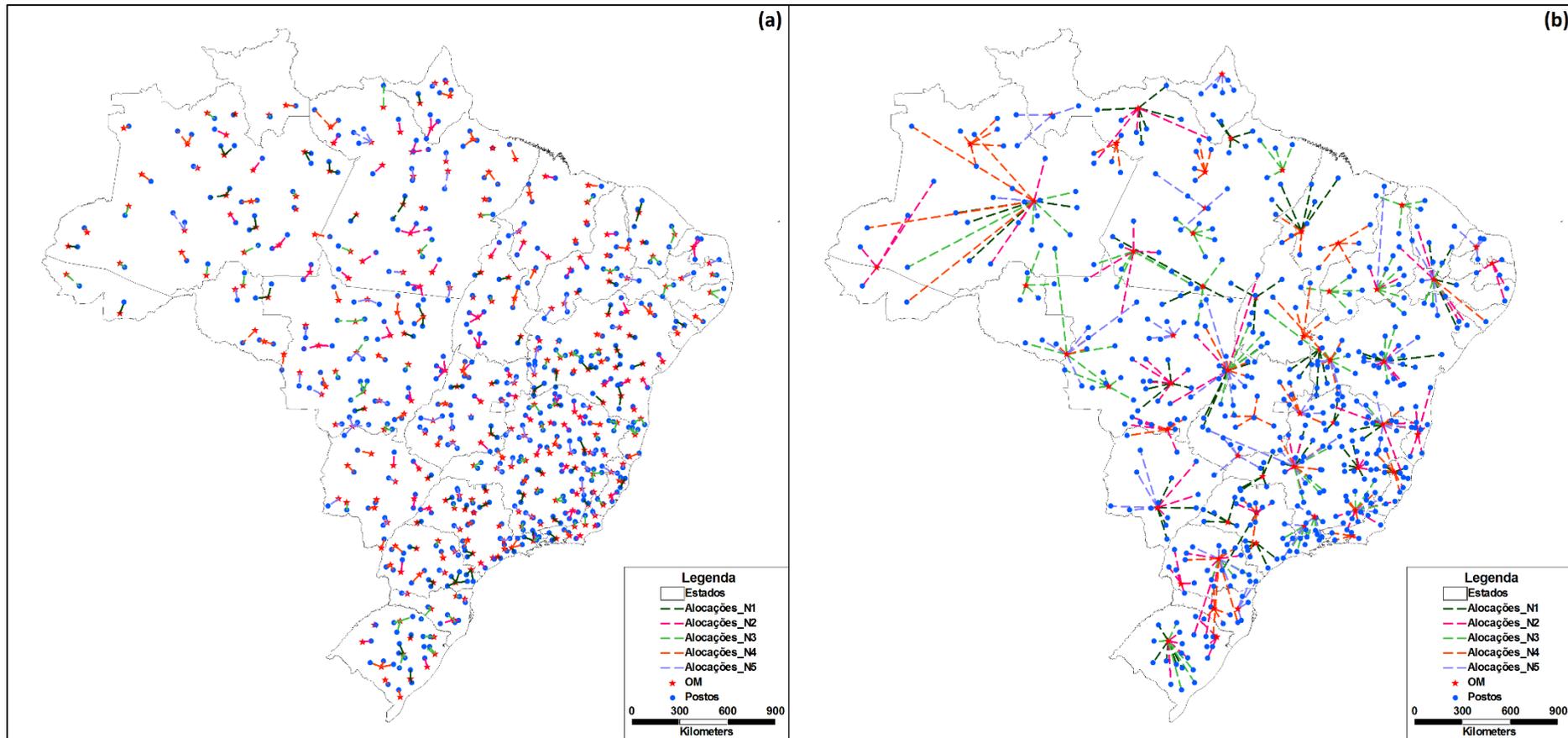


Figura 5.21 – Mapa comparativo das alocações estabelecidas, por estágio, nas Instâncias 21(a) e 25(b)⁴.

⁴ Cabe ressaltar que este mapa representa uma pesquisa de tráfego fictícia que tem como objetivo testar a aplicabilidade do modelo matemático em situações complexas com muitos pontos de pesquisa, muitas Unidades de Apoio e muitos estágios.

Novamente, pode-se observar que a redução da quantidade de OM aumenta os custos de deslocamento das equipes de pesquisadores. A Figura 5.22 representa o comportamento dos custos de deslocamento por estágio da pesquisa para o Cenário 3.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 5.22, é possível constatar que as Instâncias 24 e 25 apresentam os maiores custos de deslocamento nos estágios da pesquisa. A Instância 24 apresenta custos entre 37,72% (N1) e 59,39% (N3) maiores que os da Instância 23. Já na comparação entre as Instâncias 24 e 25, o aumento nesses custos está entre 81,40% (N5) e 123,85% (N1).

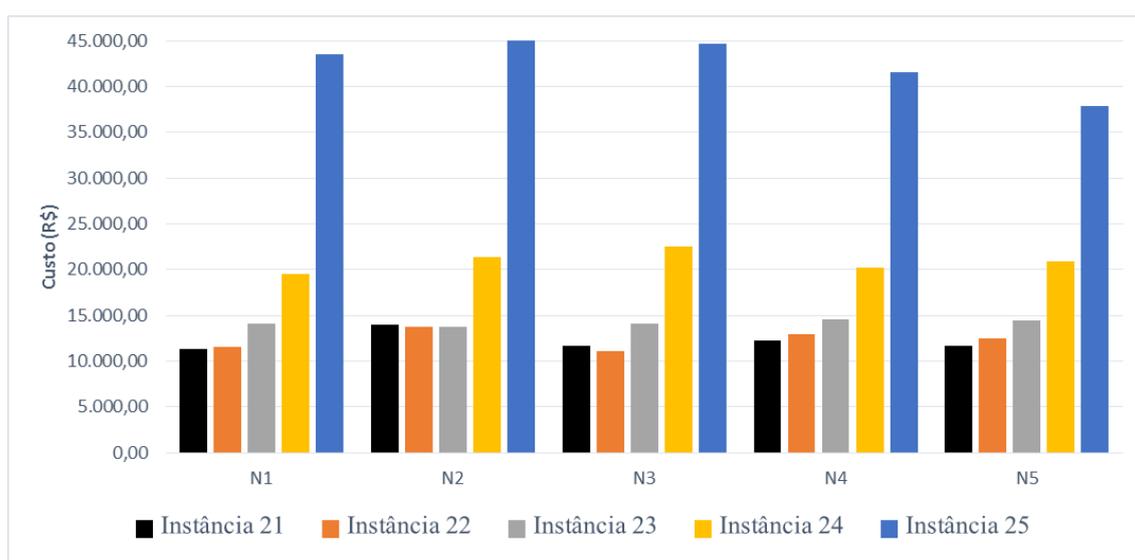


Figura 5.22 – Custo de deslocamento por estágio para cada uma das instâncias do Cenário 3

De forma contrária à tendência de aumento dos custos de deslocamento, na variação do Grupo 1 para o 2 (Instância 21 para a Instância 22) em N2 e N3, e na variação do Grupo 2 para o 3 (Instância 22 para a Instância 23) em N2, pequenas variações percentuais negativas nos custos são percebidas. No primeiro caso (Grupo 1 para o Grupo 2, Estágios N2 e N3), ocorreu uma redução nos custos de 1,36% e 4,76% e, no segundo (Grupo 2 para o Grupo 3, Estágio N2), redução de 0,12%.

Contudo, quando a análise é feita para os custos totais de deslocamento em toda a pesquisa, existe uma tendência sempre crescente dos custos de deslocamento em função dos custos de utilização das Unidades de Apoio (Figura 5.23). Ao comparar a Instância 25, de maior custo unitário de utilização, com a Instância 21, que apresenta o menor custo unitário de utilização, nota-se que o custo total de deslocamento é 250,97% maior. No

entanto, na comparação entre as Instâncias 21 e 22, esse aumento é de apenas 1,55%. Isso reforça a necessidade de uma análise considerando o possível *trade-off* existente.

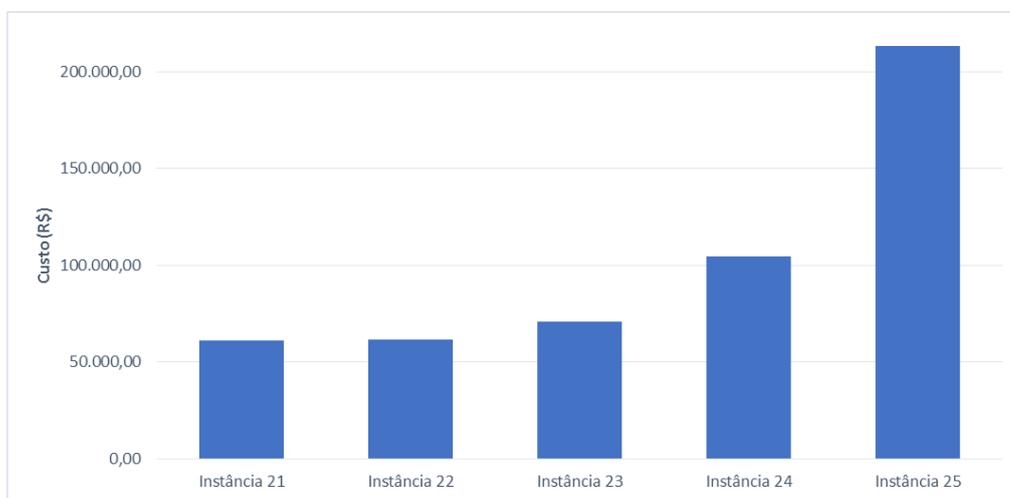


Figura 5.23 – Custo de deslocamento total para cada uma das instâncias do Cenário 3

Diante do exposto, os resultados desse cenário, consubstanciados pelos resultados dos cenários anteriores, evidenciam o *trade-off* existente entre a quantidade de Unidades de Apoio, os custos unitários de utilização destas e os custos de deslocamento durante as pesquisas.

Com relação aos custos de utilização das Unidades de Apoio, a Figura 5.24 mostra que, as variações nos Grupos de Custos resultam em crescimento significativo nos custos de utilização, apesar das reduções nas quantidades de Unidades de Apoio.

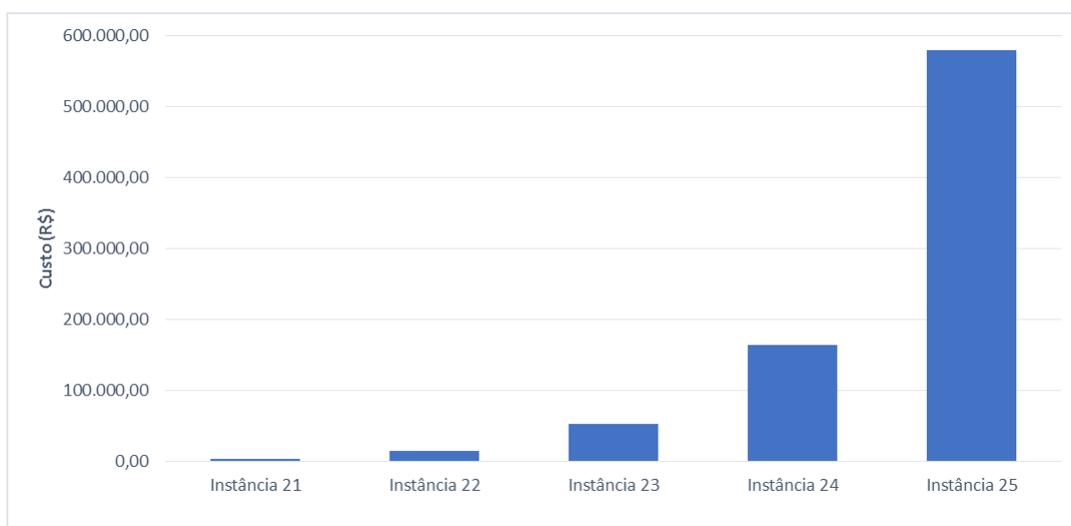


Figura 5.24 – Custos de utilização de OM por Grupo de Custos para cada uma das Instâncias do Cenário 3

A curva que descreve o comportamento da Função Objetivo, Figura 5.25, possui comportamento similar aos custos de utilização das Unidades de Apoio, contudo, na Função Objetivo os custos de deslocamento também estão presentes. Os resultados mostram que apesar da redução que ocorreu nas quantidades de Unidades de Apoio, forçada pelo aumento nos custos de utilização, isso não foi suficiente para reduzir o valor total da Função Objetivo.

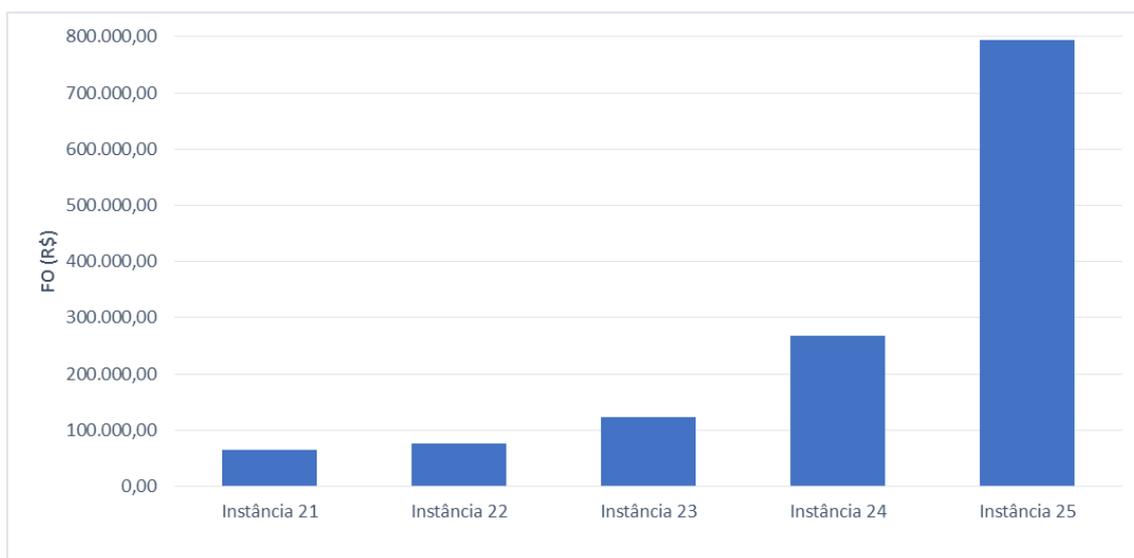


Figura 5.25 – Função Objetivo para cada uma das Instâncias do Cenário 3

No Cenário 3, no que diz respeito ao tempo e complexidade computacional no processo de solução do modelo matemático, um aumento significativo pode ser observado. No caso das instâncias que estão relacionadas aos Grupos 1 e 2, nesse Cenário 3 as Instâncias 21 e 22, enquanto o maior tempo encontrado nos demais testes (Instâncias 1, 2, 6, 7, 11, 12, 16 e 17) foi inferior a 42 segundos, no Cenário 3 foram necessários 1.903,30 e 1.804,00 segundos para as Instâncias 21 e 22, respectivamente (Figura 5.26).

Para as Instâncias 23, 24 e 25, com o tempo máximo de 7.200,00 segundos, em nenhum dos casos foi possível obter a solução ótima (Figura 5.26). Além disso, é importante ressaltar que os indícios constatados no Cenário 2, referentes à complexidade computacional associada à quantidade de postos de pesquisa e aos parâmetros do modelo, se confirmam nesse cenário.

Para essas instâncias, fica claro com o comportamento do GAP % residual, que com os mesmos 7.200,00 segundos e com as mudanças nos custos de utilização, o valor do GAP aumenta significativamente de 5,59% na Instância 23 para 21,57% na Instância 24 e para 31,83% na Instância 25. Sendo assim, esse cenário indica que a implementação

de novas técnicas de solução, tais como heurísticas e meta-heurísticas, que são aproximativas, podem ser necessárias em problemas maiores.

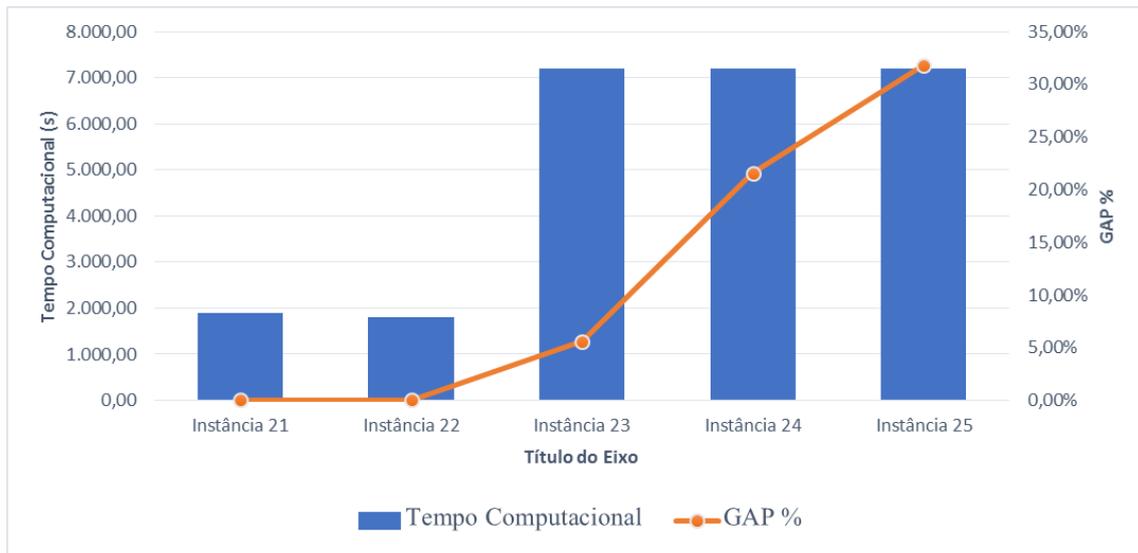


Figura 5.26 – Tempo computacional e GAP % residual para cada uma das instâncias do Cenário 3

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da discussão teórica apresentada foi possível melhor compreender o funcionamento de pesquisas de tráfego rodoviário de grande porte já realizadas no Brasil, e ao mesmo tempo, identificar a necessidade de desenvolvimento de novas ferramentas para auxiliar no processo de planejamento dessas pesquisas.

Um dessas necessidades identificadas, está relacionada ao processo de localização de Unidades de Apoio para atendimento dos postos de pesquisa. Devido a sua alta complexidade logística e de operação, as pesquisas de tráfego, em especial as de grande porte, exigem grande mobilização de recursos, financeiros, materiais e de mão-de-obra que precisam ser gerenciados com responsabilidade.

Dessa forma, o presente estudo contribui para o planejamento das pesquisas de maneira a permitir, por meio de um modelo matemático de otimização, o uso eficiente dos recursos relacionados, principalmente, ao deslocamento de equipes de pesquisadores, a partir das Unidades de Apoio até os postos de pesquisa, e da utilização dessas facilidades.

Portanto, o objetivo principal desse estudo foi atingido, visto que a modelagem matemática proposta de localização-alocação de Unidades de Apoio para auxiliar pesquisas de tráfego com múltiplos estágios permite indicar, dado um conjunto de locais possíveis, quais Unidades de Apoio devem ser utilizadas e, ainda, a quais postos de pesquisa as equipes de pesquisadores devem ser alocadas para minimizar os custos totais envolvidos.

Por meio dos três cenários criados para aplicação e experimentos computacionais do modelo foi possível: (Cenário 1) validar o modelo matemático – utilizando comparação de resultados com a Pesquisa Nacional de Tráfego realizada em 2011 e, principalmente, com os resultados satisfatórios obtidos; (Cenário 2) realizar análises referente à aplicação do modelo matemático na nova pesquisa de tráfego prevista para os anos de 2016 e 2017, com duas possíveis configurações de divisão dos postos entre os estágios da pesquisa; e (Cenário 3) estudar o comportamento do modelo matemático e dos resultados obtidos para uma pesquisa de tráfego projetada, de maior porte comparado com as demais.

Para análise dos resultados foram estabelecidos indicadores de desempenho que avaliam a quantidade de Unidades de Apoio utilizadas por estágio e de Unidades de Apoio distintas durante toda a pesquisa, os custos relacionados com o deslocamento das equipes

de pesquisadores até os postos de pesquisa que foram designados para atendimento, os custos incorridos pela utilização de Unidades de Apoio durante a pesquisa, os custos totais (Função Objetivo), e ainda, aqueles relacionados ao desempenho computacional, como tempo de execução e GAP% residual.

Como sugestões para trabalhos futuros, acredita-se que a modelagem matemática proposta neste estudo pode ser ampliada, ou mesmo, incorporada ao processo de planejamento da localização dos postos de pesquisa. Nesse estudo, adota-se como parâmetro de entrada esses locais onde são, efetivamente, realizadas as pesquisas de tráfego.

Contudo, tal processo de localização envolve questões complexas em termos de análises da rede – mapeamento e georreferenciamento viário, informações prévias acerca de origem e destino de viagens, volumes médios diários e anuais de tráfego, entre outros – que influenciam diretamente no processo de escolha dos locais. Dessa forma, espera-se que uma modelagem matemática que determine, simultaneamente, a localização dos postos de pesquisa e das Unidades de Apoio, permita reduções de custos ainda maiores.

Outra possível abordagem está relacionada à estudos específicos para detalhamento da composição e estimativas mais precisas para os custos de deslocamento e utilização das Unidades de Apoio, auxiliando então, na correta determinação desses parâmetros de entrada do modelo.

Além disso, os experimentos computacionais, principalmente para o Cenário 3, mostram que a complexidade envolvida na solução desses problemas justifica estudos voltados para métodos de otimização específicos, tais como heurísticas e meta-heurísticas, com a finalidade de obtenção de boas soluções com tempo computacional reduzido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CNT – Confederação Nacional do Transporte, 2015, Preços da Gasolina e do Diesel. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?n=10030&t=aumento-de-impostos-elevar%20o-preco-da-gasolina-e-do-diesel>. Acesso em: dez/2015.
- ALUMUR, S. A., YAMAN, H., KARA, B. Y., 2012, “Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 48, n. 6, pp. 1107-1120.
- ANSARI, S., MCLAY, L. A., MAYORGA, M. E., 2015, “A maximum expected covering problem for district design”. *Transportation Science*, pp. 1-15.
- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2008, Estudos para quantificação do impacto sobre o equilíbrio econômico e financeiro do contrato de concessão da BR-392/RS no trecho Pelotas–Rio Grande. Obras de duplicação. Brasília, DF.
- ARAKAKI, R. G. I., 2003, *Heurística de localização-alocação para problemas de localização de facilidades*. Tese de Doutorado, Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos/SP, 79 p.
- ARAKAKI, R. G. I.; LORENA, L. A. N., 2006, “Uma Heurística de Localização-Alocação (HLA) para Problemas de Localização de Facilidades”. *Produção*, v. 16, n. 2, pp. 319-328.
- BALLOU, R. H., 2006, *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. 5 ed. Porto Alegre/RS, Bookman.
- BATAGLIN, L. M. C., ALEM, D., 2014, “The location-distribution problem in the megadisaster of the Mountain region in Rio de Janeiro”. *Gestão & Produção*, v. 21, n. 4, pp. 865-881.
- BERA, S., RAO, K. V., 2011, “Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art”. *European Transport \ Trasporti Europei*, v. 49, pp. 2-23.
- BERGE, C., 1957, “Two theorems in graph theory”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 43, n. 9, pp. 842-844.
- BHATNAGAR, R., JAYRAM, J., PHUA, Y. C., 2003, “Relative Importance of Plant Location Factors: a Cross National Comparison Between Singapore and Malaysia”. *Journal of Business Logistics*, n. 24, pp. 147-170.

- BIANCO, L., CONFESSORE, G., REVERBERI, P., 2001, “A network based model for traffic sensor location with implications on O/D matrix estimates”. *Transportation Science*, v. 35, n. 1, pp. 50-60.
- BRANDEAU, M. L., CHIU, S. S., 1989, “Overview of Representative Problems” *Management Science*, v. 6, n. 35, pp. 645-674.
- BRASIL, 2011, Portal do Brasil - Cinco mil pessoas farão Pesquisa Nacional de Tráfego em todos os Estado. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/defesa-e-seguranca/2011/09/cinco-mil-pessoas-farao-pesquisa-nacional-de-trafego-em-todos-os-estados>>. Acesso em: jan/2016.
- CALDAS, M. A. F., MELLO, J. C. C. B. S., MEZA, L. A., AZEVEDO, F., 2009, “Uso do Método de Copeland Hierárquico para Localização de Terminal Multimodal de Cargas”. *XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, Vitória/ES.
- CALIPER, 2008, TransCAD Transportation GIS Software – Routing and Logistics with TransCAD 5.0. Caliper Corporation, Newton, EUA.
- CAMARA, M. V. O., RIBEIRO, G. M., QUADROS, S. G. R., HORA, A., NASCIMENTO, J. F., ABRAMIDES, C. A., 2015, “Modelagem matemática para localização-alocação de organizações militares a postos de pesquisa de tráfego”. *XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO*, Porto de Galinhas/PE.
- CHANTA, S., MAYORGA, M. E., MCLAY, L. A., 2014, “Improving emergency service in rural areas: a bi-objective covering location model for EMS systems”. *Annals of Operations Research*, v. 221, n. 1, pp. 133-159.
- CHAVES, A. A., CORREA, F. A., LORENA, L. A. N., 2007, “Clustering Search Heuristic for the Capacitated p-Median Problem”. *Springer Advances in Software Computing Series*, n. 44, pp. 136-143.
- CHEN, A., PRAVINVONGVUTH, S., CHOOTINAN, P., LEE, M., RECKER, W., 2007, “Strategies for selecting additional traffic counts for improving OD trip table estimation”. *Transportmetrica*, v. 3, n. 3, pp. 191-211.
- CHOOTINAN, P., CHEN, A., YANG, H., 2005, “A bi-objective traffic counting location problem for origin-destination trip table estimation”. *Transportmetrica*, v. 1, n. 1, pp. 65-80.
- CHUANG, P. T., 2001, “Combining the Analytic Hierarchy Process and Quality Function Deployment for Location Decision from a Requirement Perspective”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n. 18, pp. 842-849.

- CHURCH, R., ReVELLE, C., 1974, “The maximal covering location problem”. *Papers in regional science*, v. 32, n. 1, pp. 101-118.
- COSTA, M. B. B., 2014, *Utilização De Modelo De Localização-Alocação Para Identificação De Zoneamento Logístico Integrado Ao Planejamento Estratégico De Transportes*. Tese Doutorado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- COSTA, M. G., CAPTIVO, M. E., CLÍMACO, J., 2008, “Capacitated single allocation hub location problem - A bi-criteria approach”. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 11, pp. 3671-3695.
- CRAINIC, T. G. A., 2002, Survey of Optimisation Models for Long-Haul Freight Transportation. Handbook of Transportation Science, RW Hall, Editor.
- CRAINIC, T., LAPORTE, G., 1997, “Planning Models for Freight Transportation”. *European Journal of Operational Research*, n. 97, pp. 409-438.
- DASKIN, M. S., 1995, *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. New York, Wiley Interscience.
- DASKIN, M. S., 2013, *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*. 2 ed. John Wiley & Sons.
- DIAZ, J. A., FERNANDEZ, E., 2006, “Hybrid Scatter Search and Path Relinking for the Capacitated p-Median Problem”. *European Journal of Operational Research*, n. 169, pp. 570–585.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006, Plano de Investimento em Transportes para os Eixos Rodoviários de Escoamento da Soja – Operação Safra. Brasília, DF.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2005, Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem – PDNEP. Brasília, DF.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2015, Plano Nacional de Contagem de Tráfego. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/contagem-de-trafego>>. Acesso em: dez/2015.
- DUBKE, A. F., 2006, *Modelo de Localização de Terminais Especializados: um Estudo de Caso em Corredores de Exportação da Soja*. Tese de Doutorado, Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica – PUC. Rio de Janeiro/RJ. 177p.
- EHLERT, A., BELL, M. G. H; GROSSO, S., 2006, “The Optimisation of Traffic Count Locations in Road Networks”. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 40, n. 6, pp. 460-479.

- ENVIRONMENTAL REVIEW, 2004, Origin-Destination Survey Results Summary. Disponível em: <<http://www.newnybridge.com/documents/study-documents/old-study-docs/origin-destination-results-200403.pdf>>. Acesso em: fev/2016.
- EXÉRCITO BRASILEIRO, 2011, Exército Brasileiro executa a 2ª Pesquisa Nacional de Tráfego, no período de 23 a 30 de setembro, em 120 postos distribuídos pelo país. Disponível em: <<http://www.decex.ensino.eb.br/default.php?url=trafego>>. Acesso em: dez/2015.
- EXÉRCITO BRASILEIRO, 2015a, Estrutura Organizacional – Exército Brasileiro. Disponível em: <<http://www.eb.mil.br/web/guest/estrutura-organizacional>>. Acesso em: dez/2015.
- EXÉRCITO BRASILEIRO, 2015b, Quartéis por Estado – Exército Brasileiro. Disponível em: <<http://www.eb.mil.br/web/guest/quarteis-por-estado1>>. Acesso em: dez/2015.
- FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M., ARABANI, A. B., NIKBAKHS, E., 2013, “Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 64, pp. 1096–1109.
- FARAHANI, R.Z., STEADIESEI, M., ASGARI, N., 2010, “Multiple Criteria Facility Location Problems: a Survey”. *Applied Mathematical Modelling*, n. 34, pp. 1689-1709.
- FERRI, G. L., CHAVES, G. L. D., RIBEIRO, G. M., 2015, “Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement”. *Waste Management*, v. 40, pp. 173-191.
- GALVÃO, F. A., GUALDA, N. D. F., CUNHA, C. B., 2003, “An Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for Locating a Distribution Center”. In: *International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, Bali, Indonésia.
- GAN, L., YANG, H., WONG, S. C., 2005, “Traffic counting location and error bound in origin-destination matrix estimation problems”. *Journal of Transportation Engineering*, v. 131, n. 7, pp. 524-534.
- GARBER, N., HOEL, L., 2009, *Traffic and highway engineering*. 4 ed. Cengage Learning.
- GELAREH, S., MONEMI, R. N., NICKEL, S., 2015, “Multi-period hub location problems in transportation”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 75, pp. 67-94.
- GIBD – Gujarat Infrastructure Development Board, 2005, Classified Volume Count and

Origin-Destination Survey of Bhavnagar – Vataman Road and Rajkot – Ahmadabad Road. Disponível em: < <http://www.gidb.org/pdf/trafficsurvey.pdf>>. Acesso em: fev/2016.

GUIMARÃES, V. de A., 2015, *Modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística considerando as demandas par-a-par*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

HAKIMI, S. L., 1964, “Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph”. *Operations research*, v. 12, n. 3, pp. 450-459.

HAKIMI, S. L., 1965, “Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems”. *Operations Research*, v. 13, n. 3, pp. 462-475.

HAMACHER, H. W., NICKEL, S., 1996, “Multicriteria Planar Location Problems”. *European Journal of Operational Research*, v. 94, n. 1, p. 66-86.

HOMBURGER, W. S., HALL, J. W., LOUTZENHEISER, R. C., REILLY, W. R., 1996, *Fundamentals of Traffic Engineering*. 14 ed., Institute of Transportation Studies - University of California, Berkeley, CA.

HURTER, A. P., MARTINICH, J. S., 1989, *Facility Location and the Theory of Production*. Boston/MA, Kluwer.

IBM, 2015, IBM ILOG CPLEX versão 12.6.

IRAWAN, C. A., SALHI, S., 2015, “Aggregation and Non Aggregation Techniques for Large Facility Location Problems – A Survey”. *Yugoslav Journal of Operations Research*, v. 25, n. 3, pp. 313-341.

KIM, H. J., CHUNG, H. I., CHUNG, S. Y., 2003, “Selection of the optimal traffic counting locations for estimating origin-destination trip matrix”. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 5, pp. 1353-1365.

KLOSE, A., DREXL, A., 2005, “Facility location models for distribution system design”. *European Journal of Operational Research*, v. 162, pp. 4–29.

KRARUP, J., PRUZAN, P.M., 1990 “Ingredients of Location Analysis”. In: Mirchandani, P.B. e Francis, R.L. (Eds) *Discrete Location Theory*, New York, John Wiley, pp. 1-54.

LOPEZ, R.A., HENDERSON, N. R., 1989, “The Determinants of Location Choices for Food Processing Plants”. *Agrobusiness*, v. 5, pp. 619-632.

LORENA, L. A. N., SENNE, E. L. F., 2004, “A column generation approach to

- capacitated p-median problems”. *Computers & Operations Research*, v. 31, n. 6, pp. 863-876.
- LORENA, L. A. N., SENNE, E. L. F., PAIVA, J. A. C., PEREIRA, M. A., 2001, “Integração de Modelos de Localização a Sistemas de Informações Geográficas”. *Gestão e Produção*, v. 8, n. 2. Departamento de Engenharia de Produção – DEP, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos/SP, pp. 180-195.
- MELO, M. T., NICKEL, S., SALDANHA-DA-GAMA, F., 2009, “Facility Location and Supply Chain Management – A Review”. *European Journal of Operational Research*, v. 2, n. 196, pp. 401–412.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, DNIT, 2011, Pesquisa Nacional de Tráfego – PNT. Brasília: Secretaria de Política Nacional de Transportes, DF.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2015, Rodovias: Contagem de tráfego nas rodovias terá maior precisão. Disponível em: <<http://transportes.gov.br/component/content/article.html?id=3104>>. Acesso em: dez/2015.
- MLADENOVIC, N., LABBÉ, M., HANSEN, P., 2003, “Solving the p-Center Problem with Tabu Search and Variable Neighborhood Search”. *Networks*, v. 42, n. 1, pp. 48- 64.
- MT – Ministério dos Transportes, 2011, “Pesquisa Nacional de Tráfego 2011: Volumétrica e Origem e Destino”. Secretaria de Política Nacional de Transportes – SPNT do Ministério dos Transportes – MT. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.mecon.gov.ar/peconomica/dnper/documentos/BR_LRodrigues_Pesquisa_Nacional.pdf>. Acesso em: fev/2016.
- NOGUEIRA, T. A. F. M. P., 2007, *Localização de Unidades de Fornecimento de Gás Natural na Rede Primária de Gasodutos*. Tese de Doutorado. Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal. 281 p.
- NTS – National Travel Survey, 2015, National Travel Survey: England 2014. Department for Transport. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457752/nts2014-01.pdf>. Acesso em: fev/2016.
- PNT, 2011, Portal da Pesquisa Nacional de Tráfego de 2011 – Importância das pesquisas. Disponível em: <http://www.pnt2011.com.br/pesquisa_principal.cfm>. Acesso em: jan/2016.

- REBREYEND, P., LEMARCHAND, L., EULER, R., 2015, “A Computational Comparison of Different Algorithms for Very Large p-median Problems”. In: *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Springer International Publishing, 2015. pp. 13-24.
- ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S.; MCSHANE, W. R., 2004, *Traffic engineering*. 3 ed. Prentice Hall.
- ROMERO, B. C., 2006, *Análise de Localização de Plataformas Logísticas: Aplicação ao Caso do ETSP – Entrepósito Terminal São Paulo da CEAGESP*. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI/USP, São Paulo/SP, 143 p.
- SARKAR, P. K., MAITRI, V., JOSHI, G. J., 2015, *Transportation Planning: Principles, Practices and Policies*. New Delhi, PHI Learning Private Limited.
- SCOTTISH EXECUTIVE, 2004, Roadside Interview Survey Guidance. Disponível em: <<http://www.gov.scot/Resource/Doc/30859/0026580.pdf>>. Acesso em: fev/2016.
- SENNE, E. L. F, LORENA, L. A. N., PEREIRA, M. A., 2005, “A branch-and-price approach to p-median location problems”. *Computers & Operations Research*, v. 32, n. 6, pp. 1655-1664.
- SPNT – Secretaria de Política Nacional de Transportes, 2015, Pesquisa Nacional de Tráfego. Brasília, DF. Disponível em: <http://portaldaestrategia.transportes.gov.br/images/Ciclo%20de%20Apresentacoes/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_PNT.pdf>. Acesso em: jan/2016.
- SUN, D. J., CHANG, Y., ZHANG, L., 2012, “An ant colony optimisation model for traffic counting location problem”. *Proceedings of the ICE-Transport*, v. 165, n. 3, pp. 175-185.
- SUZUKI, A., DREZNER, Z., 1996, “The p-center location problem in an area”. *Location science*, v. 4, n. 1, pp. 69-82.
- TANSEL, B. C., FRANCIS, R. L., LOWE, T. J., 1983, “State of the art—location on networks: a survey. Part I: the p-center and p-median problems”. *Management Science*, v. 29, n. 4, pp. 482-497
- TOREGAS, C., SWAIN, R., REVELLE, C., BERGMAN, L., 1971, “The location of emergency service facilities”. *Operations Research*, v. 19, n. 6, pp. 1363-1373.
- U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 1996, Travel Survey Manual. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other_reports/1392a.pdf>.

Acesso em: fev/2016.

- YAGHINI, M., KARIMI, M., RAHBAR, M., 2013, “A hybrid metaheuristic approach for the capacitated p-median problem”. *Applied Soft Computing*, v. 13, n. 9, p. 3922-3930.
- YANG, H., IIDA, Y., SASAKI, T., 1991, “An analysis of the reliability of an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts.” *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 25, n. 5, pp. 351-363.
- YANG, H., ZHOU, J., 1998, “Optimal traffic counting locations for origin–destination matrix estimation.” *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 32, n. 2, pp. 109-126.
- YANG, J., LEE, H., 1997, “A AHP Decision Model for Facility Location Selection”. *Facilities*, n. 15, pp. 241-254.
- YIN, P., MU, L., 2012, “Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles”. *Applied Geography*, v. 34, p. 247-254.
- ZHOU, X., LIST, G. F., 2010, “An information-theoretic sensor location model for traffic origin-destination demand estimation applications”. *Transportation Science*, v. 44, n. 2, pp. 254-273.

APÊNDICE 1 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DA PESQUISA NACIONAL DE TRÁFEGO DE 2011

A seguir, na Tabela I.1, estão relacionados os Postos de Pesquisa da PNT de 2011 com sua localização, rodovia e código do Sistema Nacional de Viação – SNV correspondente, o Estado da Federação e Município que se localiza o posto, bem como os estágios da pesquisa de 2011 que cada um dos postos foi utilizado.

Tabela I.1 – Localização dos Postos de Pesquisa da PNT de 2011

Posto	Rodovia	Código SNV	UF	Município	Estágios da Pesquisa
001	BR-364	364BAC1590	AC	Senador Guiomard	2
002	BR-163	163BMT0730	MT	Sorriso	2
003	BR-101	101BAL0670	AL	Messias	2
004	BR-101	101BAL0890	AL	Olho d'Água Grande	2
005	BR-316	316BAL0950	AL	Palmeira dos Índios	2
006	BR-110	110BBA0750	BA	Alagoinhas	1, 2 e 3
007	BR-101	101BBA1754	BA	Itacaré	2
008	BR-116	116BBA0690	BA	Feira de Santana	2
009	BR-116	116BBA0934	BA	Planalto	2
010	BR-242	242BBA0138	BA	Palmeiras	1, 2 e 3
011	BR-407	407BBA0300	BA	Senhor do Bonfim	2
012	BR-020	020BCE0530	CE	Tauá	2
013	BR-116	116BCE0080	CE	Pacajus	2
014	BR-116	116BCE0250	CE	Icó	2
015	BR-101	101BES2195	ES	Linhares	2
016	BR-101	101BES2470	ES	Iconha	2
017	BR-262	262BES0070	ES	Viana	2
018	BR-259	259BES0015	ES	Colatina	2
019	BR-020	020BGO0110	GO	Formosa	2
020	BR-050	050BGO0090	GO	Ipameri	2
021	BR-060	060BGO0112	GO	Anápolis	2
022	BR-153	153BGO0340	GO	Porangatu	2
023	BR-153	153BGO0770	GO	Araporã	2
024	BR-364	364BGO0510	GO	Jataí	1, 2 e 3
025	BR-135	135BMA0050	MA	Bacabeira	2
026	BR-135	135BMA0150	MA	Peritoró	2
027	BR-222	222BMA0680	MA	Açailândia	2
028	BR-122	122BMG0670	MG	Francisco Sá	2
029	BR-316	316BMA0360	MA	Caxias	2
030	BR-040	040BMG0150	MG	João Pinheiro	2
031	BR-135	135BMG0970	MG	Esmeraldas	2
032	BR-356	040BMG0400	MG	Belo Horizonte	2

Posto	Rodovia	Código SNV	UF	Município	Estágios da Pesquisa
033	BR-040	040BMG0570	MG	Juiz de Fora	2
034	BR-050	050BMG0250	MG	Uberlândia	2
035	BR-116	116BMG1130	MG	Teófilo Otoni	2
036	BR-116	116BMG1280	MG	Santa Rita de Minas	2
037	BR-116	116BMG1430	MG	Leopoldina	2
038	BR-135	135BMG0850	MG	Curvelo	2
039	BR-153	153BMG0870	MG	Comendador Gomes	1, 2 e 3
040	BR-262	262BMG0890	MG	Araxá	2
041	BR-265	265BMG0230	MG	Itumirim	2
042	BR-352	352BMG0215	MG	Carmo do Paranaíba	2
043	BR-354	354BMG0100	MG	Patos de Minas	2
044	BR-365	365BMG0370	MG	Canápolis	2
045	BR-381	381BMG0230	MG	Jaguaraçu	2
046	BR-262	262BMG0640	MG	Betim	2
047	BR-381	381BMG0750	MG	São Sebastião da Bela Vista	2
048	BR-163	163BMS0326	MS	Dourados	1, 2 e 3
049	BR-060	060BMS0430	MS	Bandeirantes	1, 2 e 3
050	BR-262	262BMS1290	MS	Três Lagoas	1, 2 e 3
051	BR-267	267BMS0880	MS	Bataguassu	2
052	BR-174	174BMT0030	MT	Cáceres	2
053	BR-163	163BMT0592	MT	Rondonópolis	2
054	BR-163	163BMT0730	MT	Jangada	1, 2 e 3
055	BR-010	010BPA0510	PA	Ulianópolis	2
056	BR-101	101BPB0335	PB	Alhandra	2
057	BR-230	230BPB0220	PB	Campina Grande	2
058	BR-101	101BPE0510	PE	Ribeirão	2
059	BR-116	116BPE0460	PE	Cabrobó	2
060	BR-232	232BPE0140	PE	Bezerros	2
061	BR-232	232BPE0420	PE	Salgueiro	2
062	BR-122	122BPE0370	PE	Petrolina	2
063	BR-316	316BPI0480	PI	Picos	2
064	BR-343	343BPI0130	PI	Piripiri	2
065	BR-316	316BPI0398	PI	Lagoa do Piauí	2
066	BR-116	116BPR2710	PR	Campina Grande do Sul	2
067	BR-116	116BPR2810	PR	Rio Negro	2
068	BR-277	277BPR0170	PR	Guarapuava	2
069	BR-277	277BPR0310	PR	Cascavel	2
070	BR-369	369BPR0480	PR	Cambará	1, 2 e 3
071	BR-376	376BPR0490	PR	Guaratuba	2
072	BR-476	476BPR0095	PR	Lapa	2
073	BR-40	040BRJ0730	RJ	Areal	2
074	BR-101	101BRJ2930	RJ	Casimiro de Abreu	2
075	BR-116	116BRJ2130	RJ	Resende	2

Posto	Rodovia	Código SNV	UF	Município	Estágios da Pesquisa
076	BR-356	356BRJ0310	RJ	Itaperuna	2
077	BR-393	393BRJ0330	RJ	Sapucaia	2
078	BR-101	101BRN0162	RN	São José de Mipibu	2
079	BR-226	226BRN0070	RN	Bom Jesus	2
080	BR-304	304BRN0270	RN	Lajes	2
081	BR-405	405BRN0070	RN	Itaú	2
082	BR-364	364BRO1210	RO	Ouro Preto do Oeste	1, 2 e 3
083	BR-116	116BRS3275	RS	Guaíba	2
084	BR-158	158BRS1150	RS	Seberi	2
085	BR-158	158BRS1310	RS	Santa Maria	2
086	BR-290	290BRS0175	RS	Butiá	2
087	BR-290	290BRS0220	RS	Caçapava do Sul	2
088	BR-290	290BRS0410	RS	Uruguaiana	2
089	BR-293	293BRS0130	RS	Dom Pedrito	2
090	BR-392	392BRS0070	RS	Rio Grande	1, 2 e 3
091	BR-472	472BRS0210	RS	Uruguaiana	2
092	BR-101	101BSC3830	SC	Garuva	1, 2 e 3
093	BR-101	101BSC4010	SC	Itapema	2
094	BR-101	101BSC4115	SC	Garopaba	2
095	BR-101	101BSC4270	SC	Araranguá	2
096	BR-116	116BSC2910	SC	Ponte Alta do Norte	1, 2 e 3
097	BR-153	153BSC1590	SC	Concórdia	2
098	BR-282	282BSC0180	SC	Lages	2
099	BR-282	282BSC0377	SC	Cunha Porã	2
100	BR-470	470BSC0190	SC	São Cristóvão do Sul	2
101	BR-101	101BSE1250	SE	São Cristóvão	2
102	BR-235	235BSE0060	SE	Itabaiana	2
103	BR-116	116BSP2410	SP	Caçapava	2
104	BR-116	116BSP2570	SP	Itapeçerica da Serra	2
105	BR-153	153BSP1030	SP	Promissão	2
106	BR-381	381BSP0810	SP	Vargem	2
107	BR-153	153BTO0095	TO	Wanderlândia	1, 2 e 3
108	BR-153	153BTO0160	TO	Miranorte	2
109	BR-153	153BTO0300	TO	Alvorada	2
110	BR-135	135BPI0490	PI	Gilbués	2
111	BR-070	070BGO0265	GO	Aragarças	2
112	BR-277	277BPR0025	PR	Paranaguá	1, 2 e 3
113	BR-277	277BPR0075	PR	Balsa Nova	1, 2 e 3
114	BR-267	267BMS0930	MS	Nova Alvorada do Sul	1, 2 e 3
115	BR-158	158BMS0440	MS	Paranaíba	1, 2 e 3
116	BR-050	050BSP0830	SP	Cubatão	1, 2 e 3
117	BR-116	116BRJ1670	RJ	Magé	2
118	BR-280	280BSC0040	SC	Guaramirim	1, 2 e 3

Posto	Rodovia	Código SNV	UF	Município	Estágios da Pesquisa
119	BR-280	280BPR0190	PR	General Carneiro	1, 2 e 3
120	BR-050	050BMG0270	MG	Uberaba	1, 2 e 3

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e DNIT (2011)