

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Francisco Marchet Dalosto**

**AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO NA ANÁLISE DE  
IMPORTÂNCIA DE SEGMENTOS DE UMA REDE VIÁRIA**

Avaliador:
Defesa: dia __/__/2018 às _____ horas
Local:UFRGS / Engenharia Nova Oswaldo Aranha, 99, sala 304

Porto Alegre  
março 2018

**FRANCISCO MARCHET DALOSTO**

**AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO NA  
ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA DE SEGMENTOS DE UMA  
REDE VIÁRIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

**Orientadora: Helena Beatriz Bettella Cybis**

Porto Alegre  
março 2018

**FRANCISCO MARCHET DALOSTO**

**AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO NA  
ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA DE SEGMENTOS DE UMA  
REDE VIÁRIA**

Porto Alegre, março de 2018

---

**Prof. Helena Bettella Cybis, *Ph.D.***  
**Orientador PPGEP/UFRGS**

---

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Dr.**  
**Coordenador PPGEP/UFRGS**

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM-CS)

Prof<sup>a</sup>. Beatriz Berti da Costa, Dr. (UFRGS)

Prof. Daniel Sergio Presta García, Dr. (UFRGS)

Prof. Fernando Dutra Michel, Dr. (UFRGS)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e família, Daltro, Paula, Marcelo e Joana, pelo exemplo de bondade, perseverança e confiança.

À minha orientadora, Helena Beatriz Battella Cybis, pela contribuição na minha formação pessoal e profissional.

Aos demais professores do LASTRAN, amigos e colegas, pelas instruções, conselhos e momentos alegres.

Ao PPGEP pela oportunidade de realização do Mestrado.

À CAPES pela fomento a pesquisa e apoio financeiro concedido.

## RESUMO

A identificação dos segmentos críticos da rede viária é um conhecimento básico que todo planejador de transportes deve ter sobre a rede viária. É inevitável a ocorrência de incidentes e eventos de redução da capacidade nos elementos da rede. O efeito de acidentes e obstruções em segmentos críticos da rede ocasionam impactos que prejudicam o desempenho da rede. Este estudo foi desenvolvido com o apoio do modelo de alocação de tráfego do software VISUM (versão 2015) e propõe um método para determinar a importância de cada segmento da rede viária, a identificação de segmentos críticos da rede e a avaliação de sua obstrução de forma estática e dinâmica. Para isso, são utilizados diversos indicadores de desempenho da rede viária. O método foi aplicado na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, utilizando os dados de tráfego fornecidos pela CONCEPA TRIUNFO, DAER e DNIT. A determinação da importância de cada segmento decorreu da avaliação do impacto na rede causado pela obstrução do próprio segmento. Através do método proposto neste estudo foi possível identificar o segmento crítico da rede viária estudada e, de forma qualitativa, verificar a extensão da obstrução desse segmento nas análises estática e dinâmica. Verificou-se que o indicador *diferença do total de tempo despendido na rede* é o indicador que mais apresenta crescimento com o incremento da demanda, não apresenta alterações de priorização dos segmentos frente a variações de intensidade e sentido da demanda. Os resultados deste estudo mostraram que o segmento crítico da rede pertence a BR-101 entre os municípios de Osório e Terra de Areia. O método de hierarquização proposto independe do sentido e da intensidade da demanda, e está sujeito a mais de uma métrica para avaliar o segmento crítico. Estes resultados podem subsidiar o planejamento de transportes, identificando trechos críticos da rede viária que necessitam de mais atenção dos gestores e apontando medidas de operação no caso de eventos disruptivos nos trechos críticos.

Palavras-chave: Análise de rede. Importância de segmentos. Alocação estática de tráfego. Alocação dinâmica de tráfego.

## ABSTRACT

Identifying the most important link of the network is essential knowledge that the transport planners should have over the network. Incidents and events of capacity reduction in network elements are inevitable. The effect of accidents and obstructions on critical network links causes impacts that hamper network performance. This study was developed with support of VISUM (version 2015) traffic assignment model software with proposes a method to determinate each network link importance level, to identify the critical link and to measure the critical link blockage impact on network. For this, several road network performance indicators are used. The method was applied in the North Coast region of Rio Grande do Sul, using traffic data provided by CONCEPA TRIUNFO, DAER and DNIT. The link level importance is define from the own link impact due its obstruction. The proposed method identified the most critical link of the studied network and verified the qualitative impact of its obstruction extent in the static and dynamic assignment analyses. It was verified that the measure *total spent time difference in the network* is the most sensible measure that growth with a demand increase, this measure does not present changes the link importance rank against variations of intensity and direction of demand flow changes. The results of this study show that the critical link of the network belongs to the BR-101 highway between the municipalities of Osório and Terra de Areia. The proposed hierarchical method developed with several metrics measures found the critical link in an independent demand direction and intensity analysis. The findings may support transport planners to identify the most critical arc of a network. To better implement resources of road management and repairs. Also identify where the operation measures may be implanted in face a disruptive event on a critical link.

Keywords: Network analysis. Link importance. Static traffic assignment. Dynamic traffic assignment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resumo das Etapas do Processo de Alocação.....	32
Figura 2 – Representação do diagrama fundamental de fluxo para um segmento .....	40
Figura 3 – Diferença entre tempo de viagem instantâneo e tempo de viagem experimentado	41
Figura 4 – Fluxograma do método utilizado para avaliar a importância dos segmentos de uma rede viária a partir de indicadores de desempenho.....	45
Figura 5 – Fluxograma fases da Etapa 2.....	51
Figura 6 – Fluxograma de fases da Etapa 3 .....	52
Figura 7 – Fluxograma de fases da Etapa 5 .....	55
Figura 8 – Exemplo da classificação por Pareto individual para cada indicador de desempenho e considerando o conjunto de indicadores para a classificação conjunta .....	57
Figura 9 – Fluxograma de fases da Etapa 6.....	58
Figura 10 – Detalhamento do resultado do processo de alocação para o cálculo dos indicadores de desempenho relacionados com os segmentos viários da rede .....	61
Figura 11 – Detalhamento do resultado do processo de alocação para o cálculo dos indicadores de desempenho relacionados com os pares O/D .....	62
Figura 12 – Delimitação do Litoral Norte .....	63
Figura 13 – Rede viária da área de estudo codificada e rodovias de acesso .....	64
Figura 14 – Exemplo de etapas de codificação da rede viária.....	65
Figura 15 – Zonas de Destino de Tráfego da área de estudo.....	67
Figura 16 – Série histórica de volume mensal total na BR-290 no sentido do Litoral Norte...	68
Figura 17 – Distribuição do volume médio diário por tipo de dia da semana (VMDds) para o mês de Janeiro nos acessos à área de estudo .....	69
Figura 18 – Distribuição horária de tráfego das sextas-feiras de janeiro e horário de pico da BR-290 considerando intervalo de três horas.....	70
Figura 19 – Pico de consumo de água em municípios do litoral norte.....	72
Figura 20 – Volumes micromedidos de água nos municípios e sua relação com a população	72
Figura 21 – Resumo processo de calibração TFlowFuzzy .....	75
Figura 22 – Exemplo de comportamento de variável difusa.....	76
Figura 23 – Comparação de valores modelados corrigidos e observados (contador eletrônico) – cenário I.....	77
Figura 24 – Comparação de valores modelados corrigidos e observados (contador eletrônico) – cenário II.....	77
Figura 25 – Resultados do processo de alocação para os cenários base (sem obstruções) .....	80
Figura 26 – Exemplo de cálculo de indicadores de desempenho através de resultados de alocação estática decorrente da obstrução de um segmento.....	82
Figura 27 – Classificação do valor observado do indicador de desempenho a partir da normalização dos .....	83
Figura 28 – Histograma de distribuição do cenário I e II – DTD.....	90
Figura 29 – Histograma de distribuição do cenário III e IV – DTD .....	91
Figura 30 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DTD nos cenários I e II .....	93
Figura 31 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DTD nos cenários I e III.....	94
Figura 32 – Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – DTD.....	96

Figura 33 – Histograma de distribuição do cenário I e II – CRA.....	97
Figura 34 – Histograma de distribuição do cenário III e IV – CRA .....	99
Figura 35 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador CRA nos cenários I e II .....	101
Figura 36 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador CRA nos cenários I e III.....	102
Figura 37 – Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – CRA.....	103
Figura 38 – Histograma de distribuição do cenário I e II – DMV.....	105
Figura 39 – Histograma de distribuição do cenário III e IV – DMV .....	106
Figura 40 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DMV nos cenários I e II .....	107
Figura 41 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DMV nos cenários I e III.....	108
Figura 42 – Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – DMV .....	109
Figura 43 – Histograma de distribuição do cenário I e II – TRR .....	111
Figura 44 – Histograma de distribuição do cenário III e IV – TRR.....	112
Figura 45 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador TRR nos cenários I e II.....	113
Figura 46 – Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DMV nos cenários I e III.....	114
Figura 47 – Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – TRR .....	115
Figura 48 – Rede viária classificada nas Classes A, B e C considerando os indicadores de desempenho selecionados nos quatro cenários modelados .....	120
Figura 49 – Segmento crítico da rede viária indicado pela classificação conjunta dos indicadores de desempenho por Pareto .....	121
Figura 50 – Análise do tempo total despendido na rede considerando o cenário base para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários .....	123
Figura 51 – Análise do comprimento total afetado da rede para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários.....	124
Figura 52 – Análise da distância média de viagem para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários.....	125
Figura 53 – Análise do total de rotas utilizadas na rede viária para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários .....	126
Figura 54 – Análise dinâmica do total de tempo despendido na rede considerando a base para diferentes níveis de obstrução em todos os .....	129
Figura 55 – Análise dinâmica do comprimento total de rede com incremento de volume para diferentes níveis de obstrução em todos os .....	130
Figura 56 – Análise dinâmica da distância média de viagem para diferentes níveis de obstrução em todos os.....	131
Figura 57 – Análise dinâmica do total de rotas utilizadas na rede para diferentes níveis de obstrução em todos os.....	132
Figura 58 – Avaliação da duração da obstrução segundo o DTD para diferentes níveis de obstrução.....	133
Figura 59 – Avaliação do horário da obstrução segundo o DTD para diferentes níveis de obstrução.....	134

Figura 60 – Nível de informação oferecido pela análise estática (valor atemporal), para diferentes níveis de obstrução, cenário I .....	136
Figura 61 – Nível de informação oferecido pela análise dinâmica (segregada por intervalo de análise), para diferentes níveis de obstrução, cenário I .....	136
Figura 62 – Porcentagem de contribuição de intervalos para diferentes níveis de obstrução, caso do DTD para o cenário 1 .....	137
Figura 63 – Análise do total de viagens afetadas nas análises de alocação dinâmica e estática para obstrução de um segmento crítico no cenário I .....	138
Figura 64 – Redistribuição das viagens afetadas nas análises dinâmicas e estáticas para obstrução de um segmento crítico no cenário I .....	139
Figura 65 – Incremento do volume nos intervalos 02:30 e 03:00 .....	140
Figura 66 – Incremento do volume nos intervalos 03:30 e 04:00 .....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Detalhamento das características dos trechos rodoviários da área de estudo.....	66
Tabela 2 – Total de viagens nos pontos de acesso à área de estudo.....	71
Tabela 3 – Parcela de viagens atraídas por cada zona de tráfego da área de estudo .....	73
Tabela 4 – Características da demanda modelada e sentidos das viagens para cada cenário construído .....	74
Tabela 5 - Tempo de viagem para baixa demanda – cenário I.....	78
Tabela 6 - Tempo de viagem para alta demanda – cenário II.....	78
Tabela 7 – Tempo de viagem observado no <i>Google Maps</i> .....	78
Tabela 8 – Ordem de grandeza dos indicadores de desempenho para os cenários base (sem alteração) .....	79
Tabela 9 – Matriz coeficientes de correlação de Pearson entre pares de indicadores de desempenho .....	84
Tabela 10 – Total de viagens de acesso a área de estudo para o cenário dinâmico .....	87
Tabela 11 – Resultados do teste ANOVA (F crítico e calculado) para avaliação de significância para os indicadores selecionados em todos os cenários .....	119

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação dos principais indicadores de desempenho utilizados na avaliação de impactos negativos na rede viária.....	23
Quadro 2 - Comparação dos valores médios, desvio padrão, valores máximos e z(máximo) dos indicadores selecionados.....	89
Quadro 3 – Extensão ad rede viária acumulada na faixa de maior valor dos histogramas de distribuição de frequência para os indicadores de desempenho selecionados.....	117

## **LISTA DE ABREVIACOES**

BPR – Bureau of Public Roads

CRA – Comprimento total de rede afetada

DAER – Departamento Autnomo de Estradas de Rodagem

DER – Departamento de Estrada de Rodagem

DMV – Distância média de viagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DTA – Dynamic traffic assignment

DTD – Total da diferença de tempo despendido com o cenário base

DUE – Dynamic user equilibrium

FIFO – First in first out

HCM – Highway capacity manual

TDSP – Time dependent short path

TTD – Total de tempo despendido

TIV – Total de segmentos com incremento de volume

TMV – Tempo médio de viagem

TRR – Total de rotas da rede

UE – User equilibrium

VDF – Volume delay functions

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA E MOTIVAÇÃO .....	19
1.3 DELINEAMENTO DO ESTUDO .....	19
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE .....	21
2.2 REDUÇÃO DE CAPACIDADE POR EVENTOS DISRUPTIVOS.....	24
2.3 MÉTODOS DE HIERARQUIZAÇÃO VIÁRIA.....	27
2.4 PROCESSOS DE ALOCAÇÃO DE TRÁFEGO .....	30
<b>2.4.1 MODELOS DE ALOCAÇÃO ESTÁTICO .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.2 MODELOS DE ALOCAÇÃO DINÂMICOS .....</b>	<b>38</b>
<b>3 AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS DE UMA REDE VIÁRIA A PARTIR DE INDICADORES DE DESEMPENHO .....</b>	<b>44</b>
3.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS .....	46
<b>3.1.1 ETAPA 1 – OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE SELECIONADOS .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.2 ETAPA 2 – DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, CODIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA E MODELAGEM DA DEMANDA.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3 ETAPA 3 – ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS DA REDE CONSIDERANDO CADA INDICADOR: ALOCAÇÃO ESTÁTICA.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.4 ETAPA 4 – SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS INDICADORES .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.5 ETAPA 5 – ANÁLISE CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO SELECIONADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO.....</b>	<b>54</b>
<b>3.1.6 ETAPA 6 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO: ALOCAÇÃO ESTÁTICA E ALOCAÇÃO DINÂMICA .....</b>	<b>57</b>
<b>4 AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS DA REDE VIÁRIA DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE INDICADORES DE DESEMPENHO.....</b>	<b>59</b>

4.1 – OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE SELECIONADOS (ETAPA 1).....	59
4.2 -DELIMITAÇÃO E CARCTERIZAÇÃO E DA ÁREA DE ESTUDO, CODIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA E MODELAGEM DA DEMANDA (ETAPA 2).....	63
<b>4.2.1 CODIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA.....</b>	<b>64</b>
<b>4.2.2 DELINEAMENTO DAS ZONAS DE DESTINO.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.3 DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE ANÁLISE .....</b>	<b>68</b>
<b>4.2.4 GERAÇÃO DE VIAGENS .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.5 DISTRIBUIÇÃO DE VIAGENS.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.6 ALOCAÇÃO DE TRÁFEGO.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.7 CALIBRAÇÃO DOS VOLUMES NA REDE VIÁRIA .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.8 ORDEM DE GRANDEZA E VARIAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE PARA OS CENÁRIOS BASE .....</b>	<b>79</b>
4.3 - ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS FRENTE À SUA OBSTRUÇÃO CONSIDERANDO CADA INDICADOR DE DESEMPENHO (ETAPA 3) .....	81
4.4 – SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS INDICADORES (ETAPA 4).....	83
4.5 - ANÁLISE CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO SELECIONADOS NA IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO DA REDE (ETAPA 5) .....	84
4.6 - AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO: ALOCAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA (ETAPA 6) .....	85
<b>(i) AVALIAÇÃO ESTÁTICA DOS IMPACTOS NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO .....</b>	<b>86</b>
<b>(ii) AVALIAÇÃO DINÂMICA DOS IMPACTOS NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO .....</b>	<b>86</b>
<b>5 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES .....</b>	<b>88</b>
5.1 ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA DE SEGMENTOS COM BASE EM INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE .....	88
<b>5.1.1 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO TOTAL DA DIFERENÇA DO TEMPO DESPENDIDO COM O CENÁRIO BASE (DTD).....</b>	<b>89</b>
<b>5.1.2 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO COMPRIMENTO TOTAL DA REDE AFETADA (CRA).....</b>	<b>97</b>
<b>5.1.3 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO DISTÂNCIA MÉDIA DE VIAGEM (DMV) .....</b>	<b>104</b>
<b>5.1.4 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO TOTAL DE ROTAS NA REDE (TRR).....</b>	<b>110</b>
<b>5.1.5 ANÁLISES E DISCUSSÕES SOBRE A AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO.....</b>	<b>116</b>
5.2 ANÁLISE DE CLASSIFICAÇÃO CONJUNTA DOS SEGMENTOS E IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO DA REDE.....	118

<b>5.2.1 AVALIAÇÃO CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO PARA A IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO.....</b>	<b>118</b>
<b>5.2.2 ANÁLISES E DISCUSSÕES SOBRE A AVALIAÇÃO CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO.....</b>	<b>121</b>
<b>5.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDE VIÁRIA DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO.....</b>	<b>122</b>
<b>5.3.1 AVALIAÇÃO ESTÁTICA DOS IMPACTOS NA REDE .....</b>	<b>123</b>
<b>5.3.2 AVALIAÇÃO DINÂMICA DOS IMPACTOS NA REDE.....</b>	<b>128</b>
<b>5.3.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE ALOCAÇÕES ESTÁTICA E DINÂMICA NA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO .....</b>	<b>138</b>
<b>5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>142</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de transportes apresenta um conjunto de infraestruturas específicas e essenciais para a distribuição de serviços, de bens e indivíduos. Nossa organização social não só depende de sistemas de transportes, como também é através deles que se estimula o desenvolvimento econômico territorial (MATTSSON e JENELIUS, 2015).

Certos eventos (tais como, acidentes de trânsito, eventos climáticos extremos, terremotos, ataques terroristas, colapso de estruturas) podem acarretar em uma redução da capacidade viária dos elementos da rede (MATTSSON e JENELIUS, 2015). Quando isso ocorre, planejadores e agentes tomadores de decisão (tais como centrais de apoio, centros de operação, concessionárias de rodovias, postos da polícia rodoviária) necessitam saber o nível de impacto ocorrendo na rede viária. Isso é importante para que esses mesmo profissionais possam agir e garantir a eficiência do funcionamento das redes de transportes. Além disso, esses agentes também necessitam que os trechos viários onde os incidentes gerarão um maior impacto aos usuários da rede viária sejam identificados, para que medidas de apoio ou medidas de operação possam ser definidas com precisão.

Obstruções em trechos de uma rodovia não só impactam os usuários da rede como também criam um impacto negativo na economia que depende do funcionamento dos trechos obstruídos. Sob a ótica econômica, as redes viárias que apresentam melhor resposta à obstrução de seus elementos são aquelas mais resistentes à oscilações e que apresentam maior potencial de distribuição de bens, serviços e pessoas (KIM *et. al*, 1997).

Os agentes responsáveis pelas redes viárias (DNIT, DAER, secretarias de transportes, concessionárias) devem priorizar a identificação dos trechos de maior relevância sob sua responsabilidade (NAIR *et. al*, 2010). Assim, a relação de importância entre os diferentes segmentos da rede viária, pode ser estabelecida para distribuição de recursos e implementação de ações preventivas. Tais ações incluem medidas de proteção contra incidentes, ou também a melhora da infraestrutura existente nas partes mais vulneráveis da rede viária, entre outras (BERDICA, 2002).

A obstrução de um segmento da rede viária decorre de inúmeras situações, e não apenas de incidentes de trânsito. Eventos de natureza extrema como alagamentos, deslizamentos de terra e chuvas também provocam a redução de capacidade da via (CHENG *et al*, 2011). Além disso, a realidade de alguns países acaba por estimular estudos de obstruções decorrentes de atividades antrópicas, incluindo desde acidentes de trânsito a ataques terroristas (JENELIUS *et. al*, 2006). Todo esse conjunto de eventos que causam impacto na rede de transportes pode ser tratado de forma genérica como eventos disruptivos.

Entretanto, é muito difícil prever a extensão e intensidade de eventos disruptivos em uma rede viária, mas existem medidas que podem ser utilizadas para a isso (PRATT e LOMAX, 1966). Entre essas medidas destacam-se os indicadores de desempenho de rede. De forma geral, os indicadores de desempenho são utilizados para descrever condições básicas, identificar problemas, auxiliar na escolha de alternativas de investimentos, avaliar o resultado de implementos, monitorar o sistema de transportes, etc. Além disso, indicadores de desempenho buscam medir o impacto ou condição de funcionamento que uma interferência pontual na rede viária causa em toda a extensão da rede.

Diversos indicadores são encontrados na literatura (PRATT e LOMAX, 1966). O tempo de viagem é identificado como o indicador de desempenho de rede mais relevante para estudos de análise de desempenho de redes (REGGIANI *et. al*, 2015). Outro indicador de desempenho que se destaca na literatura é a velocidade de operação no segmento viário que é definida, segundo o HCM (2010), como indicador de nível de serviço. BERDICA (2002) aponta que medidas de atraso, índices de acessibilidade e tempo de congestionamento também são medidas de desempenho de sistemas de transportes.

Com base na possibilidade de ocorrência de eventos disruptivos no sistema de transporte são realizados trabalhos que avaliam a obstrução dos segmentos de uma rede viária frente a tais eventos. Para avaliar o impacto de tais obstruções são utilizados indicadores de desempenhos que buscam averiguar a intensidade e a abrangência do impacto decorrente da obstrução do segmento na rede viária.

Para isso, são realizadas alocações de tráfego representando a ocorrência de eventos disruptivos de forma sistemática em todos os segmentos de uma rede viária. Observando a literatura internacional, alguns estudos utilizam a alocação dinâmica de tráfego para melhor

representar o impacto de um incidente em um ponto específico da rede. Por outro lado, estudos que buscam avaliar o impacto decorrente da obstrução de diversos segmentos ou interseções da rede viária utilizam processos de alocação estática. Nenhum trabalho foi encontrado que avalie a rede viária como um todo de forma dinâmica.

O resultado desse tipo de análise pode auxiliar a explicar a intensidade da relação de um segmento ou de um trecho (conjunto de segmentos) com o desempenho de toda a rede viária. De maneira mais prática, permite a melhor alocação de recursos de manutenção e reparos, auxilia planos de contingência, possibilita a avaliação de trechos ou regiões no funcionamento da rede viária (MURRAY e MAHMASSANI, 2004). Os mesmos resultados também podem ser empregados no dimensionamento de equipes para zonas de trabalho em rodovias, ou em qualquer atividade que implique na redução da capacidade de um segmento da rede (MORRIS *et al.* 1979).

## 1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo desse trabalho é definir e avaliar indicadores de desempenho para mensurar a importância dos segmentos de uma rede viária, frente a possíveis obstruções de seus elementos. Como objetivos específicos, espera-se:

- (i) Classificar segmentos da rede viária quanto à sua importância em relação ao desempenho da rede para cada indicador proposto;
- (ii) Avaliar de maneira conjunta os indicadores de desempenho para identificar o segmento que, quando obstruído, ocasione o maior impacto na rede de transportes (segmento crítico);
- (iii) Avaliar os impactos na rede viária decorrentes da obstrução do segmento crítico da rede;
- (iv) Aplicar a avaliação proposta para a região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA E MOTIVAÇÃO

Principalmente após o atentado terrorista de 11 de Setembro de 2001, do furacão Katrina em 2005 nos Estados Unidos, e do terremoto na ilha de Hokkaido no Japão em 2013 (CUI *et. al.*, 2014 e CHEN *et. al.*, 2015) os trabalhos de análise de rede viária se intensificaram, justamente para identificar os segmentos mais sensíveis a eventos disruptivos, independentemente de sua natureza. Eventos dessa natureza não são comuns no Brasil, contudo são comuns bloqueios rodoviários devido a manifestações e protesto, como esses eventos não são previamente planejados e os usuários da rede não estão antecipadamente cientes da manifestação, pode-se considerar este tipo de evento como evento disruptivos. Além disso, interrupções significativas do fluxo viário podem ser ocasionadas por acidentes de trânsito, queda de árvores sobre a pista, deslizamentos de terra, falhas semafóricas, queda de passagens elevadas, etc.

Por fim, se encontram dificuldades em consolidar indicadores de desempenho de rede. Uma das possibilidades dessa análise seria uma potencial melhoria do processo de escolha de indicadores de desempenho de redes viárias. Também se espera contribuir com uma melhoria no entendimento da relação de parâmetros de avaliação de desempenho com os elementos da rede viária.

## 1.3 DELINEAMENTO DO ESTUDO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo o capítulo um a introdução. O capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica realizada que serviu de referencial teórico para a elaboração do trabalho. Este capítulo apresenta os estudos de priorização de segmentos e de análise de redes. O mesmo também apresenta os princípios da alocação estática e da alocação dinâmica.

O capítulo três apresenta o processo metodológico utilizado na pesquisa, assim como as etapas do processo metodológico. A metodologia aplicada para a avaliação de importância dos segmentos viários a partir de indicadores de desempenho é apresentada no capítulo quatro.

O capítulo cinco expõe os resultados das análises propostas, apresentando os resultados da avaliação dos indicadores, da priorização de segmentos para diferentes indicadores e da

identificação e obstrução do segmento crítico. Também nesse capítulo se discute sobre os resultados de cada etapa. Por fim, o capítulo seis apresenta a conclusão do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em quatro seções. A primeira seção apresenta os principais indicadores de desempenho utilizados para caracterizar as redes viárias. Em seguida são descritos eventos disruptivos e sua relação com a redução da capacidade dos segmentos e apresentados estudos que relacionam a ocorrência de eventos disruptivos com a rede viária. Na terceira seção são apresentados métodos de hierarquização viária. Finalizando este capítulo são apresentados os processos de alocação de tráfego.

### 2.1 INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE

Infraestrutura de transportes é o conjunto de infraestrutura rodoviária, aquaviária, aeroviária, ferroviária e dutoviária, que tende a garantir a circulação de pessoas e bens e a distribuição de serviços. No contexto brasileiro, se destaca a rede rodoviária como principal infraestrutura de transporte. A rede viária é definida como um conjunto de infraestruturas específicas de sistemas de transportes, que possibilita a realização de viagens terrestres utilizando o modal rodoviário.

Os indicadores de desempenho de rede viária são medidas agregadas que expressam uma característica da rede viária que possibilita avaliar o funcionamento e eficiência da rede (LATORA e MARCHIORI, 2004). indicadores de desempenho de rede podem providenciar informações triviais para auxiliar agentes tomadores de decisões (DNIT, DAER, DER) a melhor entender como as suas escolhas impactam no funcionamento de sistemas de transportes. Os indicadores de desempenho de rede podem ser usados para monitorar o funcionamento do sistema viário, para planejamento de transportes, para decisões de investimentos e comparações de cenários. Segundo NICHOLSON (2007), a aplicação de indicadores pode ser empregada para a redução de risco através de melhorar de pontos críticos, para orientar a instalação de sistemas de aviso na rede (no caso de eventos disruptivos de larga escala), para melhor reagir em situações emergenciais em curto prazo e para orientar a minimização de impactos socioeconômicos em longo prazo.

Segundo SUNDSTROM (2010), indicadores de desempenho de rede podem ser utilizados para medir características das seguintes áreas:

- (i) Acesso a uma região;
- (ii) Acessibilidade;
- (iii) Segurança;
- (iv) Congestionamento;
- (v) Mobilidade;
- (vi) Economia;
- (vii) Qualidade do ar;
- (viii) Uso do solo;
- (ix) Características ambientais.

Dentro de uma determinada rede viária, o mesmo indicador de desempenho pode ser relacionado a um corredor viário específico, a um determinado par O/D, ou a rede viária. Segundo SUNDSTROM (2010) os indicadores de desempenho são relacionados com a rede viária da seguinte forma:

- a) Indicadores de corredores viários, onde o indicador é relacionado somente a um corredor viário ou a um segmento da rede;
- b) Indicadores de desempenho de pares O/D, neste caso, o indicador é relacionado a um par de origem e destino. Este indicador tem como base os indicadores de desempenho dos segmentos viários que são utilizados por cada par O/D;
- c) Indicadores de rede, neste caso o indicador é relacionado com o funcionamento de toda a rede transportes. Este indicador tem como base ou todos os indicadores de desempenho de pares O/D da rede ou todos os indicadores de desempenho de corredores viários que compõem a rede.

Considerando as alterações negativas na rede viária que ocasionam a piora no funcionamento da rede, alguns indicadores de desempenho se destacam para averiguar a intensidade e a abrangência dessas alterações. Indicadores de desempenho são atrelados a intensidade quando averigam a magnitude do impacto no desempenho da rede, de forma a não se preocupar com a extensão do impacto. Indicadores de abrangência consideram a extensão da rede viária que é afetada pelo impacto. Estes indicadores são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Relação dos principais indicadores de desempenho utilizados na avaliação de impactos negativos na rede viária.

Indicador	Autores	Base	Características	Unidade
Distância média de viagem	ABDELGHANY <i>et al</i> (1999)	Pares O/D	Mede a distância média de viagens entre pares O/D.	quilômetro
Tempo médio de viagem	HOJATI <i>et al</i> (2016); KIM <i>et al</i> (2013); AN <i>et al</i> (2014); BURGHOUT <i>et al</i> (2014); ABDELGHANY <i>et al</i> (1999); DIA (2011)	Pares O/D	Mede o tempo médio de viagem entre os pares O/D.	minutos
Total de número de rotas na rede	BURGHOUT <i>et al</i> (2010); KNOOP <i>et al</i> (2010); SISPIKU <i>et al</i> (2007)	Pares O/D	Mede o número máximo de rotas entre pares O/D existentes na rede.	rotas
Total de tempo despendido na rede	ZOCKAIE <i>et al</i> (2014); SNELDER (2012); ROBINSON e KHATTAK (2010); LOU e ZHANG (2012)	Segmentos	Mede o total de tempo que todos os usuários despendem dentro a rede para realizar suas viagens.	horas
Diferença de tempo despendido na rede com o cenário sem intervenção	KAMGA <i>et al</i> (2011); ZHENG <i>et al</i> (2014); JENELIUS <i>et al</i> (2006); DIA (2011); WIRTZ <i>et al</i> (2005); YO e ZHOU (2016)	Segmentos	Mede a variação em relação ao cenário sem intervenção no total de tempo despendido na rede viária.	horas
Total de segmentos com incremento de volume	BURGHOUT <i>et al</i> (2010)	Segmentos	Mede de forma indireta a abrangência da obstrução.	unidade
Formação de filas	WIRTZ <i>et al</i> (2005); KNOOP <i>et al</i> (2010); AL-DECK e KANAFANI (1993)	Segmentos	Mede a extensão das filas formadas na rede viária.	quilômetro
Fluxo de veículos por segmento	ZHANG <i>et al</i> (2014)	Segmentos	Mede o fluxo de veículos nos segmentos da rede viária.	veículos
Densidade por segmento	ZHANG <i>et al</i> (2014)	Segmentos	Mede a densidade de veículos nos segmentos da rede viária.	porcentagem
Velocidade média	DIA (2011)	Segmentos	Mede a velocidade média de viagem dentro da rede viária.	quilômetro por hora
Número de parada por veículos	DIA (2011)	Segmentos	Contabiliza o número de para que os veículos efetuam ao realizar suas viagens.	paradas por veículos
Fluxo de veículos por rota	Jl <i>et al</i> (2016)	Pares O/D	Mede a quantidade de veículos que utiliza determinada rota.	veículos por rota
Taxa de viagens por pessoa	MORRIS <i>et al</i> (1978)	Pares O/D	Contabiliza o número de viagens realizada por usuário ao longo do tempo de análise.	viagens por usuário

(fonte: elaborado pelo autor)

## 2.2 REDUÇÃO DE CAPACIDADE POR EVENTOS DISRUPTIVOS

A capacidade viária de um segmento é o fluxo horário máximo de veículos ou pessoas que pode ser suportado (HCM, 2010) por esse segmento. A principal causa de redução da capacidade de um segmento viário decorre de acidentes de trânsito (BERDICA, 2002). No Brasil o estudo e acompanhamento de incidentes viários têm sido monitorados de maneira regular desde 2005 (DNIT, 2016), e especificamente no Rio Grande do Sul desde 1997 (DAER-RS, 2017). Entretanto acidentes viários não são a única causa de redução de capacidade em segmentos viários.

Eventos de natureza rara são inesperados e apresentam uma baixa probabilidade de ocorrência, entretanto quando ocorrem são caracterizados por provocarem um alto impacto na rede de transportes (JENELIUS *et al.* 2006). Eventos dessa natureza são geralmente de causa natural, tais como tempestades, terremotos, deslizamentos de terra, enchentes, alagamentos, etc. Contudo, alguns autores ainda incluem eventos de causa exclusivamente antropológica, como falhas de infraestruturas, falhas na semaforização, áreas de trabalho mal dimensionadas e acidentes severos de trânsito e ataques terroristas a infraestruturas, (LOU e ZHANG, 2011). No caso do Brasil, são comuns bloqueios rodoviários devido a manifestações e protesto, como esses eventos não são previamente planejados e os usuários da rede não estão antecipadamente cientes da manifestação, pode-se considerar este tipo de evento como evento disruptivos.

Segundo BERDICA (2002), os eventos disruptivos podem ser classificados em:

- a) Eventos pontuais: são eventos que só infligem dano a um ponto do sistema de transporte. Destaca-se nessa classificação acidentes severos de trânsito.
- b) Eventos locais: são eventos mais abrangentes, que infligem redução à capacidade de mais de um elemento da rede. Por exemplo: o colapso de uma passagem elevada.
- c) Eventos regionais: são eventos disruptivos que infligem dano a diversos segmentos da rede ou a todos. Exemplo: tempestades severas.

Estudos que tratam da redução de capacidade decorrente de incidentes de trânsito são mais comuns, porque dentro do conjunto de eventos disruptivos, os acidentes de trânsito são

mais frequentes (BERDICA, 2002). A seguir são apresentados estudos de redução de capacidade ocasionada por eventos disruptivos.

O trabalho publicado por ABDELGHANY *et al.* (1999) ilustra o impacto na rede viária decorrente de um incidente viário de intensidade média na zona urbana de Fort Worth, EUA. O incidente provoca a redução de 75% da capacidade do segmento durante 20 minutos. Para avaliar o impacto na rede viária decorrente da obstrução utilizaram-se indicadores como tempo médio de viagem, em minutos, distância média de viagem, em quilômetros, e tempo médio em que os veículos ficam parados, em minutos. O estudo contribui com a exploração do uso de DTA (alocação dinâmica de tráfego, do inglês *dynamic traffic assignment*) na avaliação dos impactos na rede viária.

A pesquisa de WIRTZ *et al.* (2005) trata de investigar os impactos decorrentes de incidentes de diversas intensidades na rede de transportes na região Norte de Chicago, EUA. O incidente provoca o bloqueio de uma, duas, ou três faixas de uma rodovia por uma a três horas. A métrica de avaliação dos impactos na rede viária decorrentes da obstrução foi o adicional de tempo despendido na rede viária em comparação com o cenário sem obstruções e a formação de filas. O trabalho apresentado verifica a importância de rotas alternativas para a mitigação de incidentes e do uso de reprogramação semafórica para reduzir o impacto da obstrução na rede viária.

BURGHOUT *et al.* (2010) realizaram a avaliação dos impactos na rede decorrentes de um incidente viário de total bloqueio de tráfego na ponte Skansbron, na cidade de Estocolmo, Suécia. O tempo de duração do bloqueio foi de 30 minutos. Para avaliar o impacto na rede viária decorrente da obstrução utilizaram-se indicadores, tais como a velocidade média, o tempo médio de viagem, o total de rotas afetadas e o total de segmentos afetados. O trabalho apresentado elaborou um modelo que permite criar e avaliar impactos de acidentes de trânsito, este modelo auxilia no desenvolvimento de medidas de operação de tráfego eficientes na cidade de Estocolmo.

LOU e ZANG (2011) estudaram a obstrução de um segmento viário decorrente de um ataque terrorista e a obstrução de diversos segmentos simultaneamente decorrente de desastres naturais de larga escala. A metodologia proposta foi testada em uma rede numérica. Para

avaliar o impacto na rede viária utilizou-se o total de tempo despendido na rede viária. O trabalho publicado busca identificar pontos críticos de infraestrutura no caso de evacuações.

O trabalho apresentado por AN *et al.* (2014) avalia o impacto na rede decorrente de uma tempestade severa. Neste trabalho, foi provocada a redução de capacidade de 15% de todos os segmentos da rede viária. O indicador de desempenho utilizado foi o total tempo de viagem despendido na rede viária. O trabalho contribuiu com um modelo que permite identificar os segmentos da rede que mais sofrem alteração com a redução da capacidade em todos os segmentos, dessa forma, permite propor reformulações na rede viária.

A implantação de áreas de trabalho que objetivam realizar reparos e manutenção na pista, quando mal dimensionadas provocam severa redução de capacidade nos segmentos. ZHENG *et al.* (2014) realizaram um estudo onde são avaliados diversas possibilidades de alocação de áreas de trabalho. Neste estudo, a redução de capacidade dos segmentos utilizada foi de 50% e 20% em função do dimensionamento da equipe. Para definir a área de trabalho de menor impacto na rede viária utilizou-se o indicador diferença do total de tempo despendido em relação ao cenário sem intervenção.

A proposta apresentada por DIA (2011) avalia um acidente de trânsito em um ponto pré-estabelecido da rede da região de Gold Coast, na Austrália. A obstrução ocorre em uma ou duas faixas do segmento com a duração de uma hora à uma hora e meia. O impacto na rede viária foi observado a partir de diversos indicadores de desempenho, como velocidade média dos veículos na rede viária, número médio de paradas realizada por veículo, tempo médio de viagem e incremento do total de tempo despendido na rede viária em relação ao cenário sem obstrução. Tais indicadores foram utilizados para avaliar a melhora de desempenho da rede viária frente a estratégias de gestão de tráfego para mitigar o impacto decorrente da obstrução.

No trabalho apresentado por KAMGA *et al.* (2011) foi avaliada a ocorrência de um incidente na rede de viária de Chicago, EUA. O incidente simulado ocasionou a total redução da capacidade de um segmento central da rede de transportes durante 45 minutos. Para avaliar os impactos na rede viária decorrentes do incidente foram utilizados indicadores de desempenho tais como, total de tempo despendido na rede viária, tempo médio de viagem, distância média de viagem, e diferença no total de tempo despendido em relação ao cenário sem incidente. O trabalho conclui que rotas que não utilizam diretamente o segmento

obstruído também são afetadas pela obstrução, e recomenda a existência de rotas alternativas de baixa capacidade e informações sobre a ocorrência de acidentes permitem com que motoristas reprogramam suas rotas melhorando o desempenho da rede viária.

Observando os trabalhos apresentados nesta seção do referencial teórico, verifica-se que as avaliações dos eventos disruptivos na rede viária ocorrem de maneira pré-definida pelos autores. Ao realizar a identificação do ponto (geralmente segmentos viários) crítico da rede viária pode-se realizar a avaliação de eventos disruptivos neste ponto. Para identificar tais pontos críticos, são empregados métodos de hierarquização (MATTSSON e JENELIUS, 2015).

### 2.3 MÉTODOS DE HIERARQUIZAÇÃO VIÁRIA

Identifica-se nos trabalhos apresentados na seção 2.2 que estes realizam estudos onde são pré-estabelecidos o local e/ou local e extensão do incidente. Contudo, a identificação do segmento mais importante da rede viária pode decorrer da realização do processo de importância dos segmentos, denominado também como processo de hierarquização ou criticidade. Esse tipo processo é definido pelo ranqueamento dos segmentos de uma rede conforme o impacto decorrente da obstrução de cada segmento em toda a extensão da rede viária. Os métodos utilizados nesse tipo de processo são denominados métodos de hierarquização de segmentos viários.

Verifica-se na literatura duas abordagens clássicas: (i) a avaliação individual da obstrução dos elementos da rede (JENELIUS *et al.* 2006; NÚÑES e PALAMARES, 2014) e (ii) a avaliação da obstrução conjunta de elementos da rede (BABABEIK *et al.*, 2016; LATORA e MARCHIORI, 2004; MURRAY-TUITE e MAHMASSANI, 2004). Ambas requerem ferramentas de alocação de tráfego e programação para quantificar os impactos na rede viária frente aos elementos obstruídos.

A avaliação individual da obstrução dos elementos da rede considera a obstrução de todos os elementos da rede um a um. Para realizar tal tarefa são utilizados algoritmos que sistematicamente: (i) obstruem um elemento da rede; (ii) redistribuem as rotas considerando o segmento obstruído; e, (iii) calculam o impacto da redistribuição do tráfego na rede viária.

A avaliação da obstrução conjunta dos elementos da rede considera a obstrução simultânea dos segmentos ou nós da rede, o grupo de segmentos ou nós obstruído formam um conjunto. Estes conjuntos contêm um ou mais elementos (segmentos ou nós) da rede viária. Neste tipo de processo de hierarquização, as obstruções são realizadas até que a demanda não consiga ser atendida pela rede viária, ocasionando assim a disrupção da rede. A hierarquização dos elementos ocorre pela identificação de quantas vezes um determinado elemento está contido nos conjuntos de elementos que ocasionam a disrupção da rede. Esse tipo de análise demonstra-se computacionalmente exaustiva, sendo que o número de combinações em redes reais é enorme e a análise realizadas com essa metodologia se limitam a redes fictícias (DINH e THAI, 2015).

Posto isso, é atrativo verificar os trabalhos que realizam a avaliação da importância dos elementos da rede, identificar quais os critérios de priorização de segmentos na rede viária são relevantes e se esses critérios realmente são bons indicadores da importância de um segmento da rede frente às adversidades. JENELIUS *et al.* (2006) utilizaram um método no qual foi calculado um índice de importância para cada segmento. De tal forma que, quando um segmento é obstruído, soma-se a diferença de custo encontrado pelo usuário em transpor cada segmento, essa diferença é ponderada pelo fluxo de veículos que utiliza cada segmento. Por fim, o índice é associado ao segmento obstruído e serve como referência para representar o impacto da obstrução desse segmento na rede. Para realizar a hierarquização de segmentos é necessário calcular o índice para todos os segmentos, ou seja, realizar a alocação de tráfego considerando a obstrução de cada o segmento da rede.

A hierarquização proposta por QIANG e NAGURNEY (2008) avalia a importância de cada segmento do ponto de vista da desempenho/eficiência da rede viária. A eficiência da rede viária neste trabalho é relacionada com a conectividade da rede e tende a diminuir quando um segmento da rede é removido. Dessa forma foi avaliado o impacto na eficiência da rede decorrente da remoção de cada um dos segmentos, medindo assim sua importância para a rede viária. O segmento mais importante foi aquele que quando removido causa o maior redução na eficiência.

A definição de importância proposta por LATORA e MARCHIORI (2004) tem como base a conectividade da rede. O estudo investiga a identificação dos nós mais atrativos para ataques terroristas, que visam causar o maior impacto na rede. Nesse contexto a importância

da rede é avaliada conforme o impacto que cada obstrução em um nó ocasiona na conectividade geral da rede. Além de a metodologia proposta ser testada em uma rede fictícia e ser anacrônica, esta desconsidera vários aspectos importantes para planejamento de transportes como tempo de viagem, custo da viagem e fluxo.

No trabalho desenvolvido por MURRAY-TUITE e MAHMASSANI (2004) o conceito de importância de um segmento viário é relacionado com a sua representatividade na conectividade de um par O/D. Foi proposto um índice de desempenho que considera na sua estimativa a existência de rotas alternativas, tempo de viagem total da rede e segmentos com excesso de capacidade. A importância dos segmentos é avaliada a partir da sua obstrução e do impacto que o índice de desempenho proposto sofre. A metodologia proposta é testada somente em uma rede fictícia.

Na análise de QIANG e NAGURNEY (2008) foram comparados os resultados dos métodos propostos pelos próprios autores e o proposto por LATORA e MARCHIORI (2004). Apesar de ambos os métodos serem testados em redes fictícias, o trabalho é válido no sentido comparativo. Os resultados encontrados são contraditórios e mostram uma hierarquização diferente para cada método.

TU *et al.* (2013) realizaram um estudo que permite analisar a rede viária a partir da desconectividade de pares O/D. Para cada par O/D é testado o impacto da ruptura de cada segmento utilizado pelo determinado par O/D. No trabalho é utilizado o índice de criticidade de cada segmento viário, que tem como base o número de vezes que um segmento é utilizado na disrupção dos pares O/D. Esse índice por sua vez, é utilizado para a hierarquização dos segmentos.

BABABEIK *et al.* (2017) apresentaram um método para analisar a criticidade de segmentos viários de uma rede ferroviária com base no fluxo entre as estações. Em seu trabalho, por não utilizar métodos de alocação tradicional, o problema é abordado em dois níveis. No ‘nível inferior’ o modelo tende a minimizar o custo total das rotas entre os pares O/D. No ‘nível superior’ o modelo tenta maximizar o custo da rota, bloqueando o segmento com maior impacto na rede. Apesar dessa particularidade, a hierarquização tem como base o impacto global na rede viária decorrente da remoção do segmento. Ou seja, é calculado o impacto da remoção de cada segmento na rede e o segmento que mais impacta o tempo de

viagem da rede é o mais crítico. Além disso, são testados os impactos de conjuntos de segmentos, dois a dois e três a três. Os autores indicam que o número de combinações possíveis aumenta exponencialmente com o tamanho da rede viária avaliada.

Por fim, percebe-se que os estudos de hierarquização viária têm sido desenvolvidos junto com o estudo de análise de rede. Além disso, identifica-se que não há critério, nem metodologia definida para representar de maneira consolidada a hierarquização de segmentos na viária. Contudo percebe-se que há duas distintas abordagens para a hierarquização. A abordagem em forma de grafos, onde a hierarquização é relacionada com características topográficas da rede (LATORA e MARCHIORI, 2004; QIANG e NAGURNEY, 2008) e a abordagem que tenta que relaciona a demanda e oferta de sistemas de transportes (JENELIUS *et al.*, 2006; NÚÑES e PALAMARES, 2014; BABABEIK *et al.*, 2017; MURRAY-TUITE e MAHMASSANI, 2004). Esta segunda abordagem aos métodos de hierarquização requer uma extensa quantidade de informações com características da demanda e da rede viária da área de estudos e necessita de *softwares* de planejamento de transportes para avaliar a obstrução dos segmentos da rede. O tempo computacional despendido para abordagens desse tipo é mais extenso, em contra partida, esta abordagem proporciona uma descrição mais completa da obstrução de cada segmento da rede.

Verifica-se que os métodos de hierarquização utilizam a relação de cada segmento da rede com um indicador de desempenho de rede para avaliar a importância deste segmento da rede. A importância de um segmento é calculada através da observação da redução no valor do indicador ocasionada pela remoção ou obstrução deste segmento. QIANG e NAGURNEY (2008) apontaram que diferentes métricas ocasionam diferentes prioridades, além disso, é empregado somente um indicador de desempenho para avaliar a importância da rede.

## 2.4 PROCESSOS DE ALOCAÇÃO DE TRÁFEGO

O modelo de planejamento de transportes quatro etapas representa o complexo processo de planejamento de transporte de maneira sistemática e sequencial (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011). As etapas clássicas do modelo são definidas como: (i) geração de viagens; (ii) distribuição; (iii) escolha modal; e (iv) alocação. Neste trabalho destaca-se a utilização de diferentes processos de alocação, estático e dinâmico, para avaliar o impacto da obstrução de um segmento na rede viária.

Como o foco deste trabalho é dentro do modelo quatro etapas os modelos de alocação, não será avaliado o modelo de forma geral. Para uma análise mais crítica do processo de forma geral, recomenda-se os trabalhos de MANHEIM (1979) e FLORIAN *et al.* (1988), que avaliam as vantagens e fraquezas do modelo.

Os métodos apresentados a seguir são métodos clássicos utilizados dentro do processo de planejamento e têm por objetivo a distribuição do fluxo numa rede, a partir de algoritmos de busca do caminho de mínimo custo entre pares de origem e destino. Dessa forma, o problema do processo de alocação é um problema de escolha de rota na rede de transportes e um problema de distribuição de fluxo entre pares O/D.

Os modelos mais robustos de alocação de tráfego seguem os critérios definidos por WARDROP (1952), que são:

- (i) Os tempos de viagem nas rotas de um par O/D são mínimos entre o par O/D, de tal forma que qualquer usuário que troque de rota ocasiona o incremento no tempo de viagem entre o par O/D;
- (ii) O tempo médio de viagem de todos os motoristas é mínimo.

A aplicação destes princípios nos processos de alocação sistematiza o problema de alocação em dois problemas: a determinação da rota de menor custo e a minimização do custo. Porém, esta aplicação não é simples. Para realizar processos de alocação de tráfego geralmente são utilizados *softwares* de planejamento.

#### **2.4.1 MODELOS DE ALOCAÇÃO ESTÁTICO**

O primeiro princípio de WARDROP (1952) consiste na busca pelo equilíbrio no tempo de viagem dos usuários, ou seja, quando um grupo de usuários pertencentes ao mesmo par O/D não conseguem mais melhorar o tempo de viagem de suas rotas, assume-se que este par esteja em equilíbrio. Em outras palavras, todos os usuários de um mesmo par O/D apresentam o mesmo tempo de viagem e este é o menor possível para este par, caracterizando assim o equilíbrio do par.

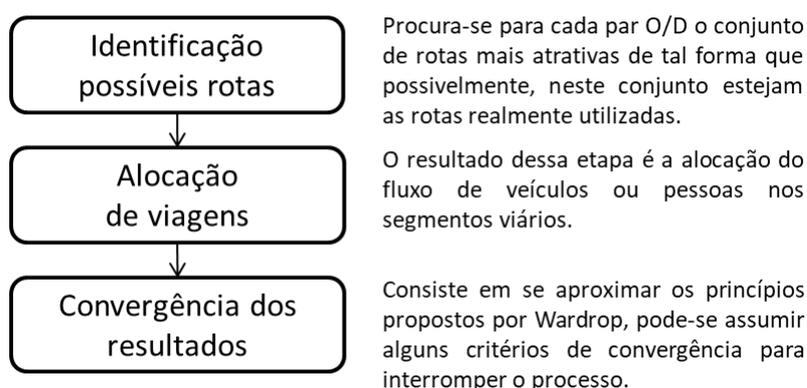
O segundo princípio, também proposto por WARDROP (1952), faz referência à rede de transportes e não somente a um único par O/D. Este princípio assume que o tempo médio

de viagem entre todos os pares O/D deve ser mínimo, chegando então a um equilíbrio na rede como um todo. Esse princípio denomina-se equilíbrio do sistema.

Existem diversos modelos de alocação estáticos, destaca-se dentre eles o modelo de equilíbrio do usuário (EU, do inglês *user equilibrium*) que considera na sua aplicação o primeiro princípio de Wardrop (WARDROP, 1952).

Os diversos procedimentos de alocação seguem os princípios de equilíbrio no tempo de viagem de um par O/D e de equilíbrio no tempo de viagem da rede (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011). De forma geral, para garantir que essas restrições sejam alcançadas são utilizados algoritmos que busquem satisfazer essas condições. As principais etapas desses modelos são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Resumo das Etapas do Processo de Alocação



(fonte: adaptado pelo autor de Ortuzar e Willumsen, 2011)

#### 2.4.1.1 Identificação de possíveis caminhos

A procura pelo caminho de menor custo é uma tarefa fundamental dos processos de alocação. Dependendo do método de alocação utilizado, essa etapa pode correr mais de uma vez, porém sempre ocorrerá no mínimo uma vez em qualquer processo de alocação (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011). Um dos objetivos dos algoritmos de caminho de mínimo custo é buscar uma alta verossimilhança com as rotas utilizadas pelos usuários da rede. Os usuários tendem a fazer suas escolhas de rota através de uma estimativa própria do caminho de menor custo. O custo dentro do processo de alocação é denominado impedância. A impedância de uma rota é definida pela soma das impedâncias de todos os segmentos e cruzamentos daquele caminho.

De forma geral, nos processos de alocação são empregados dois algoritmos de busca de caminho de mínimo custo. O proposto no trabalho de MOORE (1957) demonstrou ser um algoritmo muito eficiente na busca pela rota mais curta. E outro proposto por DIJKSTRA (1959) é muito similar, porém mais complexo e eficiente no cálculo de redes extensas.

Alguns algoritmos buscam determinar o caminho de menor custo entre cada par O/D, outros se diferem por buscarem as rotas de menor custo com base de uma zona de origem para todas as zonas de destino, construindo assim um ‘árvore de caminhos’, segmento por segmento da rede (PAPACOSTAS, 1987). A construção desse tipo de informação desagregada permite um importante incremento no processo de planejamento, pois elas podem ser utilizadas para estimativa de tempo de viagem, condições de saturação, número de interseções de uma rota, localizar os pontos de maior atraso, etc. (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011). Assim, programas de planejamento urbano de transportes mais modernos permitem, a partir de uma rede codificada e uma alocação calibrada, a identificação de rotas de menor custo considerando a impedância, a distância, o tempo de viagem médio diário ou o tempo de viagem horário para os casos de estudos dinâmicos (MANUAL PTV VISUM, 2015).

O escopo dessa dissertação não entra na discussão de eficiência e detalhes dos algoritmos de busca pelo caminho de mínimo custo. Como sugestão, VAN VLIET (1978) propõe uma discussão sobre dos algoritmos mais utilizados para a construção de rotas. Mais recentemente, FU *et al.* (2006) apresenta uma revisão de heurísticas e algoritmos para a escolha de caminho mais curto, específico para as implementações desses processos em transporte.

#### 2.4.1.2 Alocação de viagens

A alocação de viagens busca alocar as viagens nas rotas existentes de cada par O/D. Para realizar essa alocação é considerado o custo que os usuários encontram para realizar a viagem entre o ponto de início e término da viagem, denominado impedância. A composição do custo pode decorrer de diversos fatores como: tempo despendido, distância percorrida, custo monetário, segurança e conforto. Entre esses parâmetros se destaca o tempo despendido de viagem. As funções de custo são formulações matemáticas utilizadas no processo de alocação para estimar o tempo de viagem entre um ponto de origem e destino considerando as

condições de tráfego entre esses pontos (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011). As principais funções de custo são apresentadas a seguir.

Dentro do processo de alocação as funções de custo são utilizadas para estimar o tempo de viagem entre os pares O/D. Na maioria das vezes, as funções de custo relacionam a capacidade do segmento ou da interseção com demanda atual. Também conhecidas como *volume-delay function* (VDFs) essas funções geralmente são função do tempo de viagem em condições de fluxo livre (SPIESS, 1990).

Segundo BRANSTON (1976), as VDFs expressam o estado-da-arte das metodologias utilizadas para expressar a relação que existe entre tempo de viagem e fluxo de tráfego. Contudo, a aplicação dessas metodologias inclui a dificuldade de definir a capacidade dos segmentos da rede. Outro aspecto que implica em grande dificuldade é garantir que a capacidade do segmento varie de forma adequada juntamente com as condições de tráfego.

Aplicações recentes das VDFs buscam expressar de forma mais precisa as relações entre oferta e demanda em situações de congestionamento. Um processo de alocação adequado aliado a uma VDF que consiga expressar os atrasos de maneira significativa melhora a capacidade de representar o realismo em uma rede de transportes e providencia um incremento capacidade de análise da rede, permitindo propor cenários e modificações na rede ou na demanda com representatividade (KURTH *et al.*, 1996).

A calibração das VDFs representa um impacto direto no tempo de viagem, ou seja, na estimativa dos atrasos na rede viária. O entendimento do comportamento das funções frente à variação de seus parâmetros e o resultado final da alocação é fundamental para uma VDF se adequar a rede onde esta sendo implementada. Assim, a alocação e as VDFs apresentam uma relação direta. Em outras palavras, a estimativa correta de tempos de viagem nos segmentos da rede viária decorrente do emprego acurado das funções de custo, é fundamental para um planejamento de transportes adequado e para a construção de cenários futuros (LEONG, 2016).

A BPR (Bureau of Public Roads, 1964) é a principal e mais reconhecida VDF aplicada em segmentos viários (CUI *et al.* 2014; THOMAS *et al.* 2012; KURTH *et al.* 1996). A sua forma original e mais simples é definida como:

$$tt_{Cur} = tt_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{Q}{C} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

Onde  $tt_{Cur}$  expressa o tempo de viagem atual esperado no segmento viário. O  $tt_0$  é conhecido e representa o tempo de viagem em condições de fluxo livre do segmento,  $Q$  representa o fluxo atual do segmento viário onde a equação é aplicada e  $C$  expressa a capacidade do segmento. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros de calibração de valores estimados de 0,15 e 4,00 (BPR, 1964). Contudo STEENBRINK (1974) ao realizar a calibração encontrou valores de 2,64 para  $\alpha$  e 5,00 para  $\beta$ .

Um exemplo de aplicação da BPR original é apresentado no trabalho de previsão de demanda de São Francisco, Estados Unidos (VAN DEN HOUT, 1992). MANZO *et al.* (2014) estudam as incertezas na aplicação da função BPR assim como a aplicabilidade e a amplitude que os parâmetros da função, o estudo de caso acontece em Copenhague, Dinamarca. Como resultado do estudo em Copenhague, HANSEN (2011) define os valores dos parâmetros da equação BPR como sendo  $\alpha = 0,33$  e  $\beta = 4,04$ , contudo o autor define como a amplitude do parâmetro  $\alpha$  como sendo de 0,5 a 2,0 e do parâmetro  $\beta$  como tendo uma amplitude entre 1,4 e 11.

SPIESS (1990) critica a BPR apontando que em alguns momentos do processo de alocação, a relação  $Q/C$  pode apresentar relações maiores que o valor real esperado de no máximo 1,00. Além disso, para valores elevados de  $\alpha$ , a função representa de forma não realística o tempo de viagem, excessivo tempo de convergência para o equilíbrio no processo de alocação e perda de previsão de resultados. Por fim, demonstra que especialmente para altos valores de  $\alpha$ , o processo de alocação passa a não considerar pequenas diferenças de volumes nos segmentos, perdendo a sensibilidade na escolha de rota e se aproximando de uma processo de identificação da rota mais curta, não apresentando rotas alternativas entre

$$tt_{Cur} = tt_0 \left[ 2 + \sqrt{\alpha^2(1 - sat)^2 + \beta^2} - \alpha(1 - sat) - \beta \right] \quad (2)$$

pares O/D. Posto isso, Spiess propõe outra VDF, a função de custo Cônica:

Onde  $\beta$  é definido como:

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2}$$

Considerando  $sat$  como sendo a saturação do segmento viário calculada sugestivamente como o quociente entre volume e capacidade do segmento. O parâmetro  $\alpha$  é o parâmetro de calibração obrigatoriamente maior que 1. A orientação de SPIESS (1990) define que o parâmetro  $\alpha$  pode ser transferido da função BPR para a função de custo Cônica de forma direta uma vez que, como demonstrado em seu trabalho a diferença entre as funções para  $Q/C > 1$  é muito pequena. Uma versão do custo marginal da função de custo Cônica de Speiss é proposta para calcular o ótimo do sistema no processo de alocação ao invés do ótimo do usuário (MANUAL PTV VISSUM, 2017). Essa versão é definida como:

$$tt_{cur} = tt_0 \left[ 2 + \frac{\alpha^2(1 - sat)(1 - 2sat) + \beta^2}{\sqrt{\alpha^2(1 - sat)^2 + \beta^2}} - \alpha(1 - sat) - \beta \right] \quad (3)$$

Onde  $\beta$  novamente é definido como:

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2}$$

A função de custo marginal é obtida para garantir a restrição de existência de VDF que implica que sempre que um veículo adentrar em um segmento viário, sem a saída de demais veículos, o custo deve aumentar. Ou seja, a função deve ser estritamente crescente (ORTÚZAR e WILLMUNSEN, 2011; SPIESS, 1990). MARQUIZ (2015), apresenta um trabalho comparando o desempenho das funções clássicas BPR e a função de custo Cônica Marginal em dois segmentos viários da cidade de Bogotá, Colômbia. Para um trecho, observou-se um valor máximo de  $R^2$  de 0.83 para as funções.

KUCHARSKI e DRABICKI (2017) apresentam a função de Davidson como sendo uma das mais relevantes VDF. DAVIDSON (1966) apresenta a função geral de tempo de viagem de um segmento como sendo:

$$tt_{cur} = tt_0 \left[ 1 + \frac{J_D \left( \frac{Q}{C} \right)}{\left( 1 - \frac{Q}{C} \right)} \right] \quad (4)$$

Sendo  $J_D$  o parâmetro de calibração referente ao atraso, esse parâmetro é sugerido que seja função do tipo de segmento ou do tipo do *ambiente* onde o segmento esta inserido.

TAYLOR (1977) mostra que é possível estimar os parâmetros da função de Davidson a partir no método dos mínimos quadrados, e ressalva que a estimativa do parâmetro de atraso  $J$  é muito difícil. Além disso, mostra que para diferentes valores do parâmetro  $J$  não atinge a diferença de resultados esperados e aponta que há a necessidade de uma extensa amostra para calibrar tal parâmetro.

Para superar os problemas conceituais da função de Davidson e os problemas de calibração do parâmetro  $J$  é apresentada a função de AKÇELIK (1991). Sua função também apresenta parâmetros de atraso, porém, associados ao tipo de interseções dos segmentos, que por sua vez passam a apresentar o papel principal na VDF. Assim a sua função passa a ser empregada nos segmentos viários, mas apresenta um parâmetro de calibração a partir do atraso estimado nas interseções desse segmento. Assim, a função de Akçelik é definida como sendo:

$$tt_{Cur} = tt_0 \left\{ 1 + 0.25r_f \left[ (x - 1) + \left( (x - 1)^2 + \frac{8J_A(Q/C)}{(Qt_0r_f)} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (5)$$

Sendo  $Q$  a capacidade de veículos do segmento viário em veículos por hora;  $Q/C$  o grau de saturação do segmento calculado como sendo o quociente entre demanda atual e a capacidade do segmento. O parâmetro  $r_f$  representa a o quociente entre o tempo de viagem em fluxo livre e o tempo de viagem considerando o fluxo livre, este parâmetro é adotado como sendo parâmetro de ajuste. Por fim,  $J_A$  corresponde a qualidade do serviço oferecido pelo segmento da rodovia em análise, é tabelado e independente dos demais parâmetros, esse parâmetro, depende do tipo de interseção as quais o segmento esta conectado.

Por fim, QUINTERO (2016) apresenta em seu trabalho a função BPR, a função Cônica e a função de Akçelik como sendo as mais amplamente empregadas em processos de modelagem e alocação de transportes. Além das funções de custo apresentadas existem outras funções de custo que não são amplamente utilizadas. Essas funções apresentam uma boa validação para os casos em que são aplicadas, porém, as condições de especificidade da sua aplicação ou a complexidade de alguns parâmetros as tornam impopulares.

Independente da função de custo utilizada para estimar a impedância, a distribuição de viagens é realizada a partir de modelos de distribuição de viagem. Os modelos de distribuição

utilizam funções de distribuição, as principais funções utilizadas são: Kirchhoff, Box-Cox e Probit (MANUAL PTV VISUM, 2015).

#### **2.4.2 MODELOS DE ALOCAÇÃO DINÂMICOS**

Os modelos de alocação dinâmica surgiram com aprimoramento dos modelos estáticos, e tentam lidar de uma forma mais eficiente com a natureza dinâmica do trânsito. Os modelos de equilíbrio estático consideram que o fluxo veicular é distribuído uniformemente no intervalo de tempo da análise estática (geralmente uma hora). Dessa forma, os modelos estáticos são limitados na avaliação do efeito do congestionamento (CAMPOS, 1997).

Modelos dinâmicos são empregados para avaliações do efeito de modificações na rede (ABDELGHANY *et al.* 1999), na análise de planos de transportes (PAPACOSTAS, 1989) e da eficácia de alternativas operacionais de tráfego durante eventos especiais ou emergências.

Em um cenário real, o tráfego tem um comportamento em onda, onde os efeitos em um segmento interferem os fenômenos que ocorrem em momentos seguintes (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 2011). Assim, os modelos de alocação dinâmica tentam explicar a oscilação da demanda dentro de um intervalo de tempo (por exemplo, a hora de maior movimento do dia) definindo os segmentos carregados em cada instante de tempo e possibilitando a escolha de horário de partida. 1

O processo de alocação dinâmica (*Dynamic Traffic Assignment, DTA*), surge para representar as condições de tráfego na rede viária e de fluxo ao longo de um período de tempo permitindo análise em intervalos de tempo. Para realizar esse tipo de processo são empregados modelos que objetivam descrever o comportamento das condições da rede e a distribuição da demanda em função do tempo (CHIU *et al.* 2011). No trabalho apresentado por FRIESZ (1993), é explicado que no processo de alocação dinâmico as perspectivas de escolhas – escolha de rota e escolha de horário de partida – são variáveis dependentes do tempo e definidas pela condição do ambiente.

A demanda é vinculada a uma distribuição temporal, ou seja, em cada intervalo de tempo uma parcela de demanda é carregada na rede. Para essa parcela da demanda em cada intervalo da análise são aplicados modelos identificação de caminhos de mínimo custo e modelos de alocação de viagens.

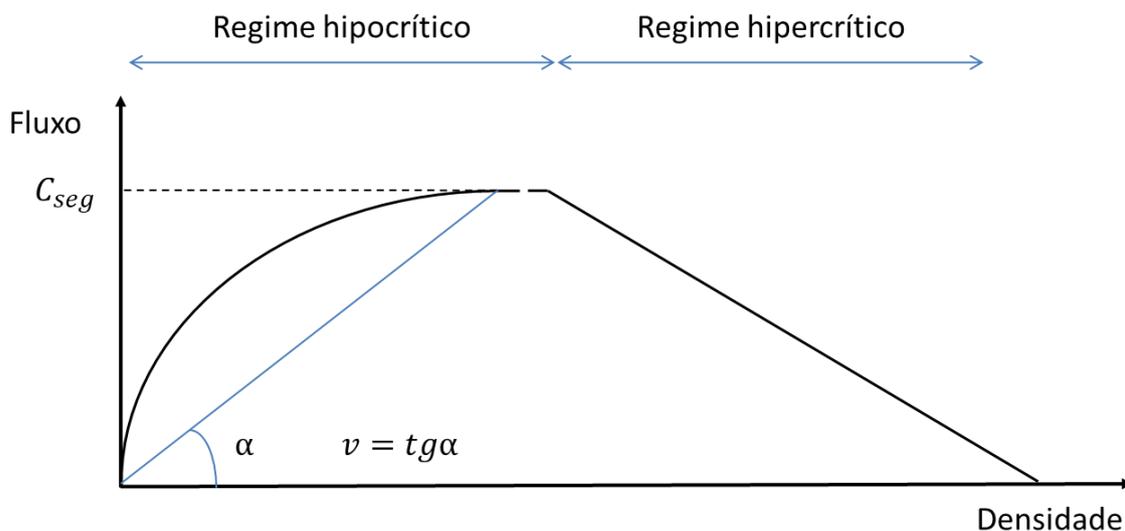
Essas condições levaram a consolidação de diversos modelos e algoritmos de alocação dinâmica, que buscam aplicar em uma demanda dinâmica o segundo princípio de Wardrop. A revisão apresentada por PEETA e ZILIASKOPOULOS (2001) aponta que a condição de equilíbrio do usuário é a mais aplicada aos modelos dinâmicos e é definida como uma condição de equilíbrio dinâmico do usuário (DUE, do inglês, *dynamic user equilibrium*).

Para garantir que a condição de equilíbrio dinâmico seja atendida é necessário uma série de informações específicas sobre a demanda e sobre a rede viária (MANUAL PTV VISUM 2015). A seguir são apresentadas características dos algoritmos que garantem que processo de alocação dinâmico ocorra e as principais informações necessárias para realizar o processo de alocação dinâmico.

#### *2.4.2.1 Principais algoritmos no processo de alocação dinâmico*

Nos modelos dinâmicos a condição de trânsito em um segmento é definida pela sua relação entre tempo de viagem e saturação. Assim, todos os segmentos são associados com seu próprio diagrama fundamental que relaciona para cada intervalo da análise o volume e a densidade do segmento, permitindo a obtenção da velocidade dos veículos que utilizam o segmento (CHIU *et al.* 2011). A definição da velocidade no segmento é determinada pelo teorema de cinemática de filas simplificado que assume que a relação de fluxo e saturação apresentam dois regimes, hipocrítico e hiper-crítico (MANUAL PTV VISUM, 2015). A Figura 2 apresenta essa relação.

Figura 2 – Representação do diagrama fundamental de fluxo para um segmento



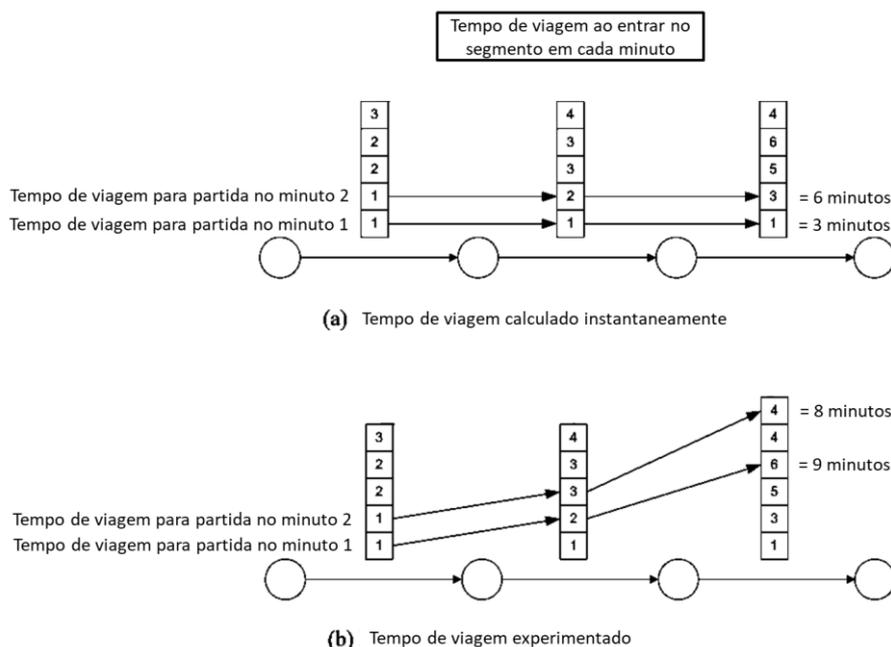
(fonte: adaptado pelo autor de MANUAL PTV VISUM, 2015)

A velocidade do segmento é obtida através do coeficiente angular entre ponto de densidade e fluxo observado no diagrama e o ponto de origem. O regime hipocrítico corresponde ao tráfego não congestionado, nessa condição se a densidade de veículos de um segmento aumentar, apesar da velocidade diminuir, o fluxo veicular aumenta. O regime hipercrítico representa condições de tráfego pesado, nessa condição, se a densidade de veículos no segmento aumenta, o fluxo veicular e a velocidade diminuem.

Outra característica dos modelos dinâmicos é a propriedade de garantir que todos os veículos que entram em um segmento em um dado intervalo de tempo estejam sujeitos às mesmas condições de tráfego (FIFO, do inglês, *first-in, first-out*). A aplicação prática desse princípio implica em que não há prioridade (ultrapassagem) de saída do segmento, implicando na não discretização de volumes por faixa (SLODOBEN et al. 2012). Contudo, os modelos dinâmicos que sincretizam as condições de trânsito por faixa não utilizam esse princípio.

Para determinar o volume de cada segmento e apresentar uma condição que possibilitem a escolha de rota dos usuários os modelos de escolha de rota utilizam o tempo de viagem experimentado. A Figura 3 representa o funcionamento dessa característica.

Figura 3 - Diferença entre tempo de viagem instantâneo e tempo de viagem experimentado



(fonte: adaptado pelo autor do PTV MANUAL VISUM, 2015)

Observando a Figura 3, percebe-se que o tempo despendido em cada método é diferente. O tempo de viagem calculado instantaneamente não considera a natureza dinâmica do tráfego, se assemelhando a condição dos processos estáticos. Modelos DTA utilizam o tempo de viagem experimentado, considerando que a condição dos segmentos é alterada ao longo da viagem. A partir dessa condição entende-se que o tempo de viagem em DTA varia com os intervalos de análise e necessita de um algoritmo de busca de melhor caminho dependente de tempo (TDSP, do inglês *time-dependent shortest path*) que é aplicado para cada parcela da demanda em cada intervalo de tempo da análise.

Os processos de alocação dinâmica com base em condições de equilíbrio utilizam algoritmos parecidos com os utilizados em processos de alocação estática, porém mais robustos. Os principais algoritmos utilizados são de caminho de mínimo custo e de alocação de viagem nas rotas.

Os algoritmos de caminho de mínimo custo objetivam buscar uma nova solução em cada intervalo da análise para cada intervalo de demanda utilizando informações produzidas a partir da própria rede. O tempo de viagem se altera com o passar do tempo e com isso é utilizado um algoritmo de caminho de mínimo custo dependente do tempo (TDSP). A

principal diferença desse algoritmo em relação aos empregados na análise estática é que: (i) o caminho de menor custo para análise estática se mantém constante em todo o horizonte de tempo, (ii) em TDSP a busca do caminho de menor custo utiliza o tempo de viagem experimentado para a busca de menor caminho; e (iii) o TDSP é realizado para cada segmento de demanda em cada intervalo de tempo (GALLO e PALLOTINO, 1988).

Os algoritmos de alocação de viagens à rota são metodologia aplicada cada par O/D de cada horário de partida (par ODT, do inglês *origin-destination-departure time increment*). Além da aplicação de algoritmo de Frank-Wolfe, outros métodos são aplicados por WIE et al. (1987), BAR-GERA e BOYCE (2003) e DIAL (2006). Contudo, ainda utiliza-se o método de médias sucessivas (MSA do inglês, *method of successive average*) apresentado por SHEFFI (1984), apesar da maioria dos pacotes computacionais já utilizarem algoritmos com base em projeção de gradientes (SLODOBEN, 2012).

#### 2.4.2.2 Principais dados para o processo de alocação dinâmico

Segundo SLOBODEN (2012) informação sobre volumes bem definidas são essenciais para o desenvolvimento de um modelo de alocação dinâmico. Para o cumprimento dessa tarefa é necessária a distribuição temporal da demanda. Se possível, as informações devem ser diferenciadas quanto ao tipo de veículo, visto que diferentes veículos apresentam diferentes critérios de escolha de rota. Recomenda-se também que apesar da natureza desagregada do volume deve-se representar adequadamente sua variabilidade, assim as informações coletadas devem representar a variabilidade de diferentes situações (finais de semana, incidentes, condições climáticas, efeitos sazonais, etc.).

As informações sobre a rede viária requerem cenários codificados que atendam as condições para receber uma alocação dinâmica de tráfego. A rede viária, geralmente é representada por segmentos homogêneos e nós (interseções) que devem ser georeferenciadas e carregam as informações geométricas e operacionais do elemento, tais como: capacidade, velocidade de fluxo livre, modos de transporte permitidos, velocidades limites, tipo de interseção, tipo de controle. Todo esse processo de codificação apresenta fontes diversas como base e é uma tarefa demorada (CHIU *et al.*, 2011).

Os DTA podem facilmente representar os cruzamentos semaforizados, assim como medir os efeitos de sua sincronização, para isso são necessárias informações como o ciclo semafórico e o tempo de verde. Elementos como *ramp metering* também podem ser codificados, assim como sinais restritivos a alguns modos de transportes, priorizando a passagem de outros modos (MANUAL PTV VISUM, 2015).

Além dos métodos apresentados, existem diversas outras metodologias que ou semelhantes, ou que são variações dessas. O escopo desse trabalho não é detalhar todos os métodos de alocação, e sim a caracterização dos principais métodos até o desenvolvimento da alocação dinâmica. Recomenda-se a leitura do trabalho de ORTÚZAR e WILLUMSEN (2011) para uma revisão métodos existentes.

### **3 AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS DE UMA REDE VIÁRIA A PARTIR DE INDICADORES DE DESEMPENHO**

Como apresentado no capítulo anterior, os indicadores de desempenho são medidas agregadas de condições de funcionamento da rede. A literatura reporta que na avaliação de obstruções, os indicadores de desempenho são utilizados para medir a queda no desempenho da rede, assim como para medir a abrangência e a intensidade do impacto decorrente de uma obstrução.

O método utilizado nesse trabalho para identificar e avaliar indicadores de desempenho de rede, para a avaliação conjunta para identificação do segmento crítico e para a avaliação dos impactos decorrentes da obstrução do segmento crítico esta composto de seis etapas. A Figura 4 ilustra as etapas necessárias para realizar as avaliações. A descrição de cada etapa do método é realizada a seguir.

A etapa 1 consiste na obtenção dos indicadores de desempenho utilizados no trabalho. Esta etapa detalha a definição e obtenção dos indicadores de desempenho com base nos resultados do processo de alocação EU e a sua relevância na literatura. Também é considerada esta etapa a capacidade do *software* de planejamento de transportes VISUM de obter informações necessárias para realizar o cálculo dos indicadores de desempenho.

A etapa 2 consiste na delimitação e caracterização da área de estudo, da codificação da rede viária e da modelagem da demanda. Esta etapa utiliza o *software* de planejamento de transportes VISUM para elaboração dos cenários base (sem alterações), que serão utilizados nas etapas seguintes.

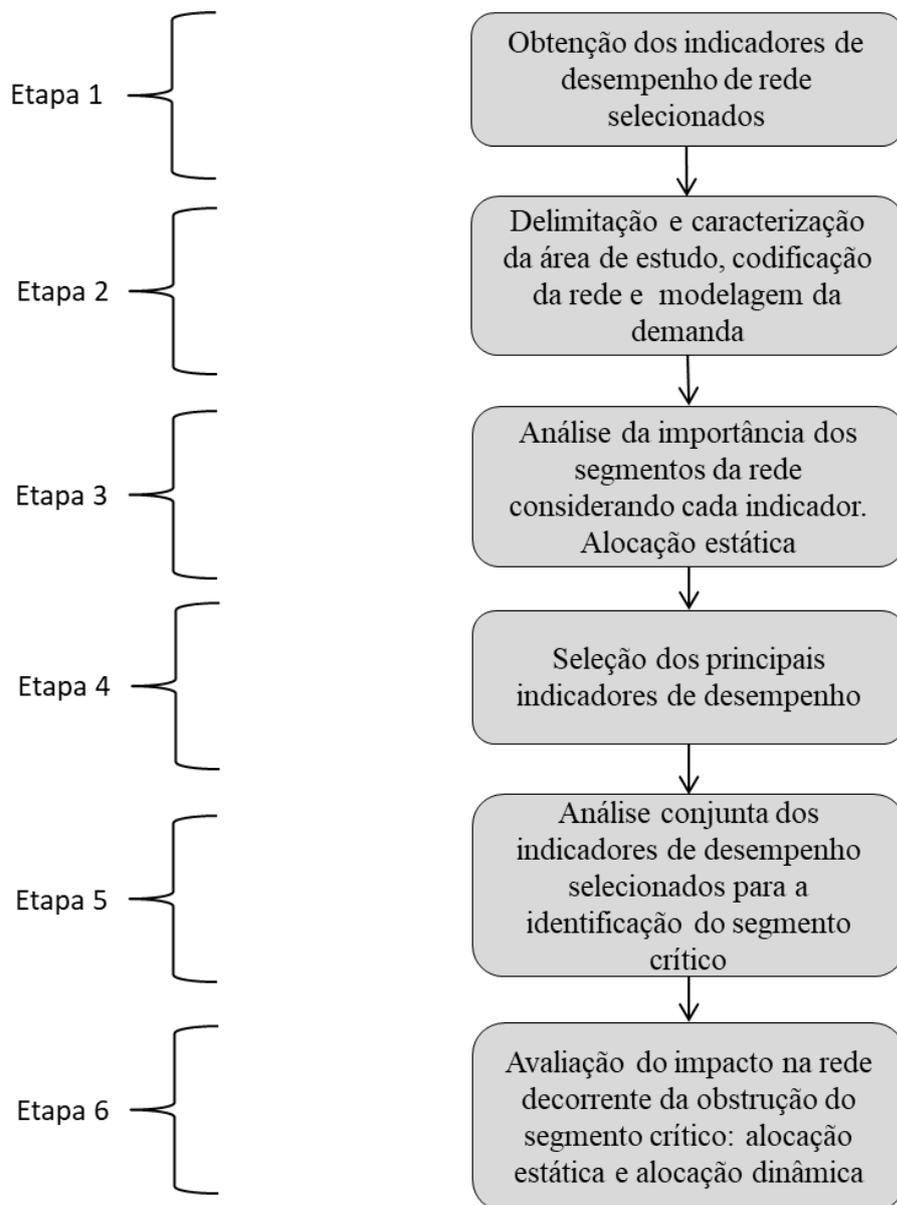
A etapa 3 consiste na análise da importância dos segmentos da rede considerando cada indicadores de desempenho. Nesta etapa são realizados processos de alocação estática para avaliar o impacto da obstrução de cada segmento na rede viária e a importância dos segmentos. Esta etapa considera cada indicador de desempenho individualmente.

A etapa 4 consiste na avaliação estatística dos indicadores de desempenho, objetivando selecionar os principais indicadores. Os indicadores selecionados nesta etapa serão empregados na análise conjunta de indicadores, que objetiva a identificação do segmento crítico.

A etapa 5 consiste na análise conjunta dos indicadores de desempenho selecionados na etapa 4 para a identificação do segmento crítico. Nesta etapa, os indicadores de desempenho são igualmente importantes e são considerados simultaneamente na identificação do segmento crítico da rede viária.

A etapa 6 consiste na avaliação do impacto na rede decorrente da obstrução do segmento crítico. Nesta etapa são realizadas alocações estáticas e alocações dinâmicas para avaliar o impacto decorrente da obstrução do segmento crítico.

Figura 4 – Fluxograma do método utilizado para avaliar a importância dos segmentos de uma rede viária a partir de indicadores de desempenho



(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

#### 3.1.1 ETAPA 1 – OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE SELECIONADOS

Os indicadores de desempenho objetivam avaliar o funcionamento da rede viária. Para isso são utilizadas informações associadas aos segmentos viários ou aos pares O/D. Com base nos trabalhos apresentados na seção 2.1 do capítulo anterior e na capacidade do *software* VISUM de obter informações decorrentes do processo de alocação estático da rede foram selecionados os indicadores de desempenho empregados nas etapas seguintes deste trabalho. Os indicadores de desempenho utilizados são apresentados a seguir.

- a) Total de tempo despendido na rede viária (TTD);
- b) Total da diferença do tempo despendido com o cenário base (DTD);
- c) Total de segmentos com incremento de volume (TIV);
- d) Comprimento total da rede afetada (CRA);
- e) Distância média de viagem (DMV);
- f) Tempo médio de viagem (TMV);
- g) Total de rotas na rede (TRR).

O cálculo dos indicadores de desempenho é um processo complexo que utiliza os resultados decorrentes do processo de alocação para representar o desempenho da rede viária. Para isso, são utilizadas informações tanto dos segmentos viários como de pares O/D. A seguir, são apresentadas as formulações de cálculo dos indicadores de desempenho empregados neste trabalho.

- a) Total de tempo despendido na rede viária (TTD)

Este indicador representa o tempo total despendido por todos os usuários na rede viária (ZOCKAIE *et al.*, 2014; SNELDER *et al.*, 2012). O somatório do tempo de viagem de todos os usuários dentro de uma determina área de estudo aumenta quando a rede sofre alguma alteração negativa. Dessa maneira o TTD representa o desempenho da rede. Também

pode ser empregado como uma medida de saturação da rede, pois quanto mais saturada a rede viária, maior é o tempo total que os usuários permaneçam na rede viária para realizarem suas viagens. De forma genérica o indicador é expresso pela equação:

$$TTD = \sum_{i=1}^l vol_i tt_i \quad (5)$$

Sendo  $l$  o total de segmentos da rede viária,  $i$  é o número do segmento analisado,  $vol_i$  é o volume total de veículos que utiliza o segmento  $i$ , e  $tt_i$  é o tempo de viagem necessário para percorrer o segmento  $i$ , em horas.

b) Total da diferença do tempo despendido com o cenário base (DTD)

Este indicador representa a diferença do tempo despendido no cenário alterado e o tempo despendido no cenário base (JENELIUS, 2006; KAMGA *et al.*, 2011; ZHENH *et al.*, 2014). É uma medida muito similar ao TTD, porém considera as condições do cenário base no seu cálculo. O DTD expressa somente o incremento no tempo despendido na rede. Essa condição facilita a comparação de cenários distintos. De forma genérica é definido pela equação:

$$DTD = \sum_{i=1}^l [(vol_i tt_i)_{atual} - (vol_i tt_i)_{base}] \quad (6)$$

Sendo  $l$  o total de segmentos da rede viária,  $i$  o segmento analisado,  $vol_i$  é o volume total de veículos que utiliza o segmento  $i$  e  $tt_i$  é o tempo de viagem do segmento  $i$ , em horas. Ambos os parâmetros são calculados para o cenário com obstrução (*atual*) e para o cenário base (*base*).

c) Total de segmentos com incremento de volume (TIV)

Este indicador contabiliza o total de segmentos que apresentam incremento de volume em comparação com o cenário base (BURGHOUT *et al.*, 2010). Ao contabilizar o número de segmentos que sofrem incremento de volume o indicador registra uma medida de abrangência do impacto na rede. De forma genérica, o indicador é definido como:

$$TIV = \sum_{i=1}^l u_i \quad (7)$$

Sujeito a:

$$u_i = \begin{cases} \text{se } vol_{i,atual} > vol_{i,base} = 1 \\ \text{se } vol_{i,atual} \leq vol_{i,base} = 0 \end{cases}$$

Sendo  $u_i$  a condição utilizada para calcular o indicador;  $l$  é o total de segmentos da rede viária;  $i$  é o segmento a ser analisado pertencente a  $l$ ;  $vol_{i,atual}$  é o volume no segmento  $i$  considerando o cenário com a obstrução; e  $vol_{i,base}$  é o volume do segmento  $i$  no cenário base (sem obstrução).

d) Comprimento total da rede afetada (CRA)

Este indicador calcula o comprimento total da rede viária que apresentam incremento de volume quando comparada com o cenário base. Este indicador é proposto com base no TIV (BURGHOUT *et al.*, 2010), porém refere-se a extensão dos segmentos com incremento de volume, medindo a real extensão do impacto na rede viária e permite averiguar a abrangência do impacto na rede. De forma genérica, o indicador é definido como:

$$CRA = \sum_{i=1}^l v_i \quad (8)$$

Sujeito a:

$$v_i = \begin{cases} \text{se } vol_{i,atual} > vol_{i-base} = c_i \\ \text{se } vol_{i,atual} \leq vol_{i-base} = 0 \end{cases}$$

Sendo  $v_i$  o valor utilizado para representar o indicador;  $l$  é o total de segmentos da rede viária;  $i$  é o segmento a ser analisado pertencente a  $l$ ;  $vol_{i,atual}$  é o volume no segmento  $i$  considerando o cenário com a obstrução;  $vol_{i,base}$  é o volume do segmento  $i$  no cenário sem obstrução; e  $c_i$  é o comprimento do segmento  $i$ , em quilômetros.

e) Distância média de viagem (DMV)

Este indicador calcula a distância média de viagens entre os pares O/D (ABDELGHNY *et al.*, 1999). A DMV é ponderado pelo volume de viagens entre cada par O/D para melhor representar a distância média das viagens da rede. A distância de uma viagem é uma medida

relacionada com a saturação da rede. Para uma determinada rede viária não saturada, o incremento da demanda ocasiona o uso de rotas alternativas, geralmente mais extensas. Assim, a DMV pode ser associada ao desempenho de uma determinada rede. De forma genérica, o indicador é definido como:

$$DMV = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k dist_{aij} vol_{aij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n vol_{ij}} \quad (9)$$

Sendo  $m$  e  $n$  as dimensões da matriz O/D;  $k$  o número da rotas existente para cada par O/D  $ij$ ;  $vol_{aij}$  o volume de viagens realizadas utilizando a rota  $a$  do par O/D  $ij$ ;  $vol_{ij}$  o volume de viagens entre cada par O/D  $ij$ ; e  $dist_{aij}$  a distância de viagem entre o par O/D  $ij$  utilizando a rota  $a$ , em quilômetros.

f) Tempo médio de viagem (TMV)

Este indicador calcula o tempo médio de viagem entre pares O/D (HOJATI, *et al.*, 2016; KIM *et al.*, 2013; LOU *et al.*, 2012; BURGHOUT *et al.*, 2010; ABDELGHANY *et al.*, 1999). O TMV é ponderado pelo volume de cada par O/D. O tempo médio de viagem entre pares O/D é uma medida agregada que expressa o tempo médio que cada usuários da rede despendem para realizar sua viagem. De forma genérica, o indicador é definido como:

$$TMV = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k tt_{aij} vol_{aij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n vol_{ij}} \quad (10)$$

Sendo  $m$  e  $n$  as dimensões da matriz O/D;  $k$  o número de rotas existente para cada par O/D  $ij$ ;  $vol_{aij}$  o volume de viagens realizadas utilizando a rota  $a$  do par O/D  $ij$ ;  $vol_{ij}$  o volume de viagens entre cada par O/D  $ij$ ; e  $tt_{aij}$  o tempo de viagem entre o par O/D  $ij$  utilizando a rota  $a$ , em minutos.

g) Total de rotas na rede (TRR)

Este indicador contabiliza o total de rotas entre pares O/D que existem na rede viária (BURGHOUT *et al.*, 2010; KNOOP *et al.*, 2010; SISIOPIKU *et al.* 2007). O número de rotas entre um par O/D reflete uma condição de desempenho da rede e saturação da rede. Quando o TRR é igual ao número de pares O/D não há o uso de rotas alternativas. O incremento do

TRR implica que rotas não ótimas estão sendo utilizadas, e a condição inicial de desempenho da rede foi prejudicada. De forma genérica, o indicador é definido pela função:

$$TRR = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (11)$$

Sendo  $m$  e  $n$  as dimensões da matriz O/D;  $i$  e  $j$  são respectivamente coordenadas do par entre zonas de tráfego de origem e destino;  $k$  é o número de rotas existentes entre cada par  $i$  e  $j$ .

### **3.1.2 ETAPA 2 – DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, CODIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA E MODELAGEM DA DEMANDA**

A definição da área de estudo objetiva a codificação de uma rede e modelagem da demanda que componham um cenário base para a realização da análise. As etapas de codificação, zoneamento de tráfego e alocação, são realizadas no *software* VISUM. A Figura 5 ilustra as fases da etapa 2.

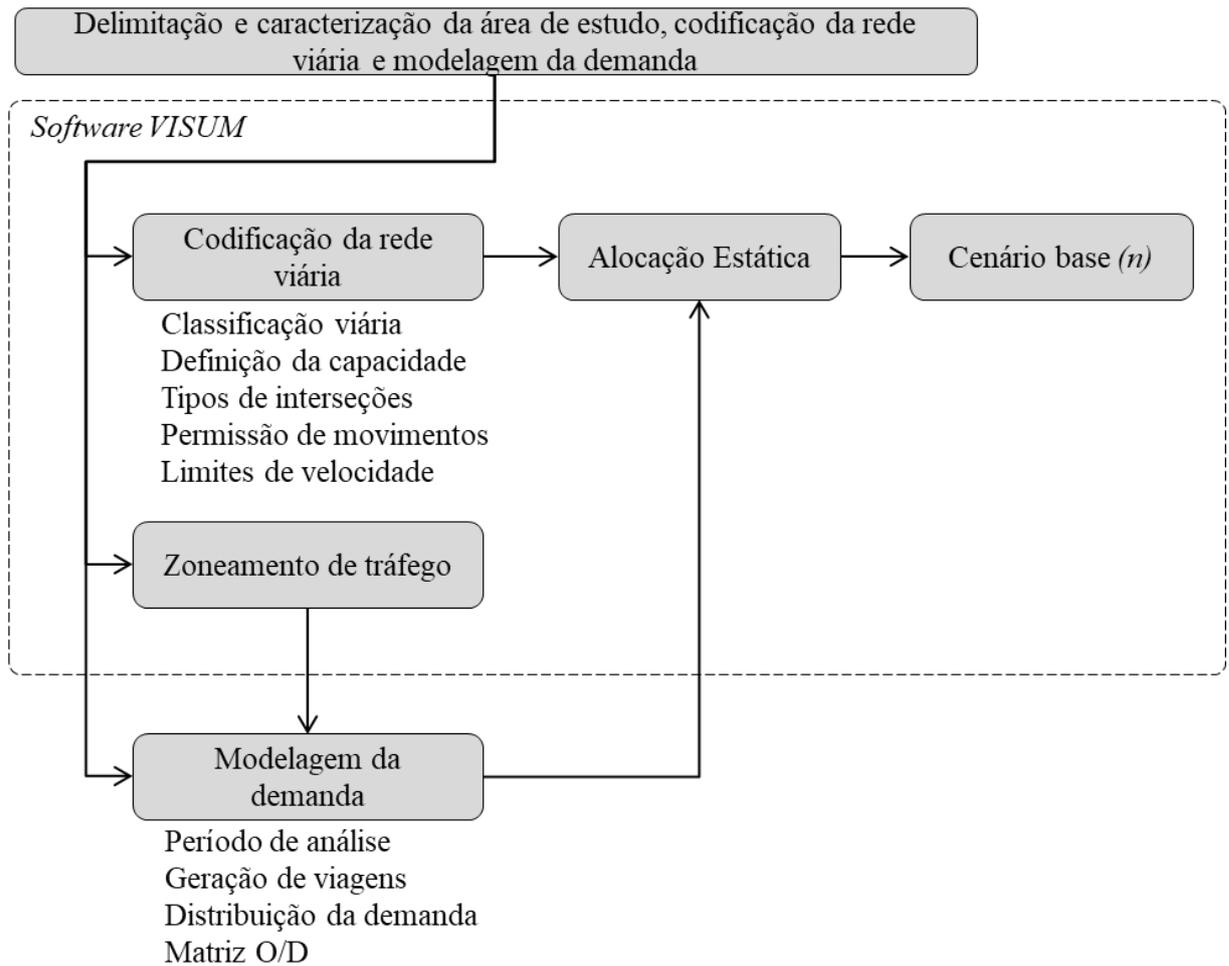
A fase de codificação da rede viária consiste em representar a rede viária. Nesta fase estão contidos os processos de classificação viária, de definição da capacidade dos segmentos, de classificação das interseções entre os segmentos, de delimitação permissão de movimentos entre cada tipo de interseção e de definição dos limites de velocidade de cada segmento.

A fase de zoneamento de tráfego objetiva representar de forma agregada uma área com características homogêneas e define o nível de detalhe do estudo. Nesta fase são definidos os pares de origem e destino (pares O/D).

A fase de modelagem da demanda objetiva a consolidação de uma matriz de origem e destino (matriz O/D), com base nas zonas de origem e destino. Nesta fase são realizados os processos de definição do período de análise, geração de viagens, distribuição da demanda e elaboração da matriz O/D.

A fase de alocação objetiva distribuir a demanda representada pela matriz O/D na rede viária codificada. Esta etapa resulta na distribuição dos volumes de tráfego nos segmentos da rede. A partir da fase alocação estática são consolidados os cenários base.

Figura 5 – Fluxograma fases da Etapa 2

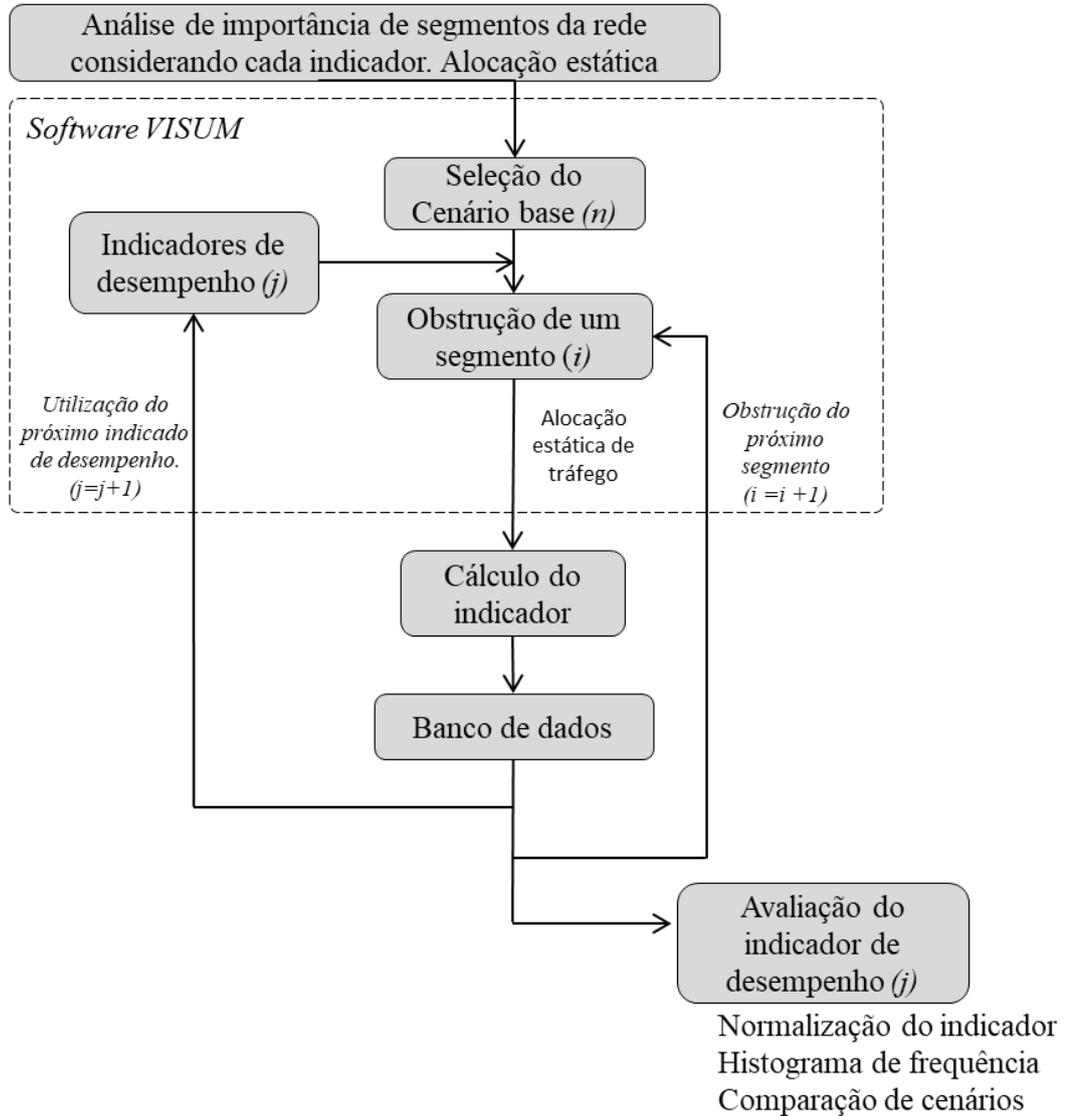


(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.1.3 ETAPA 3 – ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS DA REDE CONSIDERANDO CADA INDICADOR: ALOCAÇÃO ESTÁTICA

Esta etapa objetiva avaliar o impacto decorrente da obstrução de cada segmento da rede para cada indicador de desempenho. A avaliação dos impactos tem como base a rede viária e as demandas (definidas na etapa 2) e é realizada através dos indicadores de desempenho (definidos na etapa 1). A etapa 3 do método proposto é dividida em seis fases: Seleção do cenário base; indicador de desempenho; Obstrução do segmento ( $i$ ); Cálculo do indicador; Banco de dados e Avaliação do indicador ( $j$ ). As três primeiras fases da análise são executadas no *software* de planejamento de transportes VISUM. A Figura 6 apresenta o fluxograma desta análise.

Figura 6 – Fluxograma de fases da Etapa 3



(fonte: elaborado pelo autor)

A fase Seleção do cenário base ( $n$ ) consiste na seleção da rede e da demanda que serão avaliados. A partir disso, define-se o indicador de desempenho ( $j$ ) que será utilizado para avaliar a rede. Em seguida, realiza-se a obstrução (total bloqueio) sistemática de cada um dos segmentos da rede.

A fase obstrução de um segmento ( $i$ ) consiste em bloquear o uso do segmento, este segmento tem sua capacidade viária reduzida a zero. Após a redução da capacidade do segmento ( $i$ ), realiza-se o processo de alocação estática. O resultado desse processo é a distribuição da demanda do cenário base ( $n$ ) na rede viária com o segmento ( $i$ ) bloqueado. A

partir dessa condição, o impacto da obstrução do segmento ( $i$ ) é calculado considerando cada indicador de desempenho ( $j$ ).

O banco de dados registra o valor do indicador de desempenho ( $j$ ) calculado para a obstrução do segmento ( $i$ ). Em seguida, ocorre a obstrução do próximo segmento ( $i+1$ ). Este processo é repetido até que todos os segmentos da rede que apresentam volume de tráfego terem sua obstrução avaliada e registrada no banco de dados.

Com base no banco de dados contendo o valor dos indicadores de desempenho da rede para cada obstrução, realiza-se a avaliação do indicador ( $j$ ) na a rede. Esta fase consiste em:

- (i) Distribuição dos valores observados do indicador de desempenho ( $j$ ) em um histograma de frequência;
- (ii) Observação dos valores observados do indicador ( $j$ ) ao longo da extensão da rede;
- (iii) Elaboração de um mapa temático com a classificação normalizada dos valores observados do indicador ( $j$ ).

Por fim, este processo é repetido para cada um dos indicadores de desempenho ( $j$ ) de rede definido na etapa 1 do método utilizado e para cada cenário base ( $n$ ) resultante da etapa 2.

#### **3.1.4 ETAPA 4 – SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS INDICADORES**

Esta etapa é definida pela seleção dos principais indicadores de desempenho com base nos resultados encontrados na etapa 3 do método aplicado neste trabalho. Para isso, é realizada uma análise de correlação de Pearson ( $r$ ) para os resultados decorrentes da obstrução de cada um dos segmentos da rede viária para cada indicador de desempenho em cada cenário analisado (banco de dados obtido ao término da etapa 3).

A correlação indica o sentido e a força com que duas variáveis se relacionam, variando de -1 a 1. Para variáveis de perfeita proporção na mesma direção  $r = 1$ , para variáveis de perfeita proporção de direção inversa  $r = -1$ . Quando  $r = 0$  indica que as duas variáveis não estão relacionadas. O coeficiente de correlação de Pearson é definido por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

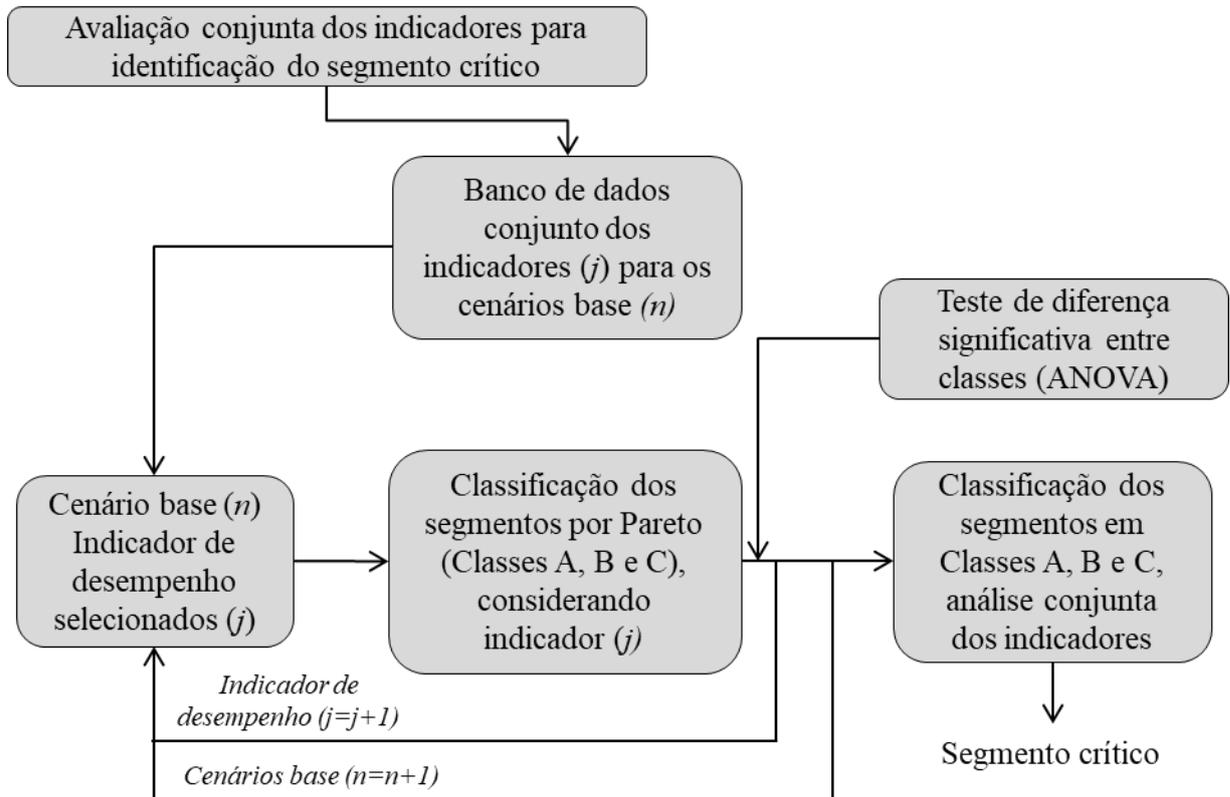
Com base no coeficiente de correlação de Pearson pode-se identificar os indicadores de desempenho que apresentam impactos decorrentes da obstrução dos segmentos da rede correlacionados. Com isso, entende-se que os indicadores que apresentam coeficiente de correlação igual a 1,0 medem o mesmo impacto na rede viária. Decorrente desse entendimento verifica-se que o emprego de indicadores correlacionados na análise conjunta é prejudicial, porque ao se utilizar indicadores com a mesma variação ocorre a avaliação do mesmo impacto mais de uma vez. Por isso, ao verificar que dois ou mais indicadores de desempenho são correlacionados, seleciona-se somente um desses indicadores para ser empregado na análise conjunta de indicadores de desempenho para identificação do segmento crítico.

### **3.1.5 ETAPA 5 – ANÁLISE CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO SELECIONADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO**

Esta etapa consiste na identificação do segmento crítico da rede a partir da análise conjunta dos indicadores de desempenho selecionados na etapa 4. Ao contrário dos métodos encontrados na literatura que utilizam somente uma condição de demanda e somente um indicador de desempenho, o método utilizado pode avaliar condições distintas de demanda e diversos indicadores de desempenho simultaneamente na identificação do segmento crítico. Para avaliar diversos aspectos de forma conjunta, a análise conjunta admite igual importância para os indicadores de desempenho utilizados em cada cenário.

A avaliação conjunta dos indicadores de desempenho para a identificação do segmento crítico corresponde a etapa 5 do método proposto. Esta etapa está dividida em cinco fases distintas. A Figura 7 apresenta o fluxograma desta análise.

Figura 7 – Fluxograma de fases da Etapa 5



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira fase desta análise inicia a partir do banco de dados consolidado no término da etapa 3. O banco de dados é formado pelos valores de cada indicador de desempenho ( $j$ ) observado a partir da obstrução de cada segmento ( $i$ ) da rede para cada cenário base ( $n$ ). São utilizados na fase seguinte somente os indicadores de desempenho selecionados na etapa 4, excluindo do banco de dados um ou mais indicadores correlacionados.

Na fase de classificação dos segmentos selecionados por Pareto os impactos decorrentes da obstrução de cada segmento da rede viária, registrados por cada um dos indicadores de desempenho selecionados ( $j$ ) em cada cenário base ( $n$ ) são classificados nas Classes A, B ou C, respectivamente: alto, médio e baixo impacto. Nesta classificação, os segmentos que quando obstruídos ocasionam um maior impacto na rede viária correspondem a Classe A, até um limite de 20% da extensão total da rede. A Classe C contém os segmentos que quando obstruídos provocam um menor impacto na rede viária para até 50% da extensão total da rede. A Classe B corresponde aos 30% da extensão da rede com valores de impacto na rede decorrente da obstrução de segmentos intermediários entre as Classes A e C.

Na fase seguinte, é realizado o teste estatístico ANOVA para cada indicador de desempenho selecionado em cada cenário, com propósito de verificar se há diferença significativa entre os valores de cada classe. A Classificação dos segmentos por Pareto é realizada para cada indicador de desempenho ( $j$ ) de cada cenário base ( $n$ ). Caso a classificação de algum indicador de desempenho não apresente diferença significativa, este indicador será excluído da análise conjunta.

Por fim, na fase de classificação dos segmentos em Classe A, B e C, análise conjunta dos indicadores, considera-se os indicadores de desempenho selecionados na etapa 4. Após verificar que há diferença significativa entre as classes A, B e C da classificação por Pareto e confirmando a significância de todos os indicadores de desempenho selecionados, é realizada a classificação conjunta.

Esta fase permite identificar a classe dos segmentos considerando todos os indicadores de desempenho em todos os cenários simultaneamente, sem considerar a importância de cada indicador de desempenho. Ou seja, todos os indicadores selecionados apresentam o mesmo peso. Esta classificação objetiva encontrar um resultado que seja independente da intensidade e do sentido da demanda, e sem se limitar a somente uma métrica de avaliação de desempenho da rede. Para realizar esta etapa, considerou-se a classificação individual por Pareto de cada indicador.

A classificação conjunta considera a frequência de ocorrência de cada classificação individual para cada segmento. Dessa forma, atribui-se ao segmento a classe que for a moda (maior frequência) observada nas classificações individuais. A Figura 8, a partir de um exemplo fictício, ilustra como a classificação é realizada.

Os resultados desta etapa permite a apresentação de um mapa temático que permite a visualização da classificação de todos os segmentos da rede viária nas Classes A, B e C. Além disso, os resultados desta etapa possibilitam a identificação do segmento mais importante da rede, ou seja, do segmento crítico. O segmento de maior frequência na Classe A é definido como sendo o segmento crítico.

Figura 8 – Exemplo da classificação por Pareto individual para cada indicador de desempenho e considerando o conjunto de indicadores para a classificação conjunta

		Cenário I						
		Indicadores						
		1	2	3	4	5	6	
Obstrução	1	A	B	A	A	A	C	A
	2	B	C	B	B	C	A	B
	3	C	A	C	C	C	A	C
	4	A	B	A	B	A	A	A
	...							
	L	C	A	A	B	C	C	C

Classificação por Pareto de cada segmento considerando um único indicador de desempenho ( $j$ )

Classificação por Pareto conjunta dos indicadores de desempenho ( $j$ ) para a obstrução de cada segmento ( $l$ )

Classificação por Pareto de cada indicadores de desempenho para a obstrução do segmento ( $l$ )

(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.1.6 ETAPA 6 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO: ALOCAÇÃO ESTÁTICA E ALOCAÇÃO DINÂMICA

Esta etapa objetiva avaliar a obstrução do segmento crítico da rede, a Figura 9 apresenta o fluxograma das fases dessa etapa. Esta etapa é realizada com o auxílio do *software* de planejamento VISUM, que permite o emprego dos processos de alocação estático e dinâmico.

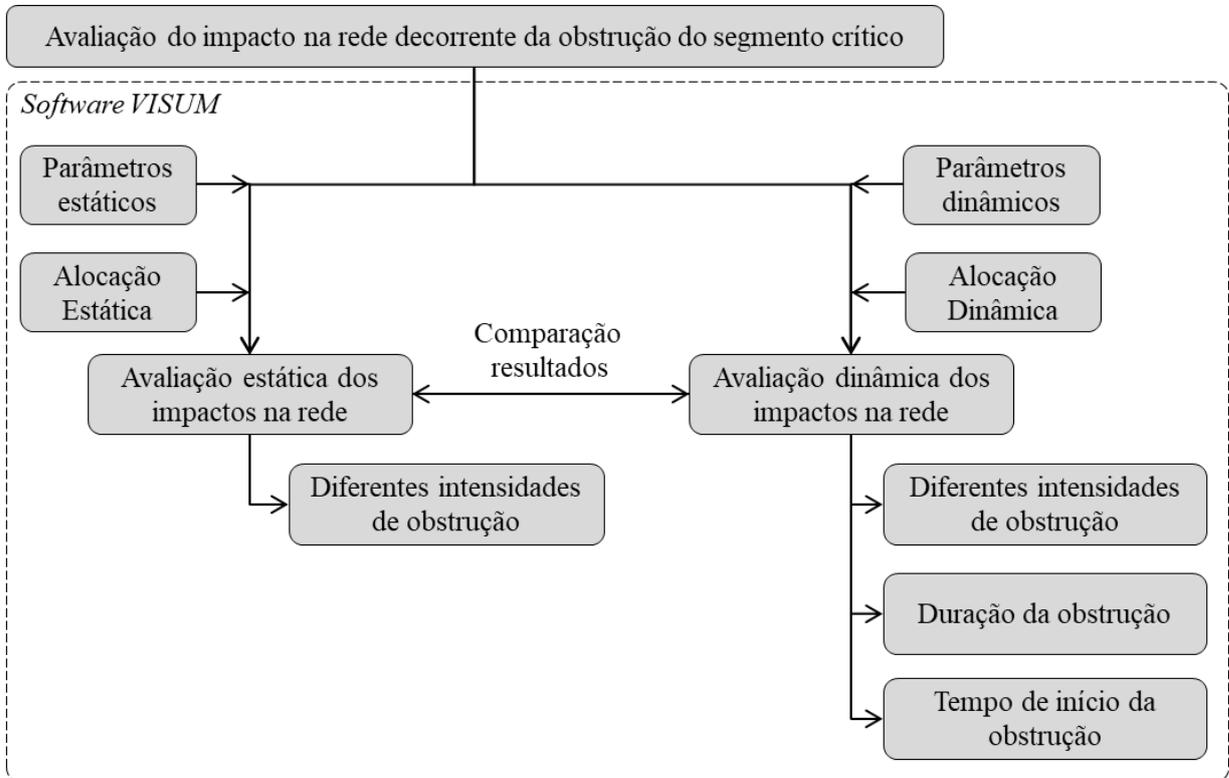
A avaliação estática dos impactos na rede decorre do cenário estático, para isso são utilizados parâmetros estáticos no processo de alocação. Esta análise permite avaliar diferentes intensidades de obstrução no segmento crítico, considerando principalmente os indicadores de desempenho selecionados na etapa 4 do método empregado neste trabalho.

A avaliação dinâmica dos impactos decorre do cenário dinâmico, este tipo de cenário utiliza parâmetros dinâmicos de caracterização da demanda e no processo de alocação. Tais parâmetros são a distribuição horária da demanda, a definição do horário de início da obstrução e a duração da obstrução. Esta análise permite observar o valor dos indicadores de desempenho para diferentes intensidades de obstrução no segmento crítico, o impacto da duração da interferência, e a influência do horário de início da obstrução.

Apesar das limitações, decorrente das diferenças de demanda aplicada nos dois processos de alocação, é realizada a comparação entre os resultados encontrados decorrente da obstrução do segmento crítico decorrente de cada um dos processos de alocação. Esta fase objetiva enfatizar as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos de alocação

empregados junto aos indicadores de desempenho na avaliação de impactos na rede viária decorrente da obstrução do segmento crítico da rede.

Figura 9 – Fluxograma de fases da Etapa 6



(fonte: elaborado pelo autor)

## **4 AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS DA REDE VIÁRIA DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE INDICADORES DE DESEMPENHO**

A avaliação da importância dos segmentos da rede viária a partir dos indicadores de desempenho foi aplicada a rede da região do Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul. Para realizar as etapas desta análise utilizou-se o *software* de planejamento VISUM. Este Capítulo segue a estruturação proposta no método apresentado no Capítulo 3 e está dividido em seis seções.

### **4.1 – OBTENÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE SELECIONADOS (ETAPA 1)**

Os indicadores de desempenho de rede avaliam o funcionamento da rede viária de forma abrangente e agregada. A variabilidade do tipo de indicadores é extensa e cada indicador busca avaliar uma característica diferente da rede. Para garantir que características de intensidade do impacto e abrangência do impacto decorrente da obstrução de um segmento da rede fossem avaliadas por no mínimo dois indicadores, optou-se por utilizar todos os indicadores propostos pelo método utilizado no trabalho. Os indicadores de desempenho de rede utilizados na análise seguiram a formulação apresentada na seção 3.1.1 do Capítulo anterior. Os indicadores empregados foram:

- a) Total de tempo despendido na rede viária (TTD);
- b) Total da diferença do tempo despendido com o cenário base (DTD);
- c) Total de segmentos com incremento de volume (TIV);
- d) Comprimento total da rede afetada (CRA);
- e) Distância média de viagem (DMV);
- f) Tempo médio de viagem (TMV);
- g) Total de rotas na rede (TRR).

O cálculo dos indicadores de desempenho é um processo complexo que utiliza os resultados decorrentes do processo de alocação para representar o desempenho da rede viária. Para isso, são utilizadas informações associadas tanto aos segmentos viários, tais como volume, tempo de viagem e extensão do segmento, como informações relacionadas aos pares O/D, tais como distância média de viagem, tempo médio de viagem e total de rotas entre pares O/D.

O processo de alocação estática UE aloca uma determinada demanda na rede viária, atendendo aos princípios de Wardrop. A demanda viária, no caso de estudos de planejamento de transportes, é expressa por uma matriz O/D, que contém as viagens realizadas entre cada uma das regiões de Origem e Destino da área de estudo. O resultado da alocação da demanda na rede viária é a definição das rotas utilizadas entre cada par O/D e do volume de veículos que utiliza cada rota. Este resultado permite a quantificação do fluxo de veículos que utiliza cada segmento da rede viária. Mais detalhadamente, além do volume de veículos em cada segmento pode-se atribuir outras informações a cada segmento da rede viária, tais como o tempo de viagem para percorrer o segmento, a velocidade média e a saturação do segmento. Além disso, o processo de alocação resulta em informações associadas aos pares O/D, tais informações são dispostas em matrizes de indicadores que apresentam as mesmas dimensões da matriz O/D. As matrizes de indicadores apresentam informações tais como o tempo de viagem entre pares O/D e a distância de viagem entre pares O/D. Muitas vezes o detalhamento das informações decorrentes do processo de alocação depende do *software* empregado. Neste trabalho, utilizou-se o *software* de planejamento VISUM.

As informações resultantes do processo de alocação são utilizadas para a obtenção dos indicadores de desempenho de rede. indicadores de desempenho utilizados no trabalho tais como TTD, DTD, TIV e CRA utilizam informações decorrentes dos segmentos da rede. Os indicadores de desempenho DMV, TMV e TRR utilizam informações oriundas dos pares O/D.

Alguns indicadores de desempenho mais complexos realizam a comparação entre cenários. No caso deste trabalho, os indicadores de desempenho DTD, TIV e CRA necessitam de um cenário alternativo para serem calculados. A seguir, serão apresentados como o indicador TDD (Figura 10), decorrente de informações dos segmentos da rede, e o indicador

DMV (Figura 11), decorrente de uma matriz de indicadores, são obtidos. A obtenção dos indicadores TMV e TRR é análoga à obtenção do indicador DMV.

As informações relacionadas aos segmentos da rede viária são dispostas em formato de lista, dessa maneira, cada linha da lista apresenta informações referentes à um determinado segmento da rede viária  $l$  pertencente ao conjunto  $L$  de todos os segmentos da rede. O cálculo dos indicadores de desempenho que utilizam informações relacionadas aos segmentos da rede, como por exemplo, o TDD, seguem a formulação apresentada na Figura 10.

Observa-se na Figura 10 que, a partir do resultado do processo de alocação, as informações de cada segmento  $l$  da rede viária são utilizadas para o cálculo do indicador TDD. A obtenção deste indicador de desempenho segue a equações 5, apresentada na seção 3.1.1 do capítulo anterior. Detalhadamente, calcula-se o total de tempo despendido pelos veículos em cada segmento  $l$  a partir da multiplicação do volume de veículos que utilizam o segmento  $l$  e o tempo de viagem necessário para percorrer o mesmo segmento  $l$  em determinada condição de tráfego. Em seguida, soma-se o total de tempo despendido em todos os segmentos da rede viária, determinando assim o valor do indicador de desempenho TDD.

Figura 10 – Detalhamento do resultado do processo de alocação para o cálculo dos indicadores de desempenho relacionados com os segmentos viários da rede

Decorrente do processo de  
alocação estática, dados  
extraídos do *software* VISUM

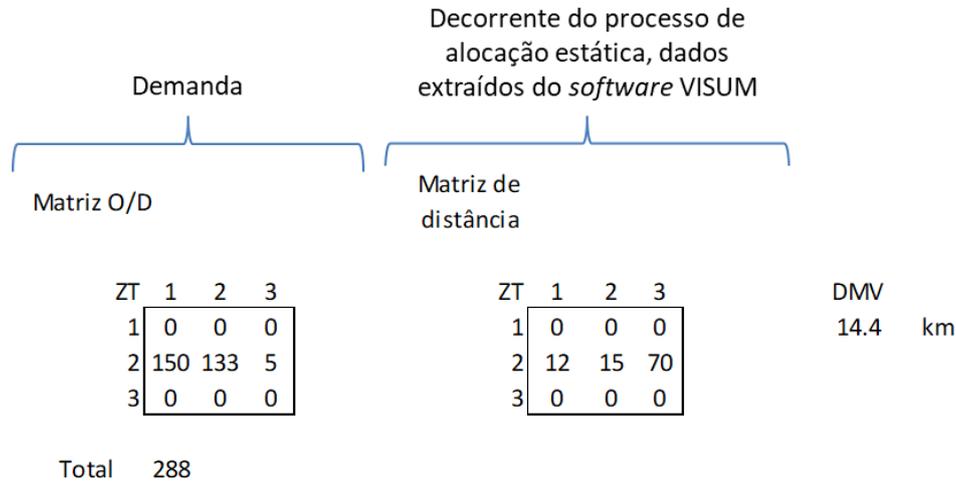
Segmento	Volume	Tempo de viagem (s)	TDD (h)
1	62	300	5.2
2	333	653	60.4
3	231	423	27.1
4	152	127	5.4
...	...	...	...
L			
		$\Sigma$	98.1 h

(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 11 apresenta o detalhamento do cálculo do indicador de desempenho DMV, que é obtido com informações referentes aos pares O/D. A obtenção deste tipo de indicador depende das matrizes de indicadores de desempenho resultantes do processo de alocação. Para o indicador DMV a matriz de indicador utilizada é a matriz de distância de viagens, esta

matriz apresenta a distância média de viagem considerando todas as rotas para cada pares O/D. O cálculo do indicador de desempenho DMV segue o apresentado na Equações 9, da seção 3.1.1 do capítulo anterior.

Figura 11 - Detalhamento do resultado do processo de alocação para o cálculo dos indicadores de desempenho relacionados com os pares O/D



(fonte: elaborado pelo autor)

Detalhadamente, na Figura 11 o cálculo do indicador de desempenho DMV é realizado a partir da ponderação da distância de viagem de cada par O/D da matriz de distâncias de viagens pelo volume de viagem de cada par O/D da matriz O/D referente à demanda. Esta formulação é análoga para os indicadores TMV e TRR, que utilizam respectivamente a matriz de tempo de viagem entre pares O/D e a matriz de total de rotas entre pares O/D.

O indicador de desempenho DTD é obtido de forma semelhante ao TTD, o DTD utiliza informações do total de tempo despendido no cenário base e no cenário com a obstrução para realizar a diferença da equação 6, apresentada na seção 3.1.1 do capítulo anterior. O indicador TIV é um contador que registra se a diferença entre o volume de tráfego alocado em cada segmento  $l$  do cenário com a obstrução é maior que o volume alocado no mesmo segmento  $l$  no cenário base (equação 7). Análogo ao TIV, o indicador CRA realiza o mesmo processo lógico, porém computa o somatório da extensão de cada segmento que apresentam diferença de volume positiva entre o cenário com obstrução e o cenário base.

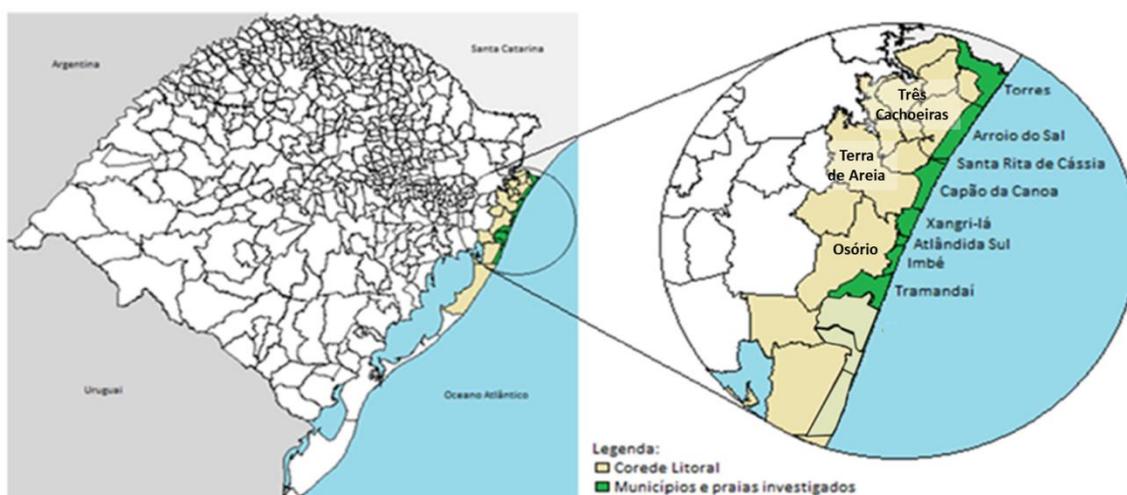
A Tabela 8, ao final da seção 4.2 do próximo capítulo, apresenta valores encontrados para os indicadores de desempenho TTD, DMV, TMV e TRR, ou seja, para os indicadores

que não necessitam de cenários alternativos na sua formulação. Estes indicadores apresentam a ordem de grandeza e variação dos valores para as diferentes demandas nos cenários modelados.

#### 4.2 -DELIMITAÇÃO E CARCTERIZAÇÃO E DA ÁREA DE ESTUDO, CODIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA E MODELAGEM DA DEMANDA (ETAPA 2)

O método proposto no Capítulo 3 foi aplicado na Região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. A delimitação da área de estudo foi definida através da rede viária da região. Ela atende os municípios de Torres, Arroio do Sal, Santa Rita de Cássia, Capão da Canoa, Xangri-Lá, Atlântida, Imbé e Tramandaí, que formam o litoral norte do Rio Grande do Sul, o os municípios de Osório, Terra de Areia e Três Cachoeirinhas, que apesar de não serem municípios do litoral, são atendidos pela rede viária da região. A Figura 12 apresenta os municípios litorâneos da área de estudo, além destes.

Figura 12 - Delimitação do Litoral Norte



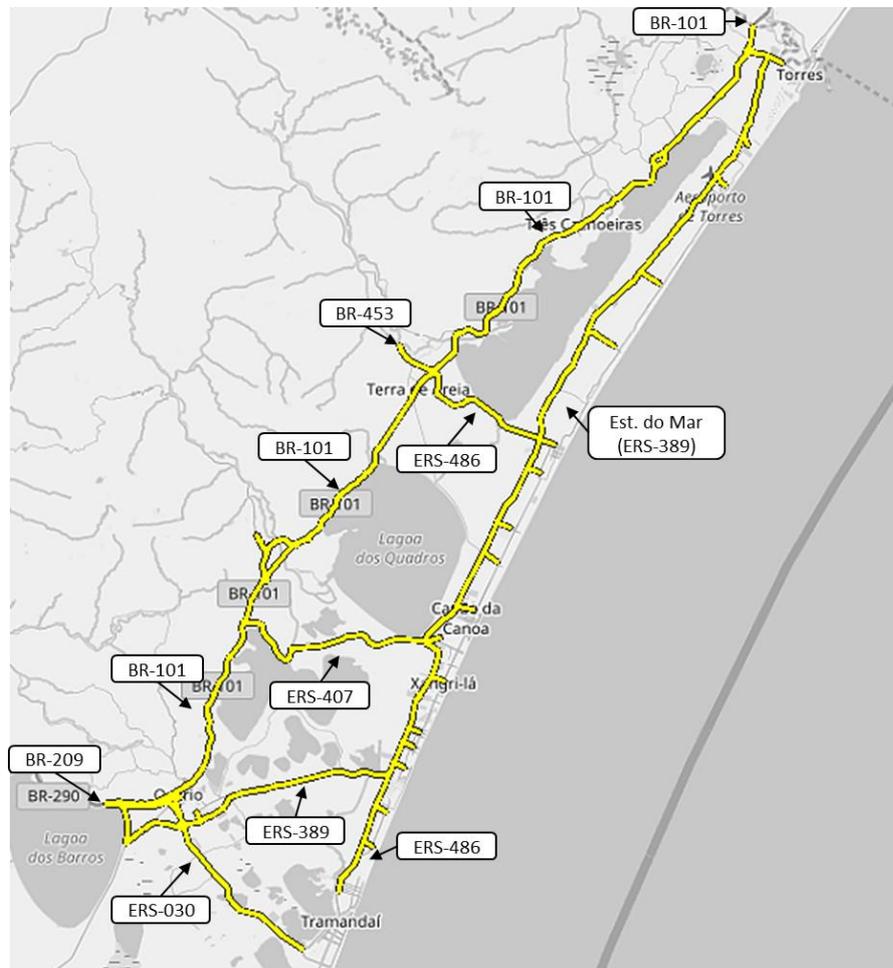
(fonte: adaptado de FEE, 2016)

O Litoral Norte do Rio Grande do Sul apresenta uma população de 207.581 habitantes que cresce 141,2% nos meses de janeiro e fevereiro (FEE, 2016), além de ser o principal destino dos veranistas do estado Rio Grande do Sul apresenta um trecho importante da infraestrutura do estado, o corredor viário da BR-101, que contribui para o escoamento da produção até o Porto de Rio Grande.

#### 4.2.1 CODIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA

A rede viária da área de estudo é composta pelas rodovias estaduais e federais que permitem acesso à região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. As rodovias federais são as BR-101, BR-290 e BR-453, as rodovias estaduais são as ERS-030, ERS-389, ERS-407, ERS-486 e ERS-786. A codificação da rede foi realizada utilizando o *software* de planejamento de transportes VISUM. A Figura 13 ilustra a malha viária codificada dentro da área de estudo.

Figura 13 – Rede viária da área de estudo codificada e rodovias de acesso

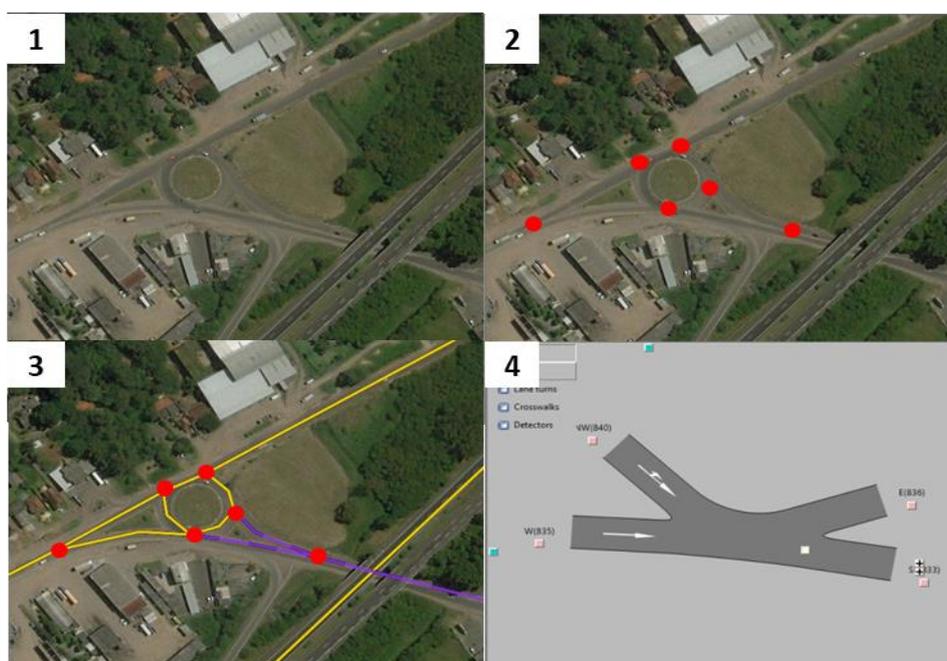


(fonte: adaptado pelo autor do *software* VISUM, 2015)

A codificação dos segmentos viários teve como base fotografias aéreas disponibilizadas pelo sistema Bing de mapas online. A partir das imagens aéreas foi possível identificar o tipo de interseção entre cada segmento da rede e, com isso, definir os movimentos de tráfego permitidos em cada interseção. A Figura 14 ilustra esse processo. A Figura 14.1 apresenta as informações do sistema viário através das imagens de satélite disponíveis nos mapas da Bing,

nessa etapa, é possível identificar a geometria dos segmentos viários e a caracterização do entorno da via. Em seguida (Figura 14.2), são identificados os pontos (nós) onde há mudança de sentido, mudança de velocidade, mudança no número de faixas ou união ou bifurcação de segmentos. A partir dos nós são adicionados ao sistema os segmentos viários propriamente ditos que, obrigatoriamente, interligam dois nós (Figura 14.3). Por último (Figura 14.4), cada nó é codificado para conter exatamente os movimentos possíveis daquele ponto da rodovia, tais movimentos garantem que os veículos realizam manobras que condizem com o que é permitido na prática.

Figura 14 – Exemplo de etapas de codificação da rede viária



(fonte: adaptado pelo autor do *software* VISUM)

Os segmentos carregam informações da respectiva rodovia que pertencem a área de estudo. Tais informações são o número de faixas, a velocidade diretriz do segmento e a capacidade viária. O número de faixa de cada segmento foi observado através das imagens de satélite. O limite de velocidade de cada segmento foi observado através do *Google Street Views*, que possibilitou, além disso, a identificação de pontos de mudança de velocidade em segmentos urbanos ou segmentos próximos as interseções.

A capacidade viária dos segmentos foi definida através do HCM (2010) com base na relação de velocidade e fluxo veicular para diferentes níveis de serviço em trechos básicos de

autoestradas (*HCM, seção 23-4, página 870*). As capacidades para cada rodovia, velocidade e número de faixa são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Detalhamento das características dos trechos rodoviários da área de estudo

Rodovia	Nº Faixas	Velocidade (km/h)	Capacidade
BR-290	4	110	4500
BR-101	2	110	3600
BR-101	2	110	3600
BR-101	2	110	3600
ERS-389	1	80	1200
ERS-389	1	80	1200
ERS-389	1	80	1200
ERS-786	1	80	1200
ERS-486	1	80	1200
ERS-407	1	80	1200
ERS-389	1	80	1200
ERS-030	2	80	1800

(fonte: elaborado pelo autor)

A rede codificada é composta por 494 nós e 771 segmentos, com extensão total de 337,83 quilômetros. A rede apresenta 13 interseções rodoviárias de grande porte que permitem a passagem de uma rodovia para outra. Além disso, a rede apresenta 20 pontos de retorno e 18 rotatórias de acesso às praias do litoral. Identificaram-se também dois trechos (conjunto de segmentos) que apresenta vias laterais, ambos localizados na BR-101, próximo ao município de Osório e próximo ao município de Terra de Areia.

#### 4.2.2 DELINEAMENTO DAS ZONAS DE DESTINO

As zonas de tráfego (ZTs) foram definidas considerando as principais praias da região e os pontos de acesso área de estudo. As rodovias de acesso à área de estudo são: (i) BR-101 ao Norte, com sentido Sul; (ii) Rota do Sol (BR-453), com sentido Sudeste e (iii) Freeway (BR-290) e ERS-030, sentido Leste. Estas zonas foram denominadas Zonas de Origem de Tráfego. Na Figura 13 são ilustrados os pontos de localização das ZTs de acesso à área de estudo.

As ZTs definidas a partir das principais praias tiveram como base a delimitação dos municípios da área de estudo. A região apresenta doze principais praias pertencentes aos oito municípios litorâneos. O município de Capão da Canoa foi segregado em quatro praias, sendo

elas Capão da Canoa, Capão Novo, Arroio Teixeira e Curumim. O município de Torres passou a ser duas ZTs, a praia de Torres e a praia de Paraíso. O município de Arroio do Sal passou a ser três ZTs, Arroio do Sal, Areias Brancas e Rondinha. O município de Imbé foi passado a ser duas ZTs, a zona central foi unida com o município de Tramandaí e o bairro Albatroz, por ser mais afastado, passou a ser uma ZT. A segregação dos municípios em praias objetivou melhor detalhar os destinos das viagens. A Figura 15 ilustra as ZTs referentes às praias da área de estudo, estas ZTs foram denominadas Zonas de Destino de Tráfego.

Figura 15 - Zonas de Destino de Tráfego da área de estudo



(fonte: extraído do *GoogleMaps* e adaptado pelo autor)

A população de ZTs foi definida como parâmetro utilizado para a atração de viagens (seção 4.5.1). Contudo, a distribuição da população nas praias de cada município não é homogênea. A distribuição de cada população municipal nas praias de cada município foi realizada a partir de dados do Tribunal Regional Eleitoral do Rio Grande do Sul (TRE-RS). A distribuição da população das praias foi proporcional à distribuição do número de votos

registrados nas seções eleitorais pertencentes a cada praia. Assim, a População Estimada de cada praia ( $Pop_{est,p}$ ) é definida pela função:

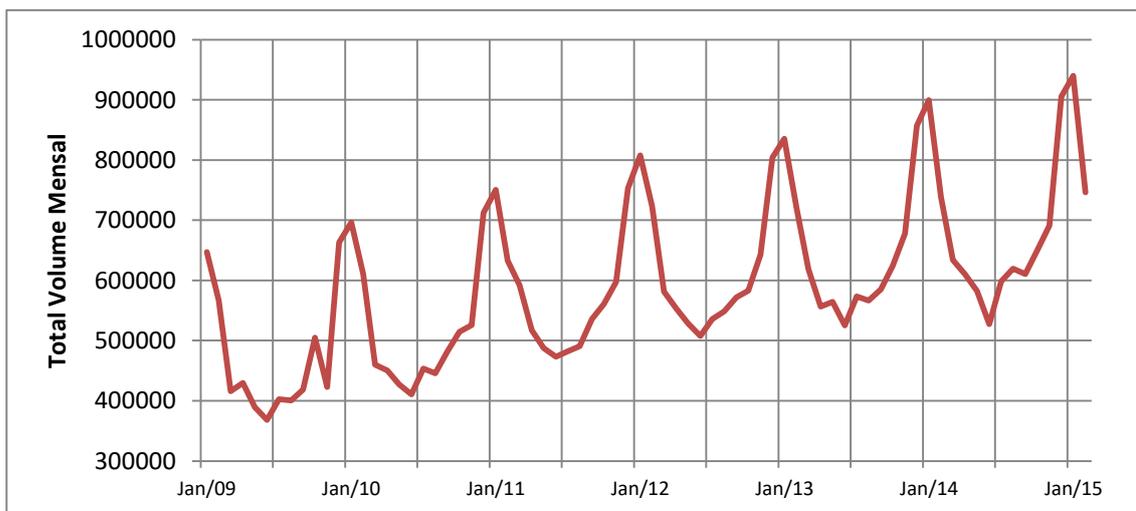
$$Pop_{est,p} = \frac{\sum_{s=1}^s VS_{s,p} Pop_{mun,m}}{VS_m} \quad (13)$$

Sendo  $Pop_{est,p}$  a população estimada de uma praia  $p$  pertencente a um município  $m$ ;  $Pop_{mun,m}$  é a população total do município  $m$  que contém a praia  $p$ ;  $VS_p$  representam o total de votos em cada seção eleitorais pertencentes a praia  $p$ ; e  $VS_m$  corresponde ao total de votos registrados em todas as seções do município  $m$ . Com base neste modelo foi possível estimar com um certo grau de veracidade a população em cada praia pertencente à cada município.

#### 4.2.3 DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE ANÁLISE

A definição do período de análise teve como base os dados de volume de tráfego nas de rodovias da área de estudo. A Figura 16 representa a serie histórica anual de volumes na BR-290. Percebe-se que há uma diferença nítida da demanda ao longo de cada ano. Essa diferença de demanda tem sua origem na natureza da área de estudo, que por se tratar de uma região litorânea e de destino dos veranistas gaúchos apresenta esse comportamento sazonal. Os meses escolhidos para a caracterização da demanda foram o mês de janeiro (cenário I, de alta demanda) e julho (cenário II, de baixa demanda).

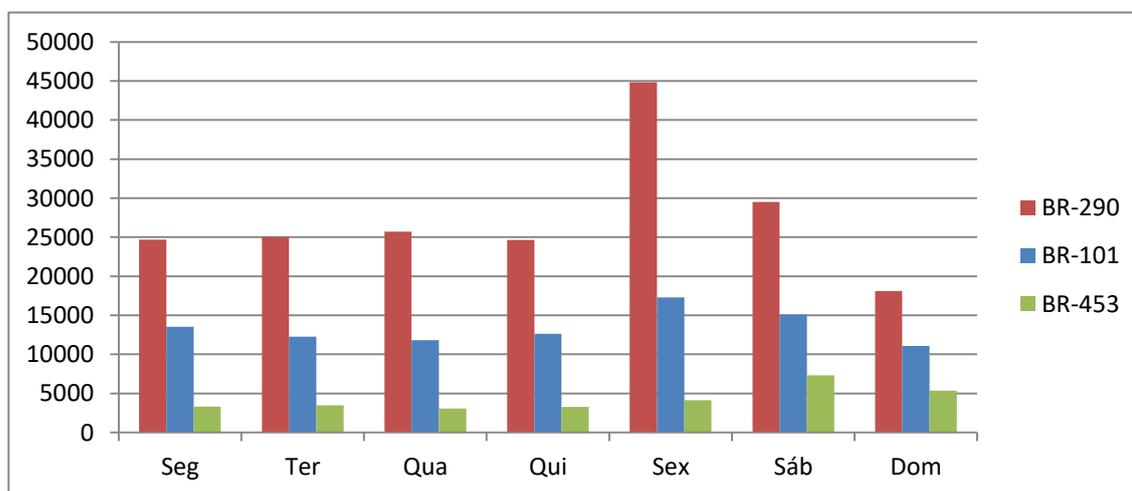
Figura 16 - Série histórica de volume mensal total na BR-290 no sentido do Litoral Norte



(fonte: dados fornecidos por TRIUNFO CONCEPA)

A distribuição de volumes de tráfego com sentido para a região do Litoral Norte, durante os dias da semana foi utilizada para identificar o dia tipo de maior intensidade de tráfego. Observa-se na Figura 17 para os volumes médio diário por tipo de dia da semana (VMDds) para o mês de janeiro de 2016 da BR-101 (sentido sul), da BR-290 (sentido litoral) e da BR-453 (sentido litoral) que os finais de semana são os dias de maior intensidade de tráfego. Entre os dias do final de semana, destaca-se a sexta-feira como sendo o dia de maior movimento para a BR-290 e BR-101. Com base nesses dados, definiu-se a sexta-feira como dia tipo para a construção dos cenários I e II, respectivamente, de alta e baixa demanda.

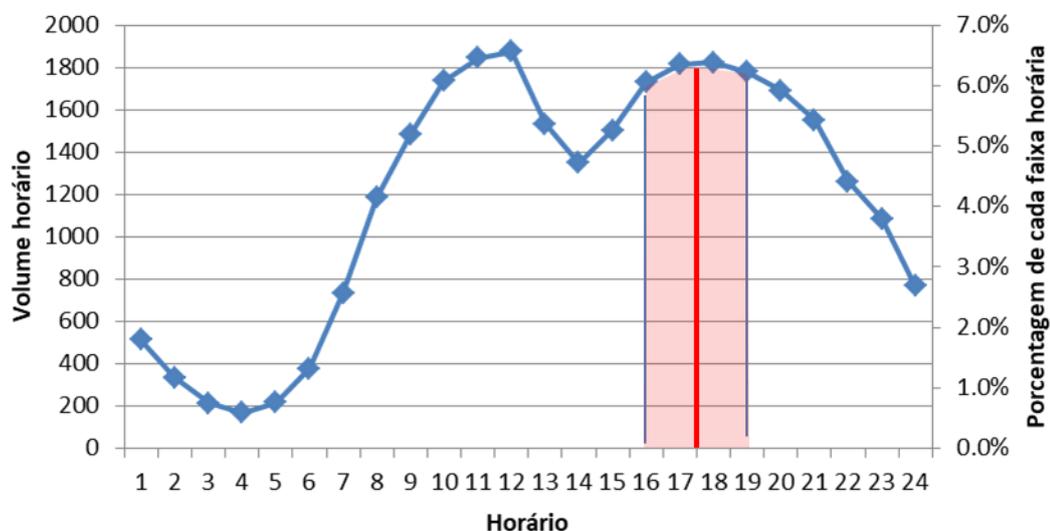
Figura 17 - Distribuição do volume médio diário por tipo de dia da semana (VMDds) para o mês de Janeiro nos acessos à área de estudo



(fonte: dados fornecidos por TRIUNFO CONCEPA, DNIT, DAER)

A definição do horário de pico foi baseada da distribuição horária de tráfego da BR-290, considerando as sextas-feiras do mês de janeiro. O horário de pico foi definido a partir da hora central do intervalo de três horas consecutivas que apresentasse o maior volume acumulado. O horário de maior intensidade de tráfego corresponde ao horário de pico vespertino da BR-290, ou seja, entre 17:00 e 18:00 horas (Figura 18).

Figura 18 – Distribuição horária de tráfego das sextas-feiras de janeiro e horário de pico da BR-290 considerando intervalo de três horas



(fonte: dados fornecidos pela TRIUNFO CONCEPA)

#### 4.2.4 GERAÇÃO DE VIAGENS

Nesta etapa consideraram-se somente viagens que ao entrarem na área de estudo se direcionam à região litorânea, desconsiderando assim as viagens entre as ZTs litorâneas. Os principais acessos à região ocorrem por três rodovias, que representam grande parte do fluxo diário que se destina a região do litoral norte.

As zonas de tráfego que permitem a entrada de veículos na área de estudo são três (Figura 13):

- i. A ZT que representa o tráfego que se origina ao norte da área de estudo, e acessa a região pela BR-101, próximo ao município de Torres;
- ii. A ZT que representa o volume de tráfego que acessa a área de estudo pela Rota do Sol (BR-453);
- iii. O acesso à área de estudo pela ZT pela BR-290 (Freeway) e ERS-030.

A obtenção dos VDM observado a partir dos volumes das sextas-feiras diário das sextas-feiras de janeiro ocorreu de forma distinta para cada Zona de Origem de Tráfego. Os volumes da BR-290 foram disponibilizados pela TRIUNFO CONCEPA, empresa que tem a

concessão do trecho e é responsável pelas praças de pedágio que realizou as contagens de tráfego. O volume de tráfego da hora de pico foi calculado a partir da porcentagem diária do VDM correspondente ao tráfego entre 17:00 e 18:00, conforme indicado na Figura 18.

O VDM de tráfego referente à BR-101 foi obtido através do Plano Nacional de Contagem de Trafego (PNCT) desenvolvido pelo DNIT. O PNCT é uma plataforma online que disponibiliza dados de volumes diários médios das rodovias federais obtidos através de pontos de fiscalização eletrônicos de velocidade. Neste caso, adotou-se a distribuição horária da BR-290 para esta rodovia.

Por fim, foram utilizados dados de tráfego disponibilizados pelo DAER para estimativa do VDM na BR-453. Através de um ponto de fiscalização eletrônico de velocidade foi possível identificar o volume de tráfego horário no sentido do litoral norte para o horário de pico.

A Tabela 2 apresenta os volumes horários obtidos em cada um dos pontos de entrada na área de estudo que serão utilizados na construção da demanda dos cenários I e II.

Tabela 2 – Total de viagens nos pontos de acesso à área de estudo

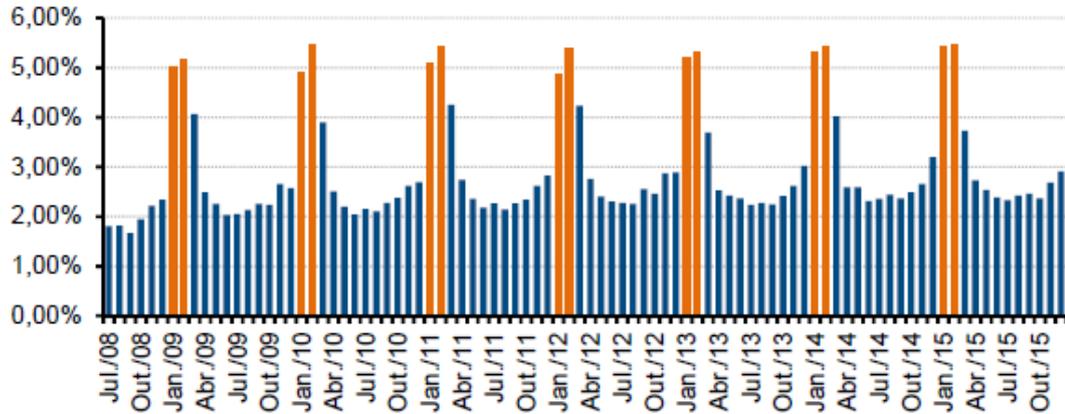
<b>Cenário</b>	<b>Demanda</b>	<b>BR-290</b>	<b>BR-101</b>	<b>BR-453</b>	<b>Total</b>
Estático	Alta	3481	1208	263	4952
	Baixa	726	834	182	1742

(fonte: dados fornecidos pela TRIUNFO CONCEPA, DNIT e DAER)

#### 4.2.5 DISTRIBUIÇÃO DE VIAGENS

A distribuição de viagens teve como base o estudo da FEE (FEE, 2016). Este estudo utilizou o incremento de consumo de água no litoral norte para o cálculo do incremento sazonal da população de veranistas para a região litorânea. A Figura 19 apresenta o incremento sazonal de consumo de água na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

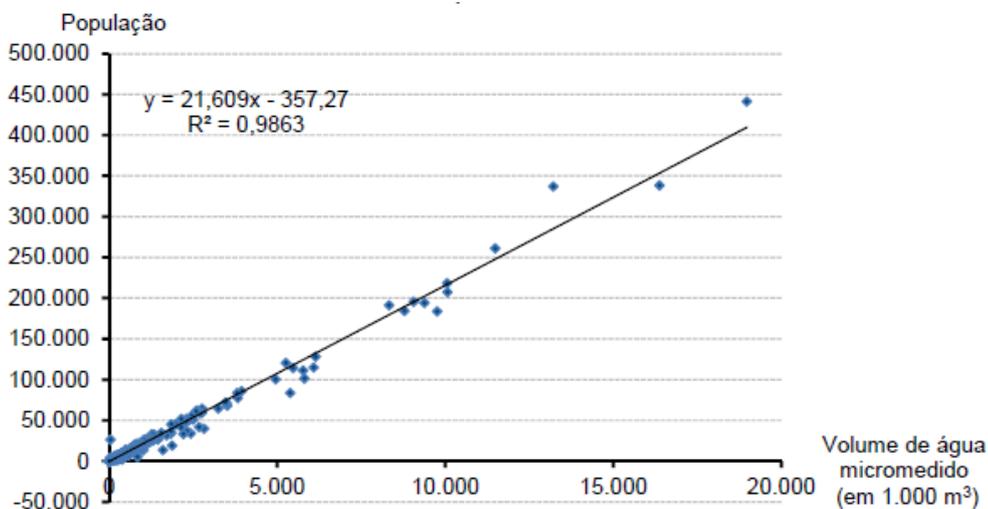
Figura 19 – Pico de consumo de água em municípios do litoral norte



(fonte: FEE, 2016)

A relação entre consumo de água no município e população do município observada na Figura 20. Constata-se um coeficiente de determinação de 0,98 para o modelo proposto.

Figura 20 – Volumes micromedidos de água nos municípios e sua relação com a população



(fonte: FEE, 2016)

A partir do incremento do consumo de água de cada praia e do modelo proposto, foi medido o crescimento populacional de cada município da região estudada, denominado População Flutuante. A distribuição de viagens segue a distribuição da População Total Flutuante da área de estudo que se dirige para cada praia. As viagens atraídas para cada ZT são definidas pela equação:

$$VA_i = \frac{Pop_{fi}}{Pop_{f,TOTAL}} \quad (14)$$

Sendo  $VA_i$  a porcentagem de viagens atraídas para a praia  $i$ ;  $Pop_{fi}$  a População Flutuante da praia  $i$  e  $Pop_{f,TOTAL}$  a População Flutuante total observada para o mês de janeiro. A Tabela 3 apresenta a parcela de viagens que se destinam para cada uma das praias da área de estudo.

Tabela 3 – Parcela de viagens atraídas por cada zona de tráfego da área de estudo

<b>Praia Destino</b>	<b>Parcela de viagens atraída <math>VA_i</math></b>
Albatroz	5.68%
Areias Brancas	1.91%
Arroio do Sal	4.47%
Arroio Teixeira	0.87%
Atlântida	4.61%
Capão da Canoa	22.93%
Capão Novo	2.05%
Curumim	0.77%
Paraíso	0.32%
Rondinha	0.95%
Torres	15.77%
Tramandaí e Imbé	33.02%
Xangri-Lá	6.65%

(fonte: adaptado de FEE,2016)

A matriz de origem e destino (matriz O/D) foi construída a partir da distribuição das viagens geradas. Assim, o tráfego de entrada na área de estudo pelos três pontos de acesso (Zonas de Origem de Tráfego) foi distribuído para as principais praias (Zonas de Destino de Tráfego) da área de estudo a partir do vetor de viagens atraídas. O cenário I foi oriundo da distribuição da alta demanda e o cenário II originou-se da distribuição da baixa demanda (Tabela 2). O trabalho buscou a construção de cenários onde as viagens, ao entrarem na área de estudo, seriam distribuídas para as praias no da região litorânea, nesse sentido, optou-se por utilizar o mesmo vetor de distribuição de viagens (Tabela 3) para os cenários I e II.

Foram construídos mais dois cenários, os cenários III e IV, definidos a partir de matrizes inversas a dos cenários I e II respectivamente, visando explorar as viagens de retorno

do Litoral Norte. Os cenários III e IV, foram construídos para melhor explorar o comportamento dos indicadores de desempenho frente à mudança de sentido da demanda, estes cenários por sua vez, não foram calibrados.

Tabela 4 – Características da demanda modelada e sentidos das viagens para cada cenário construído

	Cenários			
	I	II	III	IV
<b>Demanda</b>	Alta	Baixa	Alta	Baixa
<b>Sentido</b>	Ida	Ida	Retorno	Retorno

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.6 ALOCAÇÃO DE TRÁFEGO

O processo de alocação utilizado para a elaboração de cada cenários base sujeitos a quatro padrões de demanda distintas foi o Equilíbrio do Usuário (UE, do inglês *User Equilibrium*). Aplicou-se o método UE por sua capacidade de representar o primeiro princípio de Wardrop.

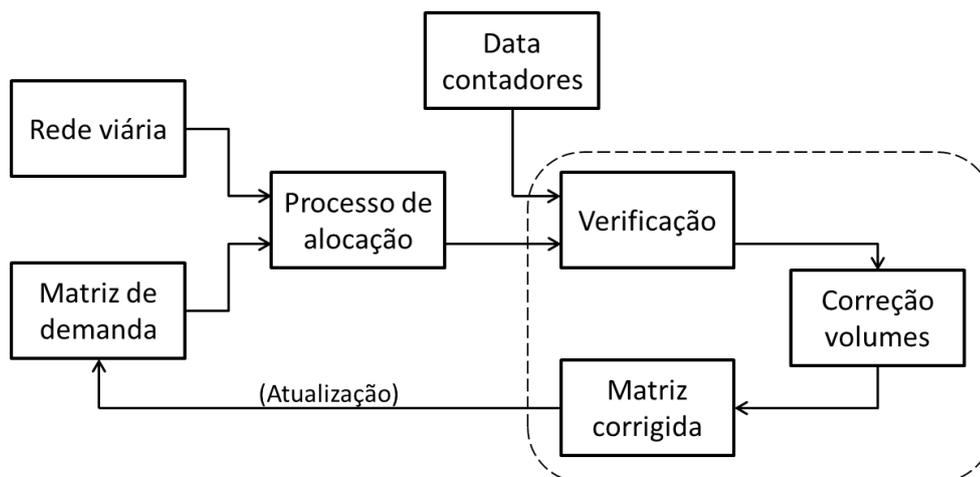
A VDF empregada no processo de alocação foi a função Cônica Marginal (Equação 3). Optou-se por essa função por ela ser sensível a saturação. Os parâmetros da função foram definidos com base na literatura. Adotou-se  $a = 4,00$ .

A obtenção do resultado de distribuição de viagens é garantida pelo número de iterações executadas no processo de alocação e pelo critério de convergência de resultado. Neste trabalho, foram utilizadas 250 iterações como limite máximo e uma precisão de convergência de 0,0001. O equilíbrio é calculado através da minimização da impedância entre os pares O/D.

#### 4.2.7 CALIBRAÇÃO DOS VOLUMES NA REDE VIÁRIA

Empregou-se a metodologia TFlowFuzzy para correção de volumes da matriz O/D gerada. O procedimento TFlowFuzzy permite atualizar a matriz O/D com valores observados em campo, permitindo assim, uma distribuição de viagens mais próxima da realidade. Foram utilizadas informações de contadores de tráfego dispostos na rede viária para correção da matriz. A Figura 21 representa como o processo de correção de matrizes é aplicado nos cenários.

Figura 21- Resumo processo de calibração TFlowFuzzy



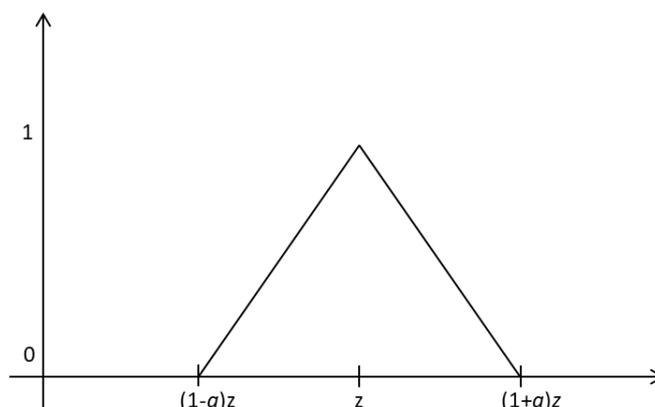
(fonte: adaptado pelo autor de MANUAL PTV VISUM, 2015)

De forma geral, os volumes dos segmentos (resultantes do processo de alocação) são comparados com os volumes observados pelos contadores eletrônicos. A diferença de volume é relacionada com a parcela de cada par O/D que utiliza o segmento, dessa forma o ajuste é realizado proporcionalmente em cada par O/D, atualizando as demandas de viagem da matriz O/D. Em seguida, é realizada novamente o processo de alocação e a comparação dos volumes dos segmentos resultante no processo de alocação e os volumes observados pelos contadores eletrônicos. O processo é iterativo e é realizado até que a diferença entre o volume nos segmentos resultantes do processo de alocação e as informações coletadas seja desejável.

Este processo de calibração permite que diversas matrizes O/D sejam encontradas como solução. Tendo em vista essa limitação, dentro do conjunto solução de matrizes é realizado um processo de minimização do erro, selecionando a matriz que mais se aproxima dos valores da matriz original.

Especificamente, o modelo de calibração TFlowFuzzy trata as informações coletadas como sendo difusas e passíveis de uma oscilação decorrente de variações diária, sazonal, de comportamento de usuário, do ambiental ou do clima. Também considera a matriz O/D como sendo uma variável difusa, sujeita as mesmas interferências. A Figura 22 ilustra o comportamento de uma informação difusa.

Figura 22 – Exemplo de comportamento de variável difusa

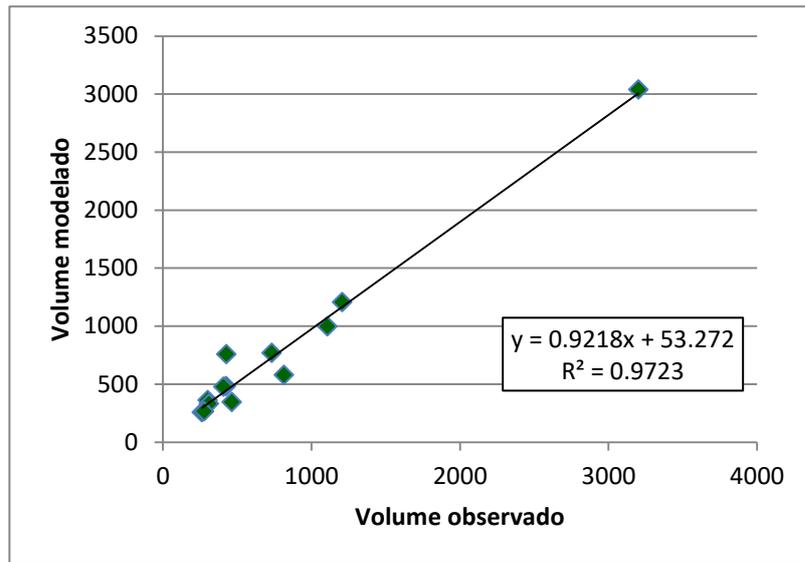


(fonte: adaptado pelo autor de MANUAL PTV VISUM, 2015)

Sendo  $z$  o valor da variável observada e  $a$  o grau de liberdade determinado para essa variável. Por fim, tratando as variáveis de volumes da matriz O/D e os valores observados em campo como difusos, o problema é definido como a minimização da diferença entre os o resultado do processo de alocação e a informações coletas.

No caso deste trabalho, utilizou-se um grau de liberdade de  $a = 5\%$  para todas as variáveis. Este valor é considerado um valor baixo, sendo observado que  $a$  pode atingir até 25% dentro do modelo de calibração (MANUAL PTV VISUM). O valor de  $a$  adotado é conservador visando preservar as características da matriz O/D original. A partir dos dados fornecidos pelo DAER, DNIT e TRIUNFO CONCEPA, foram empregados 13 pontos de coleta de dados na rede viária, que foram utilizados para corrigir as matrizes O/D dos cenários de alta e baixa demanda. A Figura 23 apresentam os resultados obtidos para a calibração da matriz de alta demanda.

Figura 23 – Comparação de valores modelados corrigidos e observados (contador eletrônico) – cenário I

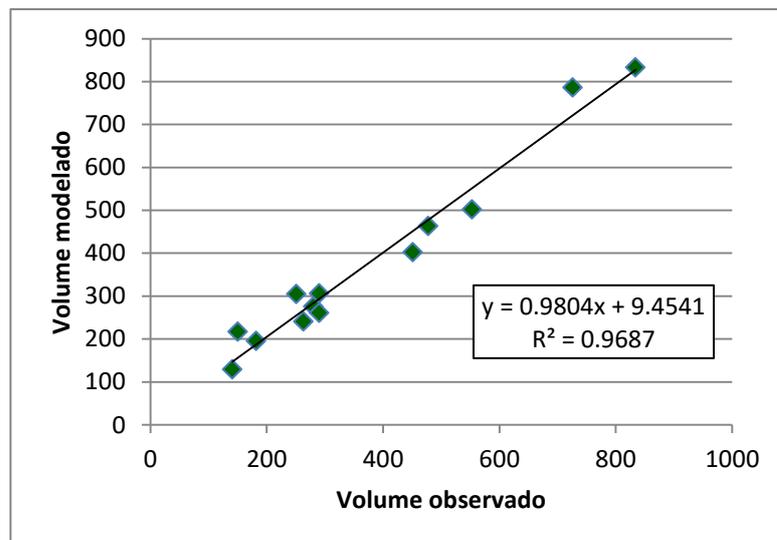


(fonte: extraído do *software* VISUM)

Observa-se que os valores corrigidos pelo processo de calibração e os observados pelos contadores eletrônicos apresenta um coeficiente de determinação de 0,9723. Induzindo a conclusão que o ajuste do modelo é adequado.

Para o caso do cenário de baixa demanda o resultado da calibração é apresentado na Figura 24. Percebe-se que o coeficiente de determinação igual a 0,9687 permite concluir-se que o modelo apresenta resultados condizentes com a realidade.

Figura 24 – Comparação de valores modelados corrigidos e observados (contador eletrônico) – cenário II



(fonte: extraído do *software* VISUM,2015)

Por fim, realizou-se a verificação dos tempos de viagens encontrados para os pares O/D resultantes do processo de alocação calibrado com tempos de viagens observados no *GoogleMaps*. Os resultados foram comparados para três pares O/D com maior atratividade nos cenários I e II. Os valores dos tempos de viagem são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 - Tempo de viagem para baixa demanda – cenário I

Origem	Tempo de viagem (min)		
	Tramandaí	Capão da Canoa	Torres
<b>BR-290</b>	22,37	34,90	60,17
<b>BR-101</b>	69,27	49,49	7,26
<b>BR-453</b>	48,67	28,36	34,45

(fonte: extraído do *software* VISUM e adaptado pelo autor)

Tabela 6 - Tempo de viagem para alta demanda – cenário II

Origem	Tempo de viagem (min)		
	Tramandaí	Capão da Canoa	Torres
<b>BR-290</b>	25,84	47,10	71,21
<b>BR-101</b>	73,11	60,59	9,72
<b>BR-453</b>	52,31	39,25	38,71

(fonte: extraído do *software* VISUM e adaptado pelo autor)

Tabela 7 – Tempo de viagem observado no *Google Maps*

Origem	Tempo de viagem (min)		
	Tramandaí	Capão da Canoa	Torres
<b>BR-290</b>	19,0	31,0	65,0
<b>BR-101</b>	70,0	56,3	6,0
<b>BR-453</b>	48,0	29,0	44,5

(fonte: extraído do *GoogleMaps* e adaptado pelo autor)

A diferença da média de tempo de viagem por par O/D para o cenário II os valores observados do *GoogleMaps* é de 0,64 minutos. Para o cenário I essa diferença é de 4,31 minutos. Entende-se que, os resultados são adequados o tempo de viagem entre as ZTs em ambos os cenários I e II.

#### 4.2.8 ORDEM DE GRANDEZA E VARIAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE PARA OS CENÁRIOS BASE

A consolidação dos cenários I, II, III e IV sem obstruções permite que seja realizada a avaliação da rede viária para as distintas demandas com base nos indicadores de desempenho de rede TDD, DMV, TMV e TRR. Esta avaliação é útil para averiguar em um primeiro momento a ordem de grandeza e a variação dos indicadores de desempenho nos distintos cenários, assim como permite uma avaliação primária da distribuição do tráfego da rede.

A Figura 25 apresenta o resultado do processo de alocação estático para os quatro cenários base modelados. Percebe-se, como era esperado, que há diferença de volume nos segmentos viários entre os cenários de alta demanda e de baixa demanda, respectivamente, cenários I e II sentido ida e os cenários III e IV sentido volta. Além disso, a diferença de sentido no carregamento das vias também é percebida. Por fim, os trechos correspondentes a BR-101 apresentam maior volume de tráfego nos quatro cenários observados.

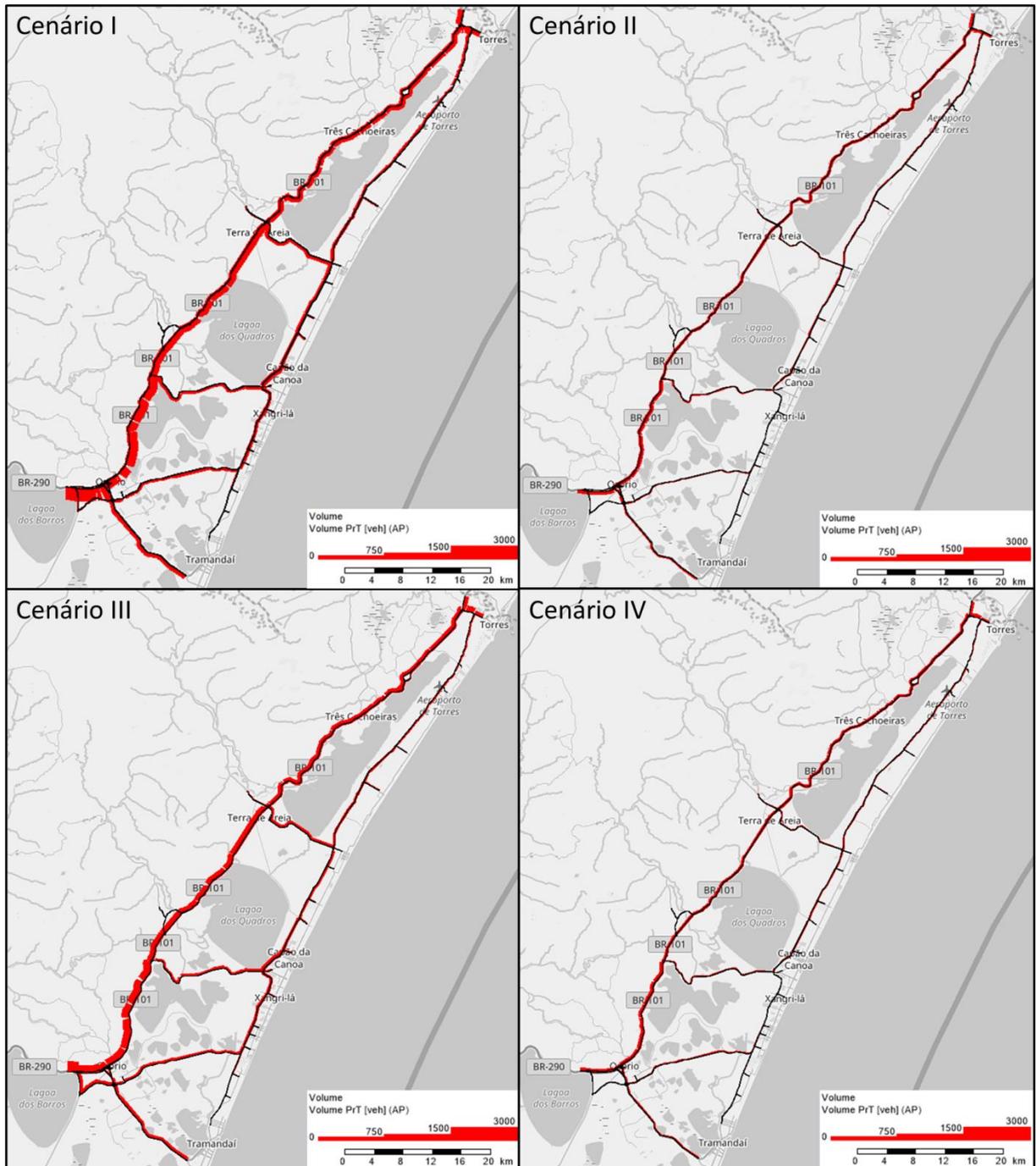
A Tabela 8 apresenta valores dos indicadores de desempenho TDD, DMV, TMV e TRR para os cenários I, II III e IV nas condições iniciais. Estes indicadores são apresentados para caracterizar os cenários base, uma vez que o cálculo desses indicadores de desempenho não depende da existência de cenários com obstruções. Identifica-se um incremento nos valores dos indicadores TDD, TMV e TRR com o incremento da demanda. O indicador DMV decresce com o aumento da demanda, provavelmente devido à saturação da rede e à existência de poucas rotas alternativas. Constata-se também que o sentido da demanda não exerce influência no valor dos indicadores de desempenho nos cenários sem obstruções.

Tabela 8 – Ordem de grandeza dos indicadores de desempenho para os cenários base (sem alteração)

<b>Cenário</b>	<b>Demanda</b>	<b>Sentido</b>	<b>TDD (h)</b>	<b>DMV (km)</b>	<b>TMV (min)</b>	<b>TRR (un)</b>
<b>I</b>	Alta	Ida	5051	63.0	53.3	77
<b>II</b>	Baixa	Ida	1557	67.3	46.1	71
<b>III</b>	Alta	Retorno	4705	62.0	54.8	78
<b>IV</b>	Baixa	Retorno	1556	66.7	46.0	70

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Resultados do processo de alocação para os cenários base (sem obstruções)



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

### 4.3 - ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DOS SEGMENTOS FRENTE À SUA OBSTRUÇÃO CONSIDERANDO CADA INDICADOR DE DESEMPENHO (ETAPA 3)

Nesta etapa o desempenho da rede viária foi avaliado frente à obstrução dos segmentos da rede um a um. Para avaliar a rede, foram utilizados os indicadores de desempenho apresentados na seção 3.1.1 deste trabalho. Dessa forma, ao obstruir um segmento viário  $l$  pertencente à rede viária, é realizado o processo de alocação de tráfego de UE com o *software* de planejamento VISUM considerando o segmento  $l$  bloqueado. Os dados resultantes do processo de alocação associados aos segmentos viários da rede e aos pares O/D são extraídos do *software* de planejamento para um *software* de análise de planilhas eletrônica que permite a realização do cálculo dos indicadores de desempenho. Após a realização dos cálculos, os indicadores consolidam um banco de dados que, contém o impacto na rede viária frente à obstrução de cada um dos segmentos da rede, para cada um dos indicadores de desempenho em cada um dos cenários. No final desta etapa, após a consolidação do banco de dados, é realizada a avaliação de cada um dos indicadores de desempenho, em cada um dos cenários propostos.

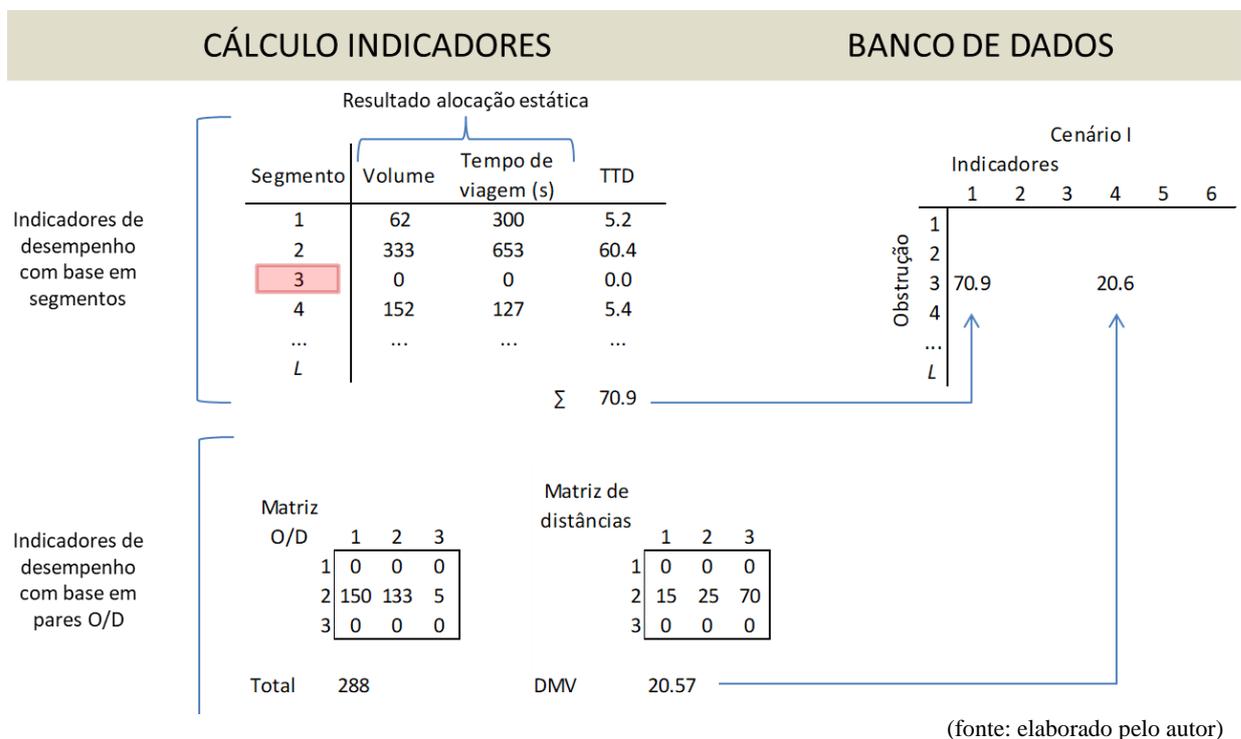
Esta análise foi elaborada através da implementação de *scripts* de linguagem de programação em Python no *software* de planejamento VISUM utilizado no método deste trabalho. O algoritmo desenvolvido realiza os processos dentro do *software* VISUM da seção 3.1.3 do Capítulo anterior.

Como exemplo do funcionamento do algoritmo no cálculo dos indicadores, a Figura 26 demonstra os cálculos do indicador TTD e DMV a partir da obstrução do segmento  $i=3$  para um cenário fictício. Além disso, é detalhado como cada indicador compõe o banco de dados, que após sua consolidação, será utilizado para a avaliação de cada indicador de desempenho.

Indicadores com base nos segmentos viários, como o TTD, são calculados a partir de dados de cada segmento viário. O exemplo da Figura 26 apresenta a disposição dos resultados decorrentes do processo de alocação estática após a obstrução do segmento  $i=3$  e o cálculo do indicador TTD. Após o cálculo, o indicador é transferido para o banco de dados.

Indicadores com base em pares O/D, como a DMV, são calculados a partir de matrizes de indicadores. Tais matrizes apresentam as mesmas dimensões da matriz O/D e contém informações específicas relacionadas a cada par O/D da matriz O/D. No exemplo da Figura 26 a matriz de distância média de viagens entre pares O/D é utilizada como exemplo. Dessa forma, o indicador DMV é calculado a partir da média ponderada dos valores da matriz de indicadores e pelo volume de viagem de cada par O/D da matriz O/D, considerando que o segmento  $i=3$  esta obstruído.

Figura 26 – Exemplo de cálculo de indicadores de desempenho através de resultados de alocação estática decorrente da obstrução de um segmento



Nesta etapa foram avaliados os quatro cenários sujeito a padrões de demanda distintos para todos os sete indicadores de desempenho. Ao todo foram realizados 1624 processos de alocação de tráfego estática decorrente das obstruções de 415 segmentos para os cenário I e III de alta demanda e 397 segmentos para os cenários II e IV de baixa demanda.

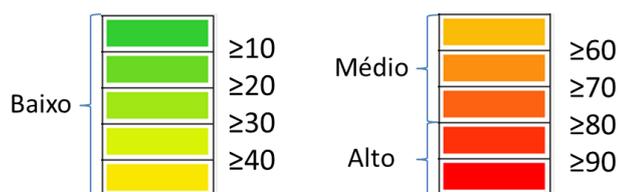
A partir da consolidação do banco de dados foi realizada a etapa e avaliação do indicador de desempenho de forma individual. Nesta etapa para cada indicador de desempenho são realizadas três análises distintas: (i) a elaboração do histograma de frequência; (ii) comparação dos valores observados em cada cenário analisado; e (iii) normalização dos valores do indicador.

A elaboração de histograma de frequência objetiva avaliar os valores observados dos indicadores de desempenho. Os valores são dispostos em um histograma de frequência que, ao agrupar os dados em classes, contabiliza o número de ocorrências em cada classe. Este tipo de avaliação permite melhor descrever a distribuição dos dados e mostra a frequência de ocorrência em cada intervalo. Além disso, é calculada a média das observações, o desvio padrão, o valor máximo e mínimo, identificando o segmento que ao ser obstruído apresenta maior impacto na rede.

A comparação entre cenários permite avaliar a influência da intensidade e do sentido da demanda em relação ao valor observado do indicador. Os valores são dispostos em função da extensão da rede viária analisada, permitindo identificar a extensão da rede relacionada com cada valor observado.

A normalização dos resultados objetiva a organização do banco de dados e o entendimento da diferença do valor máximo e mínimo com as demais observações. Para melhor representar os resultados da normalização, estes foram classificados de zero a cem na escala apresentada na Figura 27 e dispostos em mapas temáticos. A avaliação dos valores do indicador no mapa temático possibilita a identificação dos trechos viários de maior importância da rede. Além disso, adotou-se a classificação dos valores observados em Alto, Médio e Baixo.

Figura 27 – Classificação do valor observado do indicador de desempenho a partir da normalização dos



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.4 – SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS INDICADORES (ETAPA 4)

A análise de correlação de Pearson é realizada nos valores dos impactos na rede viária decorrente da obstrução dos segmentos da rede registrado pelos indicadores de desempenho selecionados na etapa 3. Esta análise busca identificar se diferentes indicadores de desempenho apresentam o mesmo sentido e força de variação, ou seja, se sua variabilidade é

semelhante. Para averiguar a semelhanças entre os indicadores de desempenho foi realizada uma análise de correlação entre cada par de indicador selecionado pela aplicação da equação 12 apresentada na etapa 3.1.1, calculando assim, os coeficientes de correção de Pearson. A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados ( $r$ ) para cada par de indicadores.

Tabela 9 – Matriz coeficientes de correlação de Pearson entre pares de indicadores de desempenho

<i>Indicador</i>	<i>TTD</i>	<i>DTD</i>	<i>TIV</i>	<i>CRA</i>	<i>TMV</i>	<i>TMV</i>	<i>TRR</i>
TTD	1.0	1.0	0.6	0.5	0.8	1.0	0.8
DTD		1.0	0.6	0.5	0.8	1.0	0.8
TIV			1.0	1.0	0.9	0.5	0.8
CRA				1.0	0.8	0.5	0.8
DMV					1.0	0.8	0.9
TMV						1.0	0.8
TRR							1.0

(fonte: elaborado pelo autor)

Constata-se que há alta correlação entre os indicadores TTD, DTD e TMV, e entre os indicadores TIV e CRA. A alta correlação entre os indicadores indicam que estes apresentam dispersão similar. Os indicadores correlacionados TTD, DTD e TMV são medidas relacionadas ao tempo e medem a intensidade do impacto decorrente da obstrução. Os indicadores TIV e CRA são ambos medidas de abrangência do impacto decorrente da obstrução. Dessa forma, um ou mais dos indicadores de desempenho que avaliarem as mesmas características da rede, apesar de diferentes formulações, devem ser excluídos da análise.

Assim, são excluídos da análise conjunta para identificação do segmento crítico os indicadores TTD e DMV, por serem correlacionados com o indicador DTD, e o indicador TIV, por ser correlacionado com o indicador CRA.

#### 4.5 - ANÁLISE CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO SELECIONADOS NA IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO DA REDE (ETAPA 5)

Esta análise objetiva realizar a análise conjunta de indicadores de desempenho de rede selecionados e identificar o segmento crítico da rede. Para realizar esta análise conjunta, primeiramente é realizada a análise individual de indicadores de desempenho selecionados.

Adotou-se a classificação de Pareto em Classes A, B e C na análise conforme o apresentado na seção 3.1.5 do capítulo anterior. Nesta classificação, os segmentos que, quando obstruídos ocasionam maior impacto na rede viária e que correspondem a até 20% da extensão total da rede são classificados na Classe A. A Classe C contém os segmentos quando obstruídos ocasionam o menor impacto na rede para até 50% da extensão total da rede. A Classe B corresponde aos 30% da extensão da rede com valores observados intermediários entre as Classes A e C.

A partir da classificação dos segmentos é realizada na análise individual dos indicadores de desempenho é realizado o teste estatístico ANOVA. Esta etapa verifica se a diferença da média dos valores em cada Classe é significativa. Caso a classificação proposta por algum indicador não seja significativa, este será excluído da análise conjunta.

Os resultados desta etapa permite a apresentação de um mapa temático que permite a visualização da classificação de todos os segmentos da rede viária nas Classes A, B e C. Além disso, os resultados desta etapa possibilitam a identificação do segmento mais importante da rede, ou seja, do segmento crítico. O segmento de maior frequência na Classe A é definido como sendo o segmento crítico.

#### 4.6 - AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO: ALOCAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA (ETAPA 6)

Esta etapa objetiva avaliar o impacto na rede viária a partir da obstrução do segmento mais crítico. O segmento crítico da rede foi definido a partir da avaliação conjunta dos indicadores de desempenho. A obstrução do segmento crítico tem seu impacto na rede avaliado por quatro indicadores de desempenho. Sendo eles:

- a) Total da diferença do tempo despendido com o cenário base (DTD);
- b) Comprimento total da rede afetada (CRA);
- c) Distância média de viagem (DMV);
- d) Total de rotas na rede (TRR).

Para melhor entender a aplicação de indicadores de desempenho foi realizada uma avaliação estática do impacto na rede através e uma avaliação dinâmica do impacto na rede. A seguir, são detalhadas cada uma dessas avaliações.

**(i) AVALIAÇÃO ESTÁTICA DOS IMPACTOS NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO**

A avaliação estática dos impactos na rede consiste na aplicação de indicadores de desempenho para avaliar diferentes níveis de obstrução do segmento crítico. O objetivo desta avaliação é verificar os valores dos indicadores de desempenho frente à obstrução do segmento crítico. Os níveis de redução de capacidade utilizados foram 100% (total obstrução do segmento), 75% e 50%.

Esta etapa foi realizada para os quatro cenários base sujeitos a quatro padrões de demanda distintos. Foi utilizado o *software* de planejamento de transportes VISUM para realizar o processo de alocação estática, o método de alocação utilizado foi o equilíbrio do usuário.

**(ii) AVALIAÇÃO DINÂMICA DOS IMPACTOS NA REDE DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO**

A avaliação dinâmica dos impactos na rede consiste na aplicação de indicadores de desempenho para avaliar os impactos na rede decorrentes da obstrução do segmento crítico. O objetivo desta etapa é avaliar os valores dos indicadores de desempenho frente à obstrução do segmento crítico. Os níveis de obstrução empregados foram 100%, 87,5%, 75%, 62,5% e 50%, para a obstrução de 60 minutos.

Além disso, foram avaliados diferentes durações de obstrução e diferentes horários de início da obstrução. Foram realizadas obstruções de durações de 30, 60 e 90 minutos. A obstrução de 60 minutos teve horários de início seu horário de início alterado em 30 minutos para mais e para menos. Estas análises objetivam explorar a abrangência dos resultados dinâmicos.

A avaliação dinâmica se diferencia da alocação estática, principalmente por considera distintas condições de tráfego em cada intervalo da análise. Para garantir o funcionamento da análise dinâmica são necessários parâmetros com características dinâmicas e um processo de alocação diferenciado. A seguir o processo dinâmico utilizado é detalhado.

O processo de alocação dinâmico busca representar as características dinâmicas do tráfego. Estas características são relacionadas à demanda e a escolha de rota dos usuários. Para representar essas características é utilizado um processo de alocação dinâmico.

O processo de alocação dinâmico utilizado foi o equilíbrio dinâmico do usuário (DUE). O modelo de escolha de rota utilizado é um modelo de distribuição Probit. As escolhas de rota ocorrem em cada intervalo da análise, para cada parcela da demanda. Optou-se por intervalos de 30 minutos para os intervalos de análise.

Extensão do período de análise foi de cinco horas, sendo a primeira hora de *warm up* e a última de *calm down*. Tais períodos são empregados para melhor representar as condições de tráfego. A distribuição horária empregada foi a distribuição horária da BR-290 apresentada na Figura 18. Considerou-se o tráfego para as 3 horas de maior volume acumulado (intervalo entre 16:00 e 19:00).

A obstrução apresenta uma hora de duração e ocorre na hora de maior intensidade de tráfego (entre 17:00 e 18:00 horas). Durante o período da análise dinâmica foram realizadas 16.934 viagens nos cenários I e III de alta demanda e 9.341 viagens nos cenários II e IV de baixa demanda. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o total de viagem de cada Zona de Origem de Tráfego para os cenários dinâmicos.

Tabela 10 – Total de viagens de acesso a área de estudo para o cenário dinâmico

Cenário	Demanda	BR-290	BR-101	BR-453	Total
Dinâmico	Alta	11903	4132	899	16934
	Baixa	4813	3670	858	9341

(fonte: dados fornecidos pela TRIUNFO CONCEPA, DNIT e DAER)

## 5 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

Este Capítulo está dividido em quatro seções. Na primeira seção são apresentados os resultados da análise de importância de segmentos com base em indicadores de desempenho de rede avaliados no caso estudado. Em seguida, na seção dois são apresentados os resultados da análise de classificação conjunta dos segmentos e a identificação do segmento crítico da rede viária do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Na terceira seção deste capítulo são apresentados os resultados da análise estática e dinâmica dos indicadores de desempenho de rede para diferentes níveis de obstrução no segmento crítico. Por fim, na última seção são feitas considerações finais sobre o Capítulo.

### 5.1 ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA DE SEGMENTOS COM BASE EM INDICADORES DE DESEMPENHO DE REDE

Os valores desta etapa foram calculados com base na obstrução sistemática de cada um dos segmentos da rede. As alocações de tráfego foram realizadas nos quatro cenários sujeitos a padrões de demanda distintos com a finalidade de entender o comportamento de cada indicador frente a variações de intensidade e de sentido da demanda. Ao todo foram realizadas 1624 alocações de tráfego nos quatro cenários, em cada alocação de tráfego foi realizada a avaliação da rede viária para os quatro indicadores de desempenho selecionados.

Para averiguar as diferenças entre o segmento que quando obstruído provoque o maior impacto na rede viária frente as obstrução dos demais segmentos foram observados os valores médios das obstruções, os desvios padrões, os maiores valores observados e as distâncias dos maiores valores observados em relação à média ( $z$ ) para cada indicador de desempenho. Na seção 4.4 do Capítulo anterior constatou-se a alta correlação entre alguns indicadores de desempenho. Estes indicadores apresentam resultados de distribuição de observações e classificação de segmentos muito similares. Considerando a extensão dos resultados, indicadores correlacionados não foram apresentados.

O Quadro 2 apresenta esses valores para os cenários I, II (de alta demanda e baixa demanda sentido ida ao litoral), III e IV (alta e baixa demanda sentido retorno do litoral) dos indicadores de desempenhos selecionados na etapa 4.4.

Quadro 2 - Comparação dos valores médios, desvio padrão, valores máximos e z(máximo) dos indicadores selecionados

Indicador	Cenário I				Cenário II				Cenário III				Cenário IV			
	Média	Des.	P. Máx.	z	Média	Des.	P. Máx.	z	Média	Des.	P. Máx.	z	Média	Des.	P. Máx.	z
DTD	2757	6611	30063	4.13	144	229	1019	3.81	2963	6605	28762	3.91	151	231	997	3.66
CRA	212	25	258	1.81	174	34.4	245	2.06	211	27.6	258	1.69	177	23.8	237	2.52
DMV	63.0	2.0	70.3	3.74	67.1	2.1	76.8	4.57	60.6	1.4	68.9	6.09	65.8	1.8	76.2	5.65
TRR	77	2.4	87	4.01	72	1.5	76	2.93	78	2.5	89	4.27	71	1.4	75	3.08

(fonte: elaborado pelo autor)

Comparando os valores apresentados no Quadro 2, percebe-se que o valor máximo observado para indicador apresenta um grande afastamento (valor de  $z > 2,00$ ) da média, apontando a existência de pelo menos um segmento com impacto na rede viária muito maior que os demais. Os resultados mostram que o maior valor observado de  $z$  é de 6,09 no caso do indicador DMV (distância média de viagem) no cenário III e o menor valor observado é de 1,69 no caso do indicador CRA (comprimento de rede afetado) no cenário III. Os altos valores de  $z$  apontam que, independente do indicador, há pelo menos um segmento que quando obstruído apresenta impacto na rede muito acima da média para a área de estudo avaliada.

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação dos indicadores de desempenho selecionados para os cenários I, II, III e IV. Os resultados correspondem às análises apresentadas na seção 3.1.3 deste trabalho, estas são:

- i) Distribuição dos valores observados do indicador de desempenho em um histograma de frequência;
- ii) Observação dos valores observados do indicador ao longo da extensão da rede para cenários de diferente sentido e intensidade de demanda;
- iii) Elaboração do mapa temático com a classificação normalizada dos valores observados do indicador para os cenários propostos.

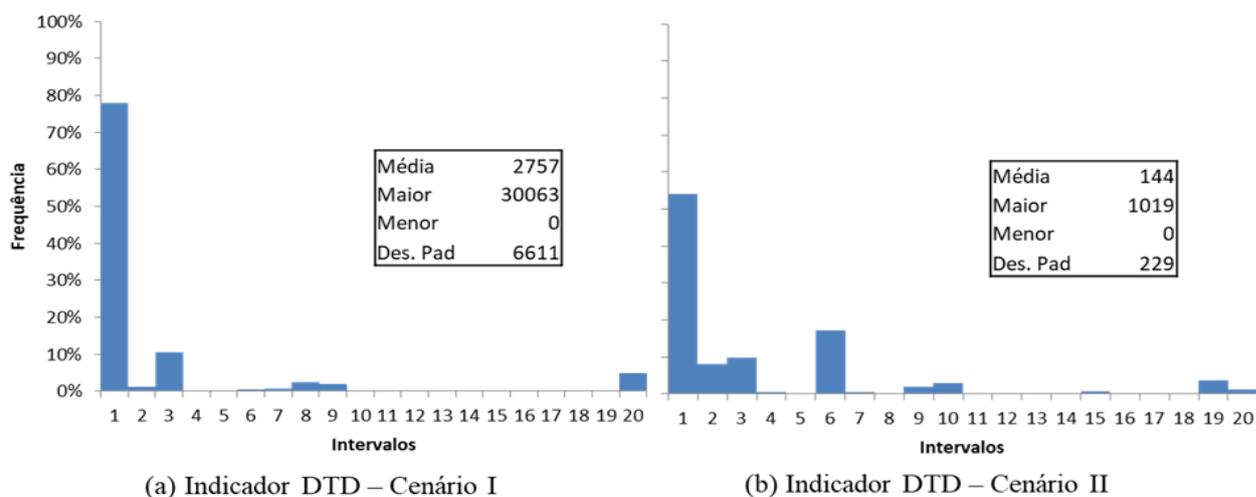
### 5.1.1 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO TOTAL DA DIFERENÇA DO TEMPO DESPENDIDO COM O CENÁRIO BASE (DTD)

Na Figura 28a são apresentados os resultados do indicador de desempenho DTD no cenário I. Verifica-se que o valor máximo observado para a obstrução de um segmento da rede é de 30.063 horas adicionais despendidas na rede e o valor médio observado para todas

as obstruções é de 2.757 horas, com um desvio padrão de 6.611 horas. O valor máximo observado é 10,90 vezes maior que o valor médio e esta a 4,13 desvios padrões acima da média, sendo estes valores muito acima da média. Esta observação aponta que a obstrução do segmento mais importante da rede estudada ocasiona um incremento no indicador DTD 10,90 vezes maior que a média da obstrução dos demais segmentos. Em outras palavras este valor, aponta a alta criticidade do segmento de maior impacto na rede frente ao indicador DTD.

O histograma de frequência (Figura 28a) mostra a dispersão dos valores observados em 20 intervalos, correspondentes as faixas equidistantes de distribuição dos valores observados. Cada valor observado é referente à obstrução de um segmento da rede viária. Percebe-se que 77,8% das observações pertencem ao menor intervalo e que o maior intervalo apresenta somente 4,8% das observações. Identifica-se também que diversos intervalos não apresentam nenhuma observação, indicando que a distribuição por intervalos não é contínua.

Figura 28: Histograma de distribuição do cenário I e II – DTD



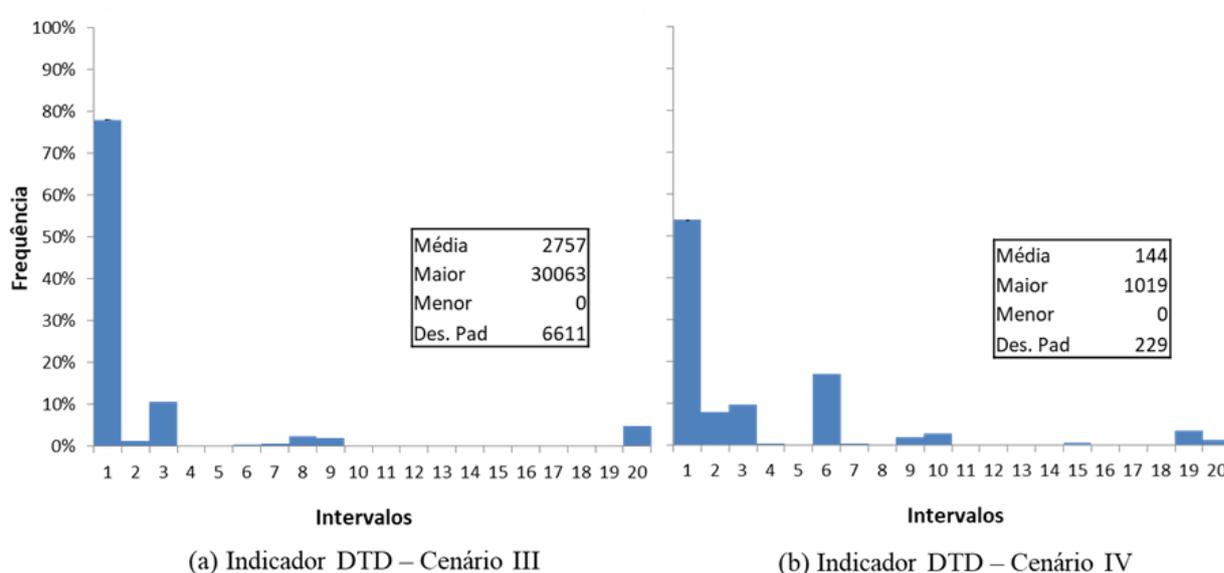
(fonte: elaborado pelo autor)

Observando os valores do indicador DTD no cenário II (Figura 28b) identifica-se um valor máximo observado para a obstrução de um segmento de 1.019 horas, um valor médio observado de 144 horas e um desvio padrão de 229 horas. Comparando o valor máximo para a obstrução de um segmento, observa-se que este é 7,06 vezes maior que a média e que é 3,81 vezes o desvio padrão acima da média. A partir do histograma de frequência por intervalos, observa-se que o menor intervalo apresenta 54,0% das observações e que somente 1,2% das observações estão no maior intervalo. Identifica-se que diversos intervalos não apresentam

nenhuma observação, indicando que as obstruções dos segmentos da rede apresentam impacto que não é distribuído de forma contínua.

Os resultados para o cenário de alta demanda no sentido de retorno do litoral (Cenário III) são apresentados na Figura 29a. Percebe-se para o indicador de desempenho DTD um valor máximo observado para a obstrução de um segmento de 28.762 horas. Para a média das obstruções obtém-se o valor de 2.963 horas despendidas na rede e um desvio padrão de 6.604 horas. O valor máximo esta 9,71 vezes acima do valor médio observado e esta a 3,90 vezes o desvio padrão acima da média.

Figura 29: Histograma de distribuição do cenário III e IV – DTD



(fonte: elaborado pelo autor)

O histograma de frequência do cenário III (Figura 29a) permite visualizar a distribuição dos valores observados para o impacto de cada segmento obstruído da rede viária. Verifica-se que o total de 73,5% das observações no primeiro intervalo e somente 5,0% das observações pertencem ao maior intervalo. Verifica-se também que diversos intervalos não apresentam nenhuma observação, apontando que a distribuição dos impactos não segue uma distribuição contínua para o cenário III.

A Figura 29b apresenta os valores do indicador DTD para o cenário IV. Observa-se um valor de 997 horas para o maior impacto na rede decorrente da obstrução de um segmento. A média das observações é de 151 horas com um desvio padrão de 231 horas. Ao comparar o

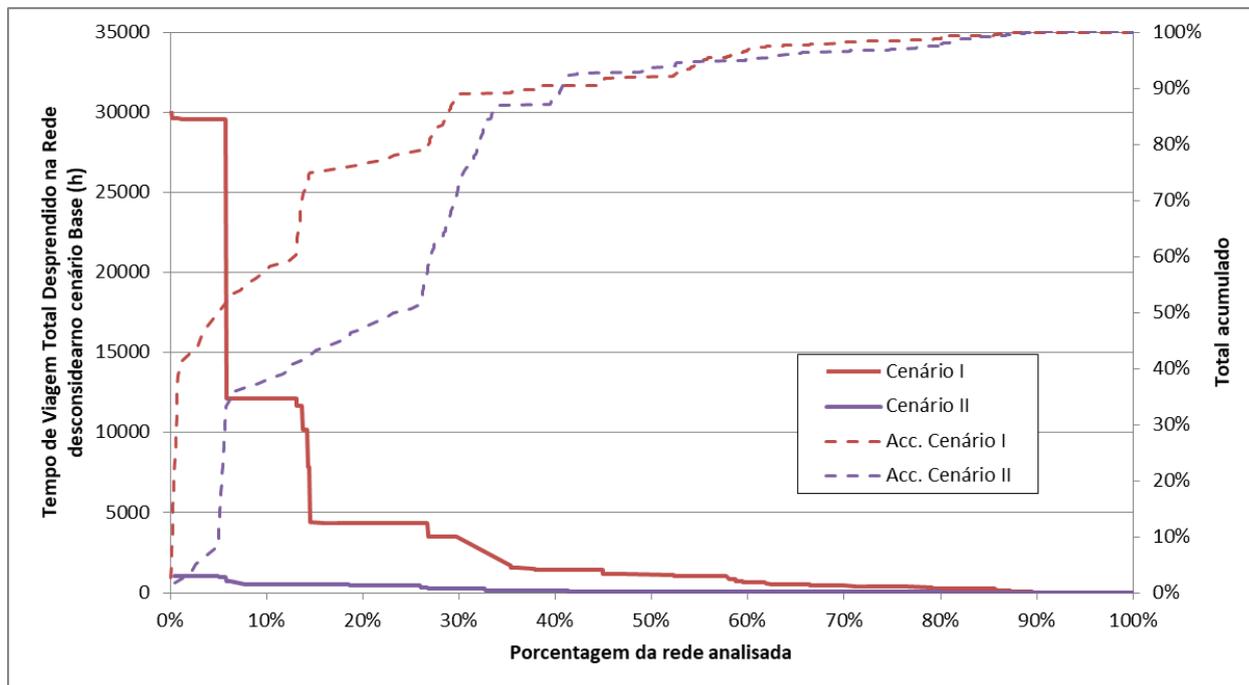
valor máximo encontrado com o valor médio, observa-se que o valor máximo corresponde a 6,59 vezes o valor médio e que este é 3,66 o desvios padrões acima da média.

O histograma de frequência por intervalos para o indicador DTD no cenário IV (Figura 29a) aponta que 50,4% das observações estão no menor intervalo e que apenas 1,3% das observações pertencem ao maior intervalo. Consta-se a existência de intervalos sem observações, indicando que as observações não se distribuem de forma contínua. De maneira prática, indica que, trechos (conjuntos de segmentos) distintos da rede viária apresentam impactos de magnitudes distintos, e que a diferença entre a intensidade do impacto de cada trecho provoca a descontinuidade na distribuição.

Para entender o comportamento do indicador DTD frente à variação da demanda, compararam-se os cenários I e II no gráfico apresentado na Figura 30. Os valores do impacto na rede de cada obstrução para ambos cenários são dispostos em ordem decrescente, assim as obstruções que apresentam alto impacto são apresentadas primeiro. O eixo horizontal apresenta a extensão da rede analisada. Também são apresentadas no gráfico as curvas de valor acumulado (Acc. cenário I e Acc. cenário II), permitindo identificar o total de impacto possível para determinada extensão da rede.

Para ambos os cenários da Figura 30, percebe-se que há influência direta do valor da demanda no resultado observado. Para os valores do cenário I observa-se que há um grupo de segmentos que se destaca, apresenta um valor muito alto de impacto. Esse grupo de alto impacto (superior a 25.000 horas) corresponde a 5,87% da extensão total da rede e apresenta um total de impacto acumulado de 51,81% do total de impacto possível. Em seguida, há um segundo grupo de segmentos que apresentam um valor observado constante (entre 10.000 e 15.000 horas), esse grupo, somando com o anterior corresponde a uma extensão de 12,25% da rede e é responsável por 75,31% do total de impacto possível. Entretanto, para a demanda de baixa intensidade, cenário II, a variação das observações é pouco perceptível. Por fim, observa-se que para os dois cenários, há uma série de segmentos que, quando obstruídos, praticamente não geram impacto na rede viária, ou seja, o valor do indicador se aproxima de zero.

Figura 30 - Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DTD nos cenários I e II



(fonte: elaborado pelo autor)

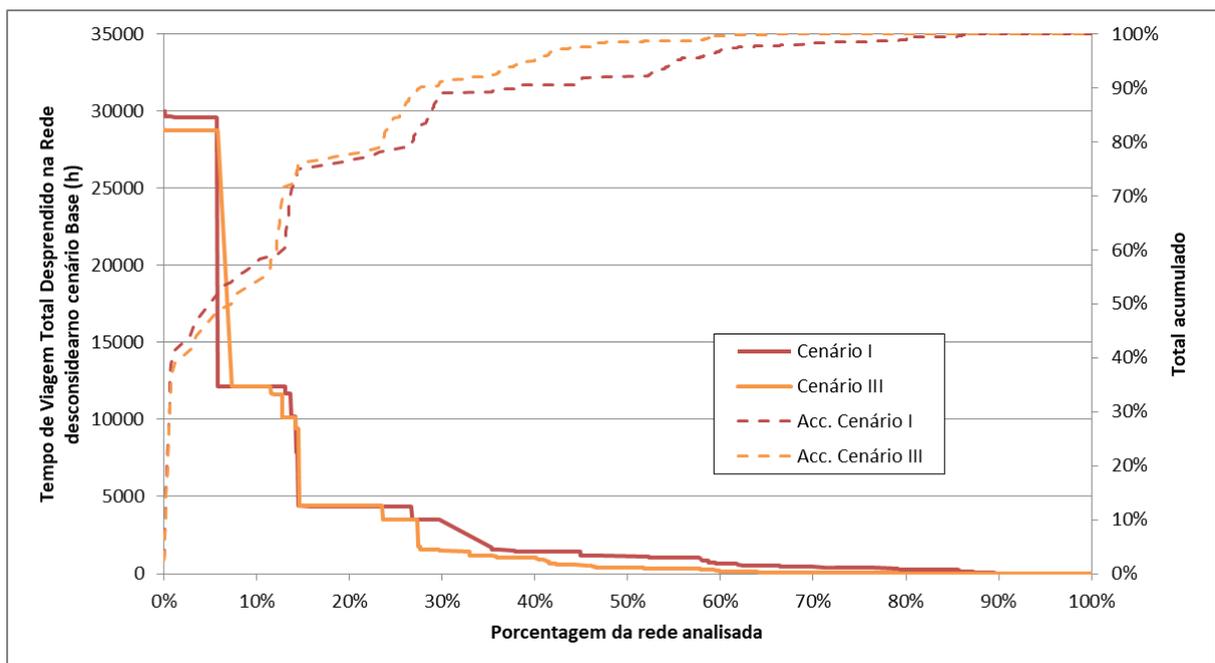
Percebe-se claramente que o impacto na rede viária decorrente da obstrução dos segmentos avaliados pelo DTD é sensível a intensidade da demanda, como esperado. Os resultados do cenário I (de alta demanda) são predominantemente maiores do que os resultados do cenário II (baixa demanda). Contudo, identifica-se um intenso crescimento do impacto na rede viária averiguado por esse indicador, sabe-se que o incremento da demanda entre os cenários é de 86%, todavia o crescimento do maior impacto na rede entre os cenários II e I é de 2849%. Esse crescimento também ocorre para o valor médio do impacto nos cenários, sendo de 1089%. Verifica-se então que o impacto médio no cenário II da rede viária decorrente a uma obstrução cresce 22,06 vezes o valor do impacto médio para 1% de incremento da demanda, enquanto o impacto no segmento mais importante cresce 34,74 vezes o valor do maior impacto para cada 1% de incremento da demanda.

Apesar da diferença acentuada no valor do indicador entre os cenários, percebe-se que há similaridade na curva do total de impacto acumulado. Apontando que, para a rede estudada, há um conjunto de segmentos de alto impacto em ambos os cenários I e II, apesar

de não ficar nítida essa relação observando diretamente o impacto na rede registrado pelo indicador DTD.

A Figura 31 mostra a similaridade dos valores do indicador DTD encontrados para os cenários I e III (mesma intensidade de demanda, porém de sentidos contrários). Percebe-se que a variação dos valores observados é muito semelhante nos dois cenários, apontando que não há influência do sentido da demanda. Também se observa que há uma grande semelhança com as curvas de impacto total acumulado. Ambos os cenários apresentam um grupo de segmentos com um valor observado acima de 25.000 horas despendidas na rede, seguido por um segundo grupo de segmentos que apresenta impacto acima de 10.000 horas. A soma dos dois grupos, em ambos os casos, corresponde a menos de 15.0% da extensão da rede viária e é responsável por mais de 75% do total de impacto possível.

Figura 31: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DTD nos cenários I e III



(fonte: elaborado pelo autor)

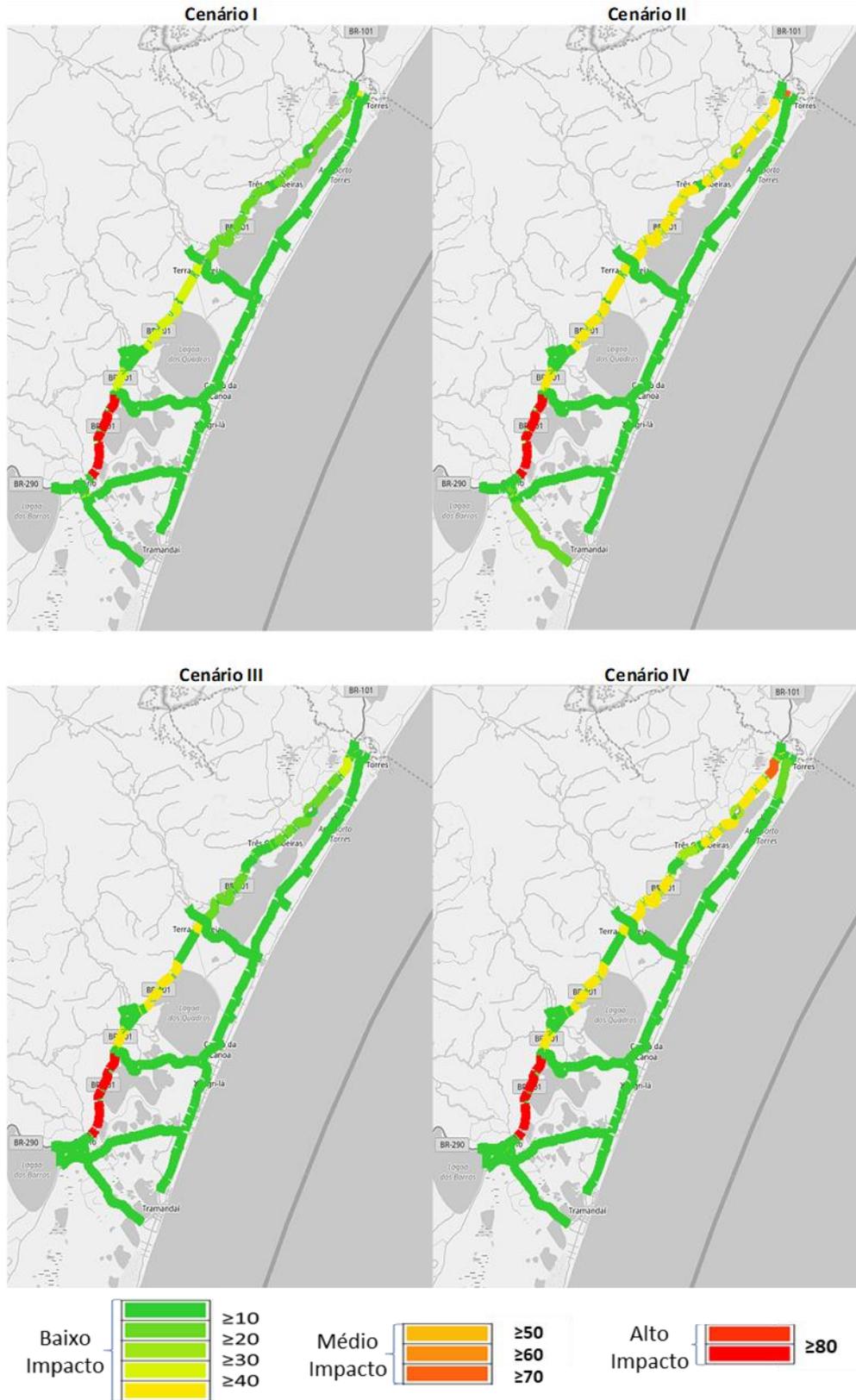
A classificação normalizada dos valores observados é apresentada na Figura 32. A partir desta classificação é possível identificar a importância de cada um dos segmentos para cada um dos cenários, identificando os trechos críticos. Os segmentos foram normalizados de zero a cem e classificados a partir de uma escala de cores, apresentada no final da seção 4.3 deste

trabalho. Percebe-se que a classificação apontada é muito similar em todos os casos, indicando que o trecho mais crítico da rede independe do sentido e da intensidade da demanda. Comparando os cenários I e III identifica-se que os trechos de maior importância são os mesmos, o que corrobora os resultados apresentados nas Figura 31, que indicava a existência de trechos com impactos semelhantes. Verifica-se que o cenário I apresenta muitos segmentos de baixa nota atribuída (nota inferiores a 50), mostrando a diferença de impacto entre o trecho mais crítico em vermelho (nota maior que 80) e os demais. Mais detalhadamente, os cenários I e III apresentam menos trechos de importância intermediária (nota entre 30 e 50), quando comparados com os cenários II e IV.

Por fim, constata-se que os impactos na rede viária decorrente da obstrução de cada segmento avaliado pelo indicador DTD apresentam uma distribuição similar independente da intensidade ou do sentido da demanda (Figura 28 e Figura 29). A distribuição das observações do indicador DTD não é contínua, apresentando vários intervalos sem observações. Além disso, observa-se que, em todos os cenários há uma concentração de observações no menor intervalo indicando que a maioria dos segmentos da rede apresenta um impacto baixo quando comparado com o maior impacto possível.

Pode-se concluir que o indicador DTD possibilita a identificação do real acréscimo de impacto na rede viária, tornando mais viável à comparação de cenários diferentes. No caso estudado, o indicador DTD aponta que o trecho da BR-101 entre os municípios de Osório e Terra de Areia é o trecho mais importantes da rede viária, para todos os cenários.

Figura 32: Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – DTD



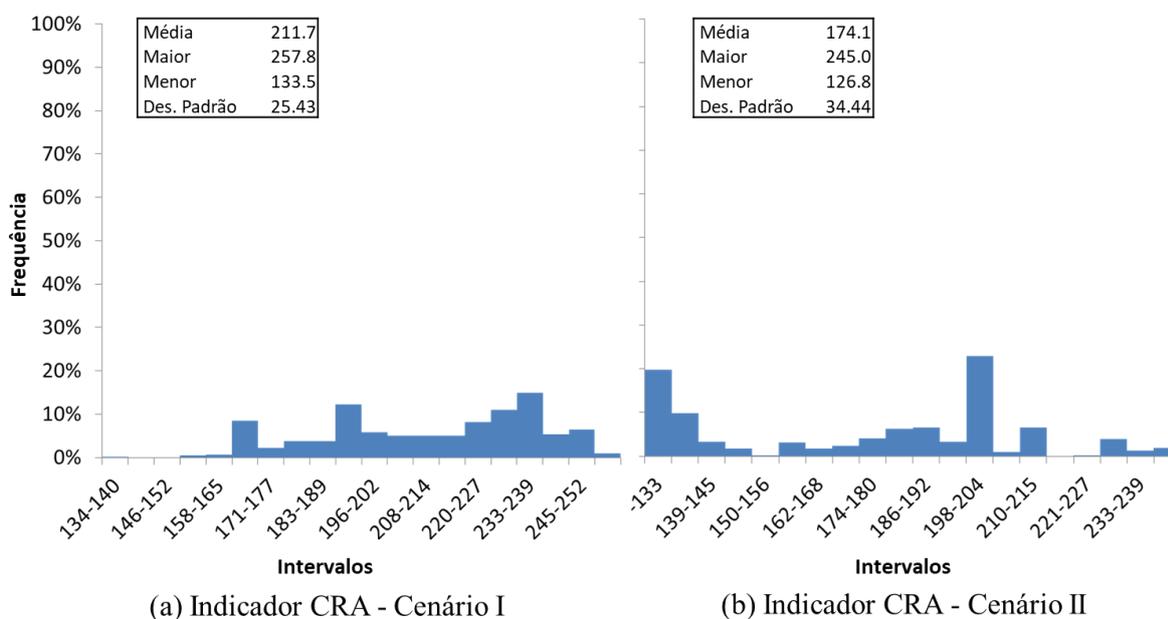
(fonte: extraído do software VISIM e adaptado pelo autor)

### 5.1.2 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO COMPRIMENTO TOTAL DA REDE AFETADA (CRA)

Na Figura 33a são apresentados o impacto decorrente da obstrução dos segmentos da rede avaliados pelo indicador CRA no cenário I. Observa-se que o maior valor do impacto medido pelo indicador é de 257,8 km com incremento de volume e o menor impacto é de 133,5 km afetados. Além disso, constata-se que o valor médio das observações é de 211,7 km afetados e um desvio padrão de 25,43 km. Comparando o maior valor observado com a média, identifica-se que este está 1,22 vezes acima da média e corresponde a 1,81 vezes o desvio padrão acima da média.

Observando a distribuição dos no histograma de frequência (Figura 33a), percebe-se que o intervalo entre 233 e 239 é o intervalo de maior frequência e apresenta 12,3% dos valores observados. Constata-se que somente 1,0% das observações pertencem ao maior intervalo. Além disso, constata-se que somente 1,4% das observações pertencem ao menor intervalo. O baixo número de observações nos menores intervalos da distribuição aponta que a rede viária apresenta um pequeno conjunto de segmentos que, ao serem obstruídos, provocam um baixo impacto na rede comparando com o impacto decorrente da obstrução dos outros segmentos.

Figura 33: Histograma de distribuição do cenário I e II – CRA



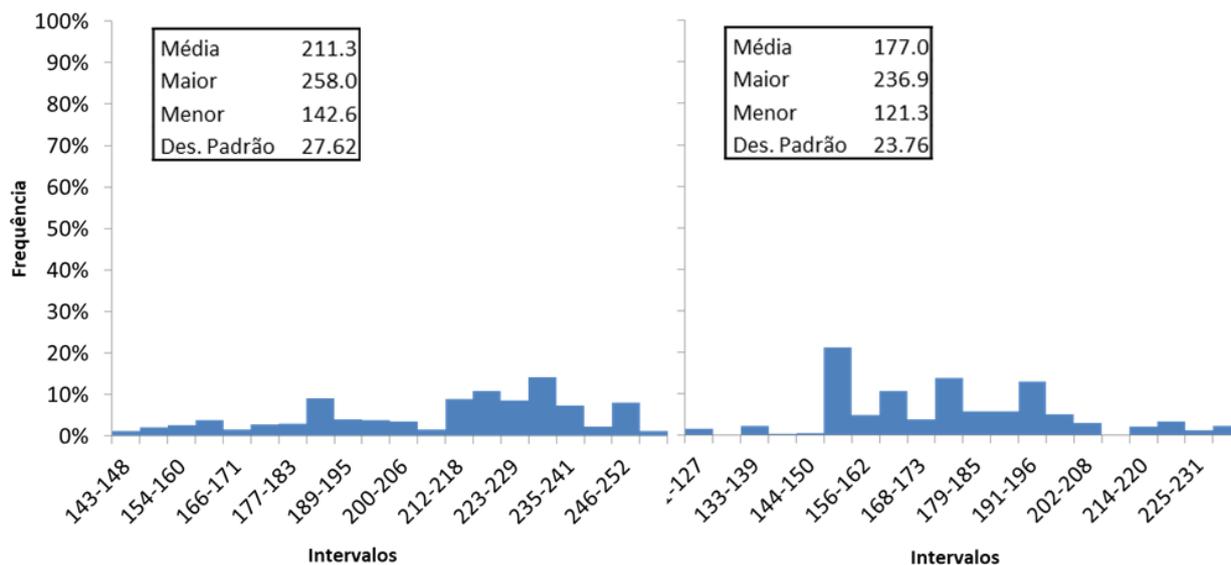
(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 33b apresenta os resultados para o indicador CRA no cenário II. Percebe-se que o maior impacto encontrado para a obstrução de um segmento é de 245,0 km com incremento de volume e o menor valor observado é de 126,8 km afetados. Constata-se também que a média das obstruções é de 174,1 km com um desvio padrão de 34,44 km. O maior valor é 1,41 vezes maior que o valor médio e corresponde a 2,06 vezes o desvio padrão acima da média.

Observando a distribuição das observações nos intervalos Figura 33b para o cenário I, percebe-se que há dois intervalos com grande valor acumulado. O maior número de observações está no intervalo entre 198 e 204 km e contém 22,9% das observações. O segundo intervalo com maior número de observações é o primeiro intervalo, que contém 19,8% das observações. O maior intervalo apresenta somente 1,9% das observações. Constata-se que há uma concentração de observações em intervalos de baixo valor e em intervalos centrais.

Na Figura 34a são apresentados os impactos registrado pelo indicador de desempenho CRA para a obstrução dos segmentos no cenário III. O valor máximo observado para a obstrução de um segmento da rede é de 258,0 km com incremento de volume e o segmento com menor impacto na rede ocasiona incremento de volume em 142,6 km. Também se percebe que o valor médio das observações é de 211,3 km com um desvio padrão de 27,62. Verificando a diferença entre o maior valor observado e a média, observa-se que o maior valor é 1,22 vezes maior que a média o que corresponde a 1,69 desvios padrões de distância da média.

Figura 34: Histograma de distribuição do cenário III e IV – CRA



(a) Indicador CRA – Cenário III

(b) Indicador CRA – Cenário IV

(fonte: elaborado pelo autor)

Observando a distribuição de frequência das observações (Figura 34a) para o indicador CRA no cenário III, constata-se que todos os intervalos apresentam observações. O intervalo entre 229 e 235 km contém o maior número de observações. O maior intervalo possui somente 1,3% das observações. Por fim, constata-se que há uma maior concentração de observações nos intervalos de alto valor (entre 212 e 241 km), apontado neste cenário, há um grande grupo de segmento que, quando obstruídos ocasionam um impacto próximo ao maior impacto possível.

Na Figura 34b são apresentados os impactos registrado pelo indicador de desempenho CRA para a obstrução dos segmentos do cenário IV. Observa-se que o segmento de maior impacto na rede viária é de 236,9 km com incremento de volume enquanto o segmento de menor impacto ocasiona o incremento de volume em 121,3 km da rede. O valor médio para as obstruções dos segmentos de 177,0 km com incremento de volume, o desvio padrão de 23,76 km. Ao comparar o maior valor observado com a média, observa-se que ele é 1,34 vezes acima da média e 2,52 desvios padrões de distância da média.

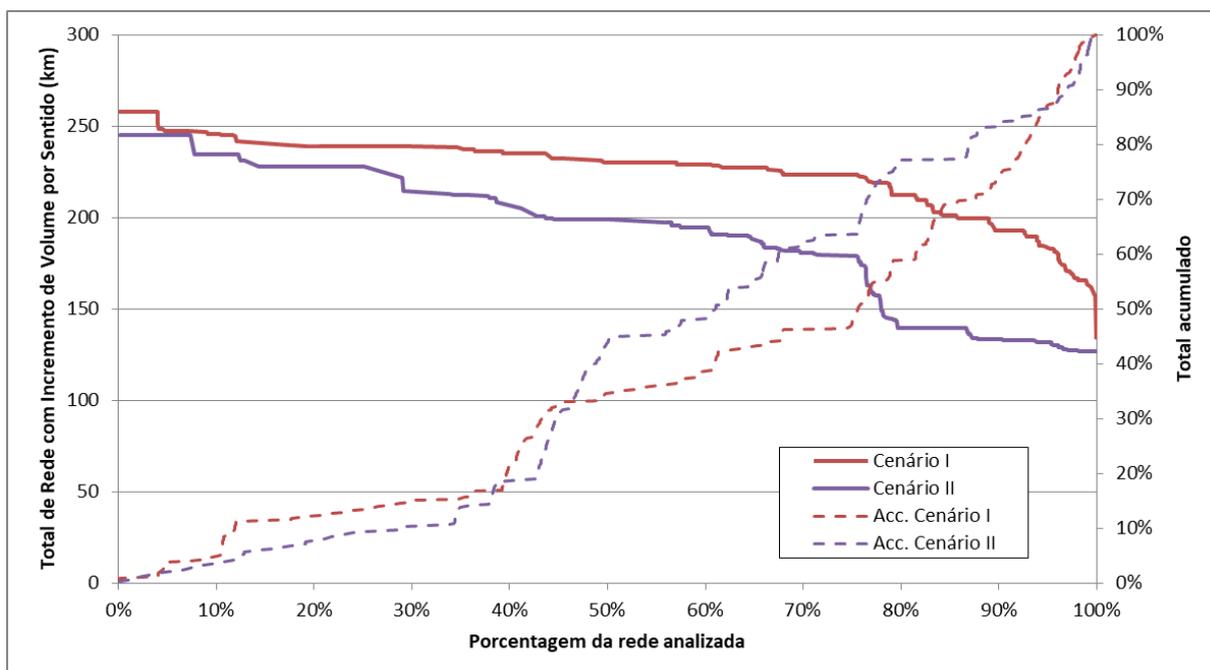
Observando a distribuição de frequência das observações (Figura 34b) para o indicador CRA no cenário IV, percebeu-se que o intervalo com maior número de observações é o

intervalo entre 150 e 156 km que contém 21,2% das observações. O maior intervalo apresenta somente 2,3% das observações. Além disso, percebe-se que ocorre uma maior concentração de observações nos valores intermediários, e poucas observações nos intervalos de maior e menor valor, concluindo que para este cenário, há segmentos de alto e baixo impacto que se distanciam do impacto médio da rede.

Para analisar o efeito da intensidade da demanda observa-se a Figura 35, onde são apresentados os valores das obstruções dos segmentos da rede para os cenários I e II. A partir da análise constata-se que o cenário I sempre apresenta valores observados maiores que os observados no cenário II, decorrente da obstrução dos segmentos da rede. Apesar de a diferença ser menor para os trechos de alto impacto, a diferença entre os valores observado nos dois cenários tende a aumentar ao longo da análise da rede. Também se percebe que, em ambos os casos, existem um grupo de segmentos de alto impacto que apresenta valor constante de impacto, indicando que são segmentos com a mesma importância para a rede. Este grupo de segmentos de alto impacto no cenário I representa 4,02% da rede viária. No cenário II, esse grupo de segmentos representa 7,34% da extensão da rede analisada. A análise permite identificar também que 50% do total de impacto possível correspondem a 75,10% da extensão da rede viária no caso do cenário I e 60,24% da extensão total da rede no cenário II.

Verifica-se que a diferença entre valores observados para os segmentos de alto impacto é pequena, apontado que os segmentos importantes apresentam impacto similar, independente da intensidade da demanda. Conforme se diminui a importância do segmento obstruído, constata-se que maior é a diferença entre os cenários de alta e baixa demanda. Dessa forma, o indicador é sensível à intensidade da demanda, apresentando valores mais elevados para cenários de maior demanda, independentemente do segmento obstruído da rede viária.

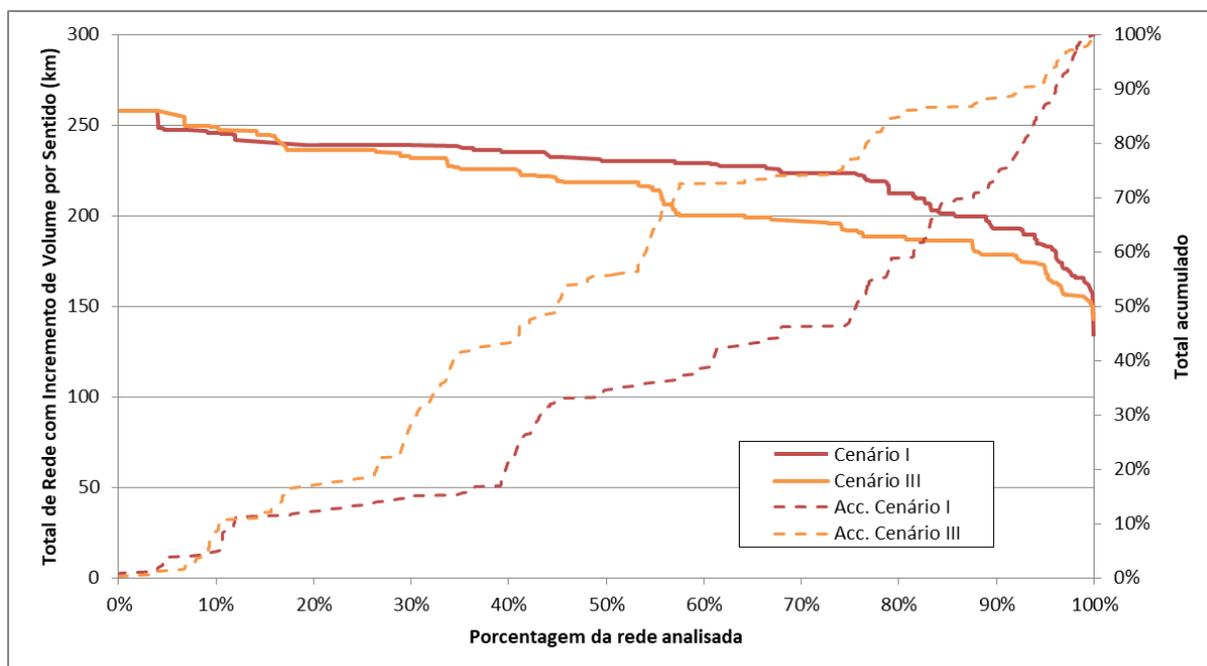
Figura 35: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador CRA nos cenários I e II



(fonte: elaborado pelo autor)

Para analisar o efeito do sentido da demanda no impacto decorrente das obstruções registradas pelo indicador CRA observa-se a Figura 36, onde são apresentados os valores das obstruções dos segmentos da rede para os cenários I e III (de alta demanda e sentidos opostos). Percebe-se que a mudança do sentido da demanda não apresenta uma influência direta nos valores decorrentes da obstrução dos segmentos da rede para o indicador CRA. Constata-se que, os trechos de maior impacto apresentam valores similares e que trechos de valores mais baixos apresenta certa diferença. Também é possível constatar que o maior valor observado é idêntico nos dois cenários, ou seja, independe do sentido da demanda.

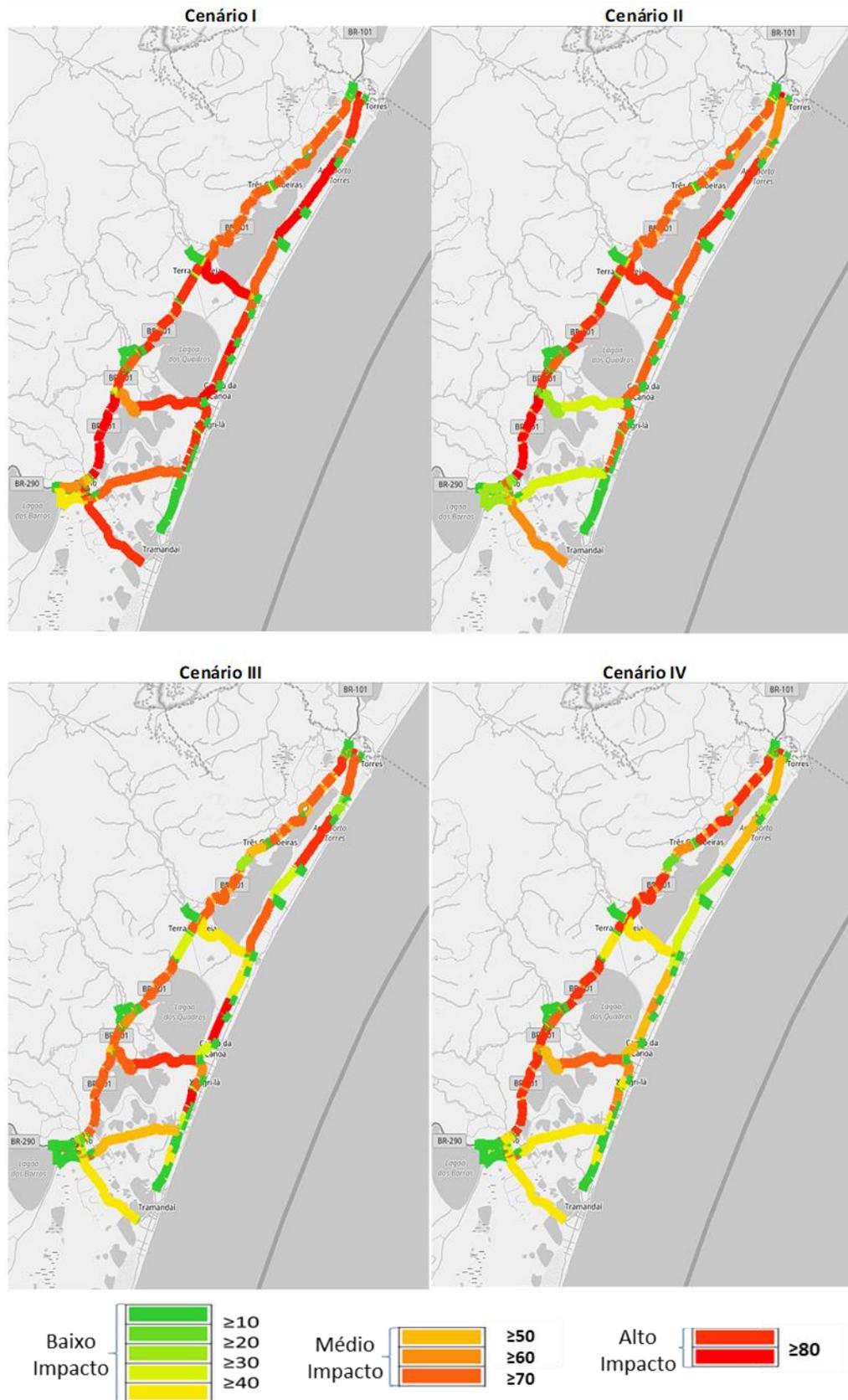
Figura 36: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador CRA nos cenários I e III



(fonte: elaborado pelo autor)

A classificação normalizada dos valores observados é apresentada na Figura 32. A partir desta classificação é possível identificar a importância de cada um dos segmentos para cada um dos cenários, identificando os trechos críticos para o indicador CRA. Observa-se que há pouca semelhança para a priorização de segmentos entre os quatro cenários, indicando que a alteração na importância de cada segmento com alterações da intensidade e do sentido da demanda. O cenário I apresenta quase todos segmentos com alto impacto, destacando-se pelo trecho da RS-786 entre Tramandaí e Capão da Canoa que apresenta baixo impacto. No cenário II a RS-030 apresenta médio impacto, e as RS-389 e RS-407 apresentam baixo impacto. Para o cenário III, percebe-se que os trechos de alto impacto pertencem à Estrada do Mar, porém os pontos de alta importância são trechos afastados. No cenário IV, praticamente toda a extensão da BR-101 apresenta alto impacto. No que tange à quantidade de segmentos de alto impacto (nota maior que 80) percebe-se que há uma similaridade entre os cenários I e II e os cenários III e IV. Os cenários I e II apresentam alta quantidade de segmentos de alto impacto, enquanto nos cenários III e IV este número é mais reduzido, apontando que a diferença do sentido da demanda provoca a alteração da importância dos segmentos.

Figura 37: Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – CRA



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

Por fim, constata-se que o impacto na rede viária decorrente da obstrução de cada segmento avaliados pelo indicador CRA apresenta diferentes distribuições das observações para cada cenário investigado. Essa diferença é percebida na distribuição de frequência apresentada nos histogramas de frequência. Verifica-se que para a rede estudada, o indicador CRA apresenta diferente priorização para demandas de diferente intensidade e sentido, contudo essa diferença é mais severa para demandas de sentido diferentes.

### **5.1.3 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO DISTÂNCIA MÉDIA DE VIAGEM (DMV)**

A Figura 38a apresenta a distribuição do impacto decorrente da obstrução de cada segmento avaliado pelo indicador DMV para o cenário I. Constata-se que a obstrução de maior impacto na rede observada apresenta um valor de 70,3 km para a distância média de viagem. O menor tempo médio de viagem observado para a obstrução de um segmento é de 59,3 km. Também se percebe que a média dos valores observados é de 63,0 km e que o desvio padrão é de 1,95.

O histograma de frequência (Figura 38a) mostra a dispersão dos valores encontrados para a obstrução dos segmentos em cada intervalo. Observa-se que o 56,1% das observações pertencem ao intervalo entre 63-64 km. Verifica-se que o maior intervalo possui apenas 0,7% das observações e que há uma concentração de observações em intervalo central (entre 63 e 64 km), apontando que a distribuição dos valores se assemelha a uma distribuição normal.

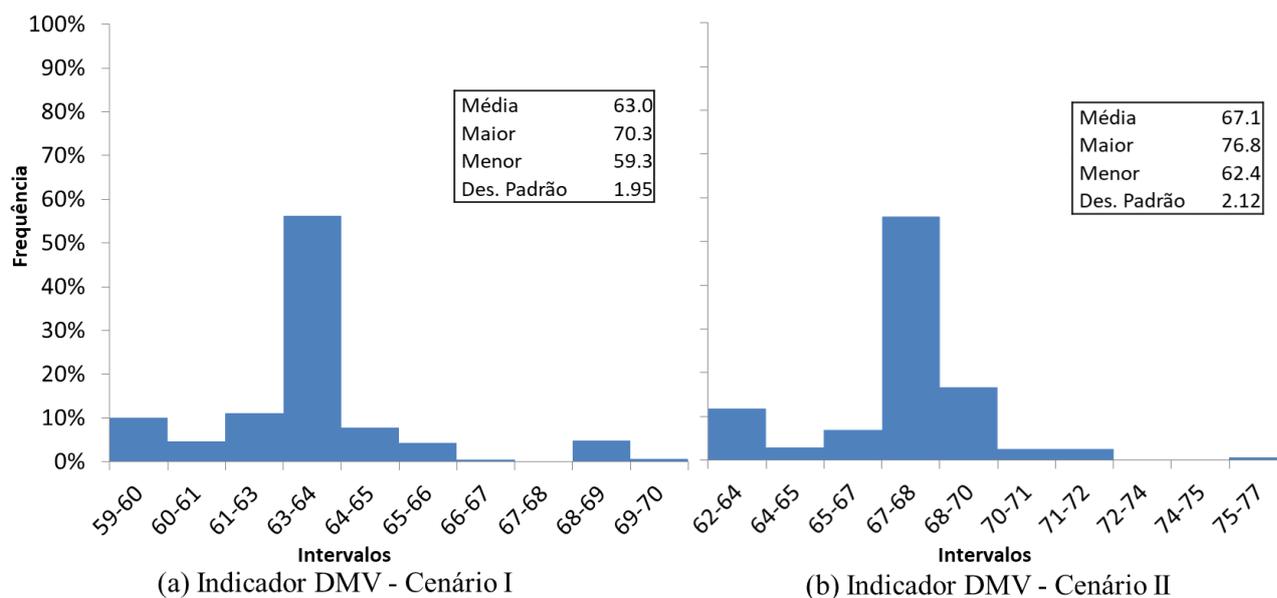
O impacto das obstruções dos segmentos da rede medidos pelo indicador DMV para o cenário II são apresentados na Figura 38b. Identifica-se um valor máximo de distância média de viagem de 76,8 km para a obstrução de um segmento.

A obstrução de menor impacto na rede apresenta uma distância média de viagem de 62,4 km. Dentro os valores observados para a obstrução de cada segmento da rede o valor médio da DMV é de 67,1 km com um desvio padrão de 2,12. Comparando o maior impacto encontrado com a média, observa-se que este é 1,14 vezes maior e que é 4,57 vezes o desvio padrão acima da média.

O histograma de frequência (Figura 38b) mostra a dispersão dos valores encontrados para a obstrução dos segmentos em cada intervalo. Percebe-se que o intervalo de maior

frequência é o intervalo entre 67 e 68 km que contém 55,7% das observações. Além disso, percebe-se que o maior intervalo apresenta somente 0,7% das observações. Por fim, observa-se que a concentração das observações está em valores abaixo de 70 quilômetros, apontando que a distribuição dos valores se assemelha a uma distribuição normal.

Figura 38: Histograma de distribuição do cenário I e II – DMV

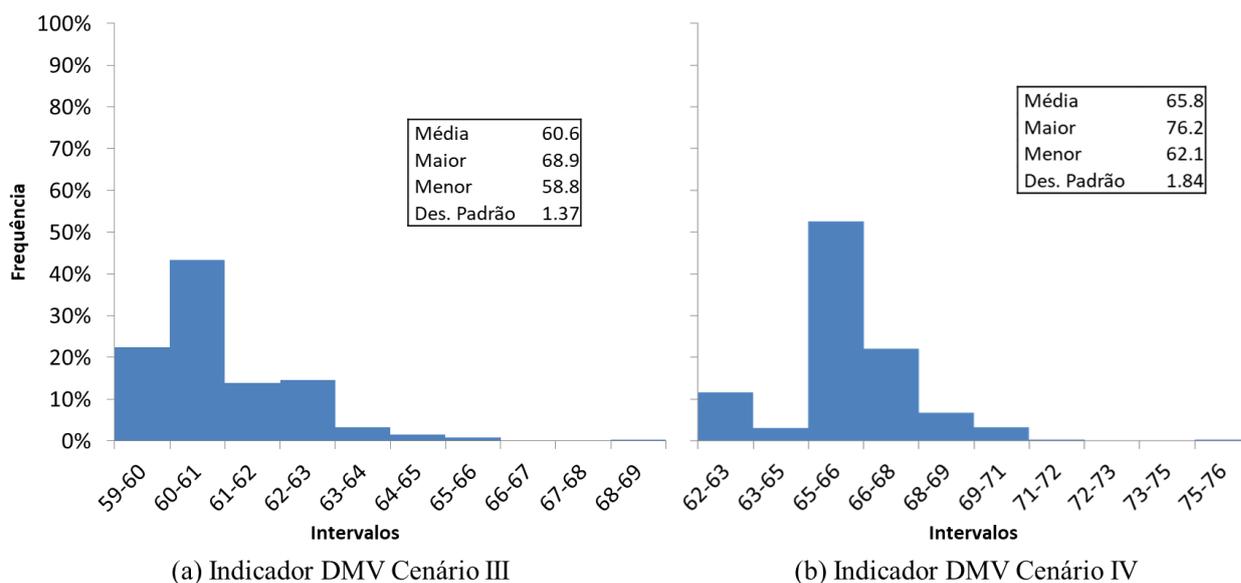


(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 39a são apresentados os resultados da avaliação da rede a partir da obstrução dos segmentos para o indicador de desempenho DMV no cenário III. O valor máximo observado para a obstrução de um segmento da rede é de 68,9 km para a distância média de viagem. O menor valor observado para a DMV foi de 58,8 km. Para este cenário, a média das observações é de 60,6 km e o desvio padrão de 1,37. Também se pode perceber que o maior valor encontrado corresponde a 1,14 vezes o valor da média e apresenta um valor 6,09 vezes o desvio padrão acima da média.

O histograma de frequência (Figura 39a) mostra a dispersão dos valores em intervalos para resultados referentes ao indicador DMV no cenário III. Percebe-se que 43,3% das observações estão entre os valores 60 e 61 km. Além disso, é possível notar que há uma concentração das observações nos menores intervalos. Consta-se também que somente 0,3% das observações estão contidas no maior intervalo.

Figura 39: Histograma de distribuição do cenário III e IV – DMV



(fonte: elaborado pelo autor)

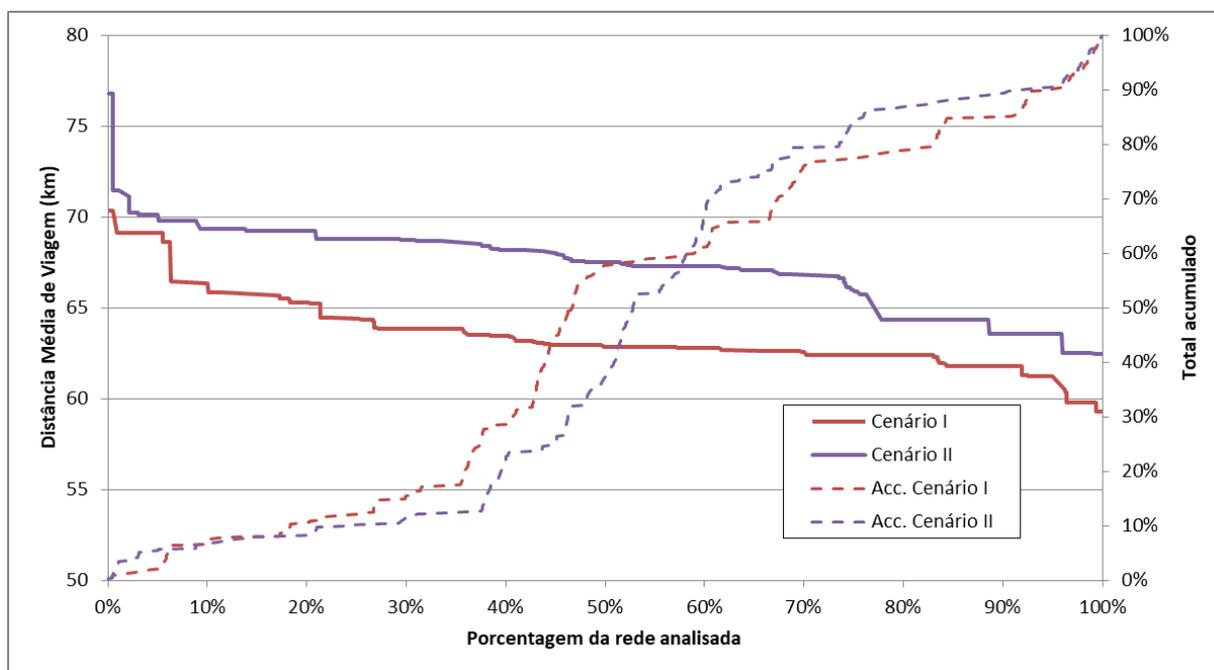
Os resultados da análise da obstrução dos segmentos do cenário IV são apresentados na Figura 39b. Percebe-se que o maior valor observado para a obstrução de um segmento é de 76,2 km e que o menor valor encontrado é de 62,1 km. Também se constata que a média das observações é de 65,8 km e apresenta um desvio padrão de 1,84. O maior valor encontrado é 1,16 vezes maior que o valor médio e esta a 5,65 desvios padrões acima da média.

O histograma de frequência (Figura 39b) mostra a dispersão dos valores observados para cada obstrução em intervalos, percebe-se que há uma concentração de observações no intervalo entre 65 e 66 km de distância. Observa-se também que praticamente não há valores observados para os maiores intervalos, e somente 0,3% das observações pertencem ao maior intervalo. Verificando com isso que, há pelo menos um segmento que, quando obstruído apresenta valor de impacto na rede muito maior que a média do impacto das outras obstruções.

Para analisar o efeito da intensidade da demanda sobre a distância média de viagem, foram comparados os cenário I e II (Figura 40). Percebe-se que, ao contrário do esperado, a distância de viagem é sempre maior no cenário de menor demanda. Identifica-se também que no cenário II existe um grupo de segmentos (0,49% da extensão total da rede) que apresenta um alto impacto, destoando dos demais resultados decorrentes da obstrução dos demais

segmentos. Identifica-se que 50% do impacto acumulado correspondem a 52,66% da extensão da rede para o caso do cenário II e 45,49% da extensão da rede para o cenário I.

Figura 40: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DMV nos cenários I e II

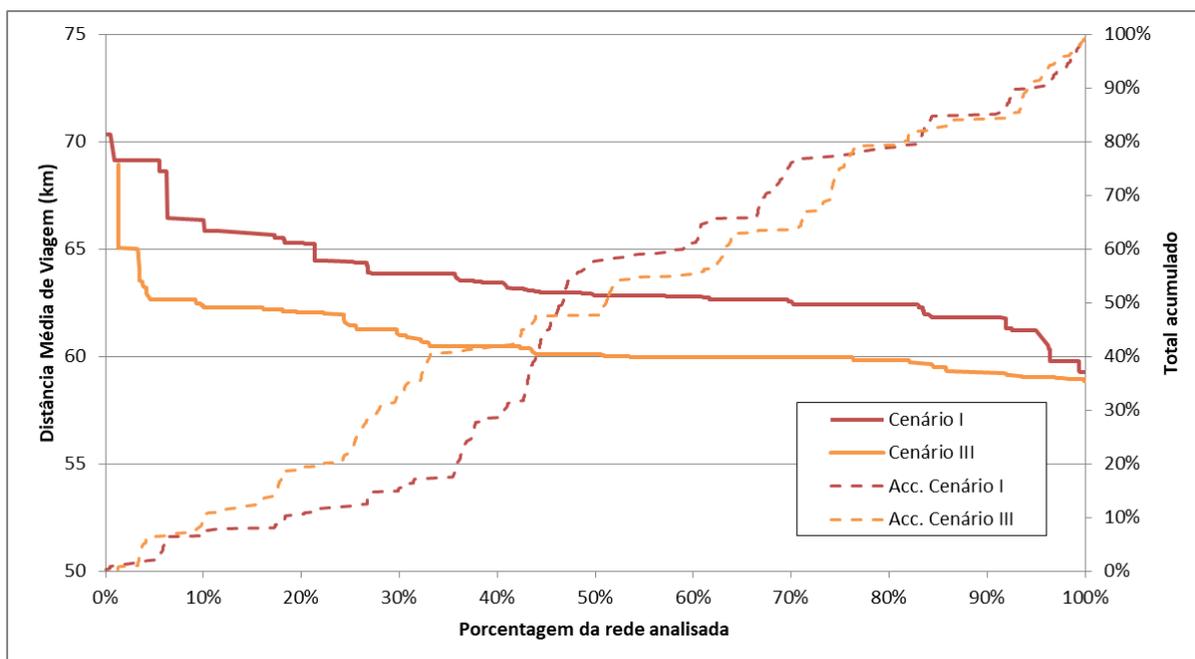


(fonte: elaborado pelo autor)

Para analisar o efeito do sentido da demanda observa-se a Figura 41, onde são apresentados os valores das obstruções dos segmentos da rede para os cenários I e III (de sentidos opostos). Percebe-se que a diferença dos valores observados para os dois cenários permanece praticamente constante para toda a extensão da rede, com exceção os trechos de maior e menor impacto. Observa-se que o maior impacto da rede apresentam valores idênticos para o indicador DMV e para a extensão da rede correspondida a esse trecho.

Com base nessas informações verifica-se que o indicador de desempenho de rede DMV é influenciado pelo sentido da demanda, uma vez que apresenta uma diferença praticamente constante para todas as observações. Contudo, o segmento de maior importância demonstrou ser o mesmo nos dois cenários.

Figura 41: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DMV nos cenários I e III

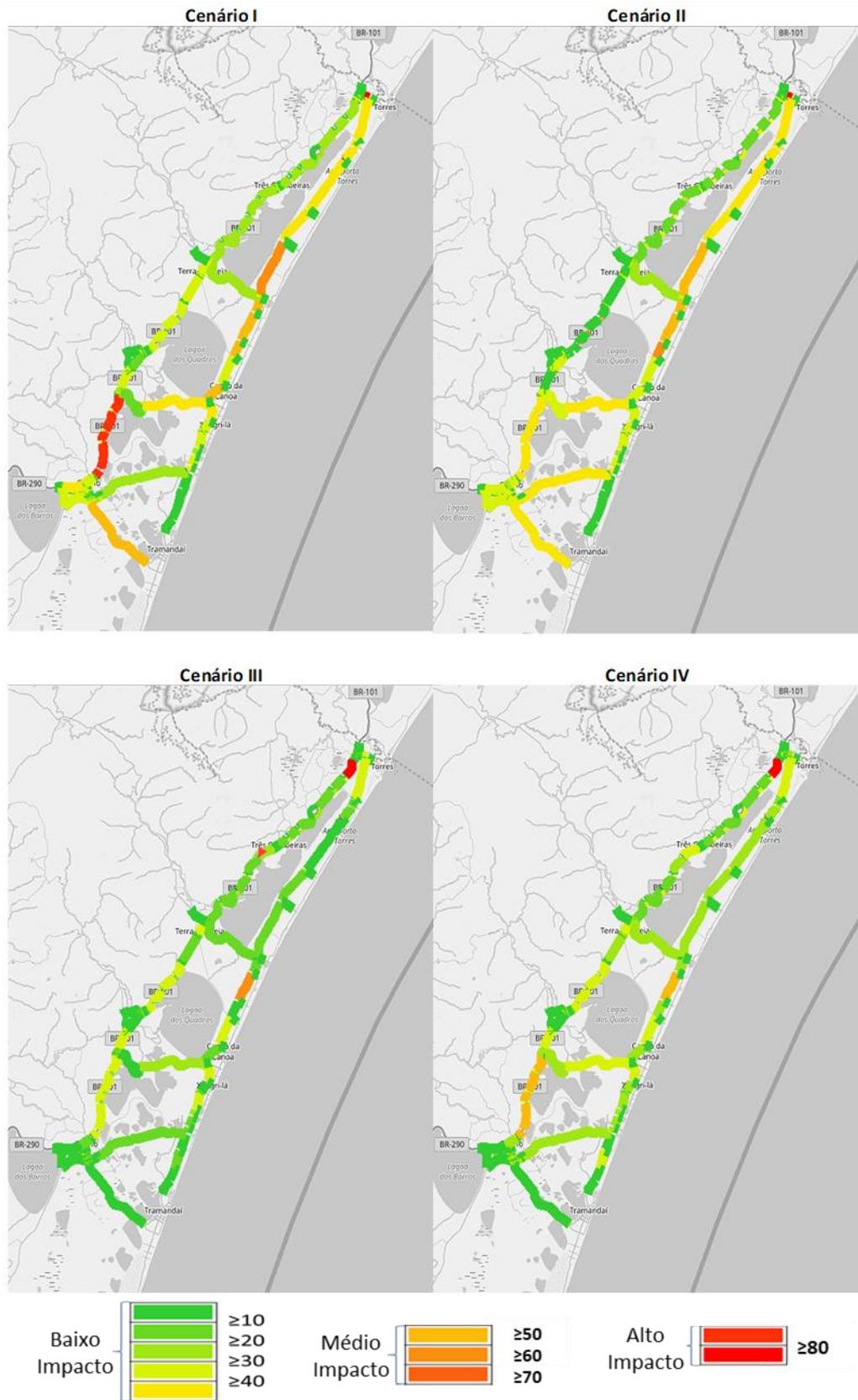


(fonte: elaborado pelo autor)

A classificação normalizada dos valores observados é apresentada na Figura 42. A partir desta classificação é possível identificar a importância de cada um dos segmentos para cada um dos cenários, identificando os trechos críticos para o indicador DMV.

Os segmentos foram normalizados de zero a cem e classificados a partir de uma escala conforme o nível de impacto observado decorrente da obstrução dos segmentos. No cenário I percebe-se que há dois trechos viários de alta importância para a rede. Estes trechos são o trecho entre a BR-101 e a praia de Torres ao norte da área de estudo e o trecho da BR-101 entre os municípios de Osório e Terra de Areia. O cenário II apresenta somente um trecho de alto impacto, este trecho está entre a BR-101 e a praia de Torres. Observando os cenários III e IV, percebe-se que o mesmo trecho é responsável pelo maior impacto na rede. Este trecho pertence a BR-101 e é próximo ao acesso da praia de Torres. Também se percebe que o impacto das demais observações é muito menor nos quatro cenários, provocando pequenas alterações na distância média de viagem.

Figura 42: Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – DMV



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

Verifica-se que o indicador apontou importância semelhante para segmentos de demandas de mesmo sentido. Entretanto considerando cenários de diferente sentido de demanda, o segmento priorizado é diferente. Porém, nos quatro cenários o indicador DMV apontou a existência de um trecho crítico que apresenta impacto nitidamente maior que os impactos decorrentes da obstrução dos demais segmentos.

Conclui-se que o impacto na rede viária decorrente da obstrução de cada segmento avaliado pelo indicador DMV apresentam uma distribuição semelhante em todos os cenários. Essa semelhança é maior entre os cenários de mesmo sentido de demanda. A distribuição das observações em intervalos demonstrou ser semelhante à distribuição normal, sendo que a maior concentração de observações ocorre em um intervalo central. Esta informação aponta que há poucos segmentos que registram um elevado impacto.

Por fim, o indicador DMV não apresentou um comportamento dentro do esperado frente ao incremento da demanda. Entende-se que a distância média das viagens é um bom indicador de desempenho de rede em muitos casos, porém não em condições onde a rede está saturada e o número de rotas alternativas entre pares O/D é limitado. Essa condição, quando somada a obstrução dos segmentos da rede, induz a piora das condições de funcionamento da rede pela saturação de rotas já existentes, porém não registrando um incremento na distância média das viagens. Sendo assim, se conclui que este indicador não pode ser utilizado para representar o desempenho da rede sozinho em redes saturadas com poucas rotas alternativas.

#### **5.1.4 AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO TOTAL DE ROTAS NA REDE (TRR)**

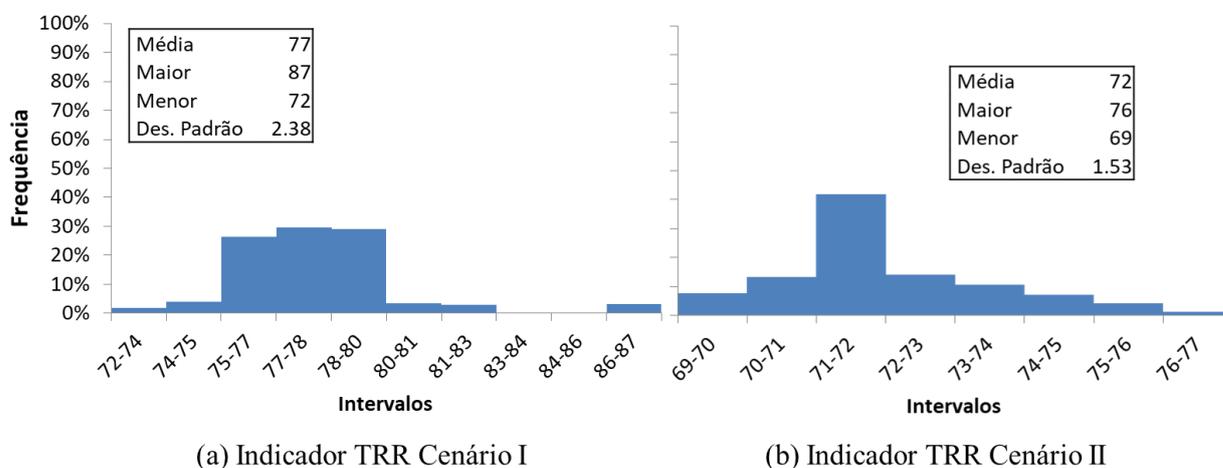
A Figura 43a apresenta os resultados do indicador TRR na análise no cenário I. Percebe-se que o maior valor observado para a obstrução de um segmento da rede é de 87 rotas e que o menor valor observado é de 72 rotas. Constata-se também que a amostra apresenta um valor médio de 77 rotas e um desvio padrão de 2,38. Comparando o maior valor encontrado com o valor médio, observa-se que este equivale a 1,12 vezes o valor médio e que o maior valor observado está 6,37 vezes o desvio padrão acima da média.

O histograma de frequência (Figura 43a) mostra a dispersão das observações do indicador TRR para o cenário I. Analisando a distribuição de frequências, observa-se que 85,1% das observações pertencem ao intervalo entre 75 e 80 rotas. Também é possível

observar que somente 3,1% das observações pertencem ao maior intervalo. Verifica-se com esta análise que há pouca dispersão dos resultados.

Observando os resultados do indicador TRR no cenário II apresentados na Figura 43b identifica-se que o maior valor observado para a obstrução de um segmento da rede é de 76 rotas e que o menor valor encontrado é de 69 rotas. Pode-se constatar que a média das observações é de 72 rotas e que a distribuição apresenta um desvio padrão de 1,53. Além disso, percebe-se que o maior valor observado corresponde a 1,06 vezes o valor médio e que o maior valor é 4,49 vezes o desvio padrão acima da média.

Figura 43: Histograma de distribuição do cenário I e II – TRR



(fonte: elaborado pelo autor)

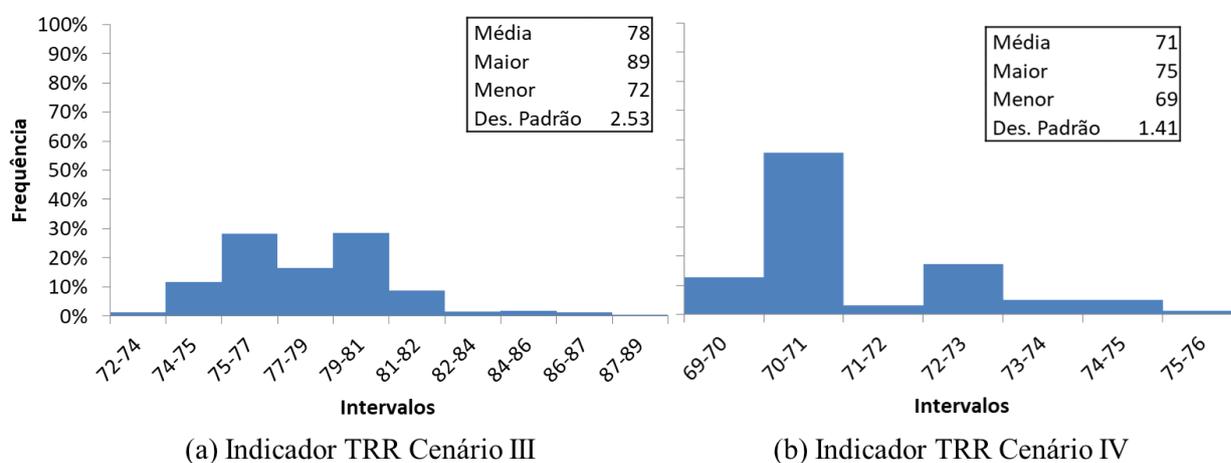
Analisando a distribuição das observações nos intervalos apresentada no histograma de frequência do cenário II (Figura 43b), percebe-se que 41,9% das observações do indicador TRR pertencem ao intervalo entre 71 e 72 rotas. Observa-se também que somente 1,2% das observações pertencem ao maior intervalo. Verifica-se com esta análise que os valores observados são mais distribuídos.

Na Figura 44a são apresentados os resultados do indicador de desempenho TRR no cenário III. O valor máximo observado para a obstrução de um segmento da rede é de 89 rotas e o menor valor observado é de 72 rotas. Pode-se perceber também que a média das observações é de 78 rotas e apresentam um desvio padrão de 2,53. Comparando o maior valor

encontrado com a média, observa-se que este é 1,14 vezes maior e que é 6,35 vezes o desvio padrão acima da média.

O histograma de frequência (Figura 44a) mostra a dispersão dos valores observados para as obstruções dos segmentos da rede. Constata-se que há dois intervalos com grande número de observações. Os intervalos que contém maior número de observações de total de rotas são os intervalos de 75 à 77 e de 79 à 81, respectivamente cada intervalo contém 28,2% e 28,5% observações. O maior intervalo (87 à 89 rotas) apresenta somente 0,5% das observações. Verifica-se com esta análise que há uma concentração dos valores observados.

Figura 44: Histograma de distribuição do cenário III e IV – TRR



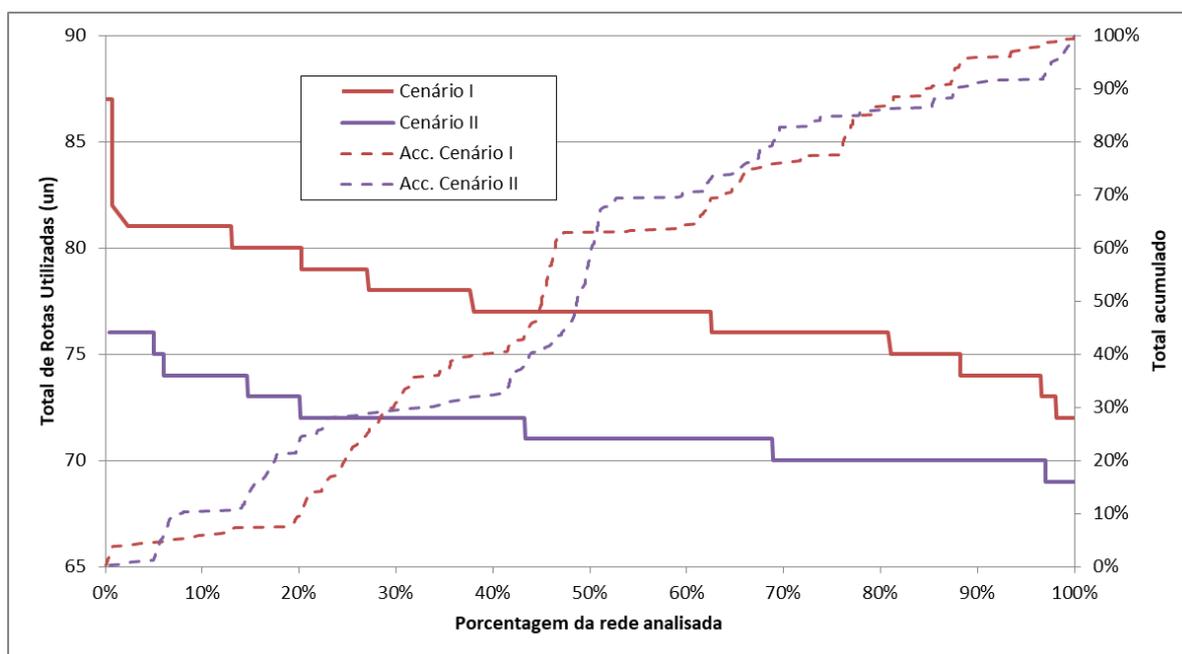
(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores do indicador TRR para a obstrução dos segmentos no cenário IV são apresentados na Figura 44b. Constata-se que o maior valor encontrado para a obstrução de um segmento é de 75 rotas e que o menor valor encontrado é de 69 rotas. Nota-se também que o valor médio das observações é de 69 rotas e que o desvio padrão é de 1,41. Comparando o maior valor com a média identifica-se que o maior valor corresponde a 1,06 vezes a média e que este é 4,33 vezes o desvio padrão acima da média.

Observando a distribuição de frequência dos valores encontrados para o TRR no cenário IV (Figura 44b), se identifica que o segundo intervalo apresenta maior número de observações e contém 55,4% do total das observações. O maior intervalo (75 à 76 rotas) apresenta somente 1,3% das observações.

Analisando a influência da intensidade da demanda no valor do indicador TRR são comparados os valores do indicador para os cenários I e II (Figura 45). A partir desta análise se percebe que os valores obtidos com a análise no cenário I sempre são superiores aos valores encontrados no cenário II. Essa diferença demonstra ser constante ao longo de toda a avaliação da rede. Constata-se que 50% do impacto acumulado nos cenários I e II correspondem, respectivamente, a 45,05% e 48,66% da extensão da rede analisada. Ambos os cenários apresentam a curva dos valores acumulados muito similares. Verifica-se com esta análise que a intensidade da demanda influencia de forma igual o impacto da obstrução de cada segmento, não apresentando diferença de influência sobre segmentos de maior ou menor impacto.

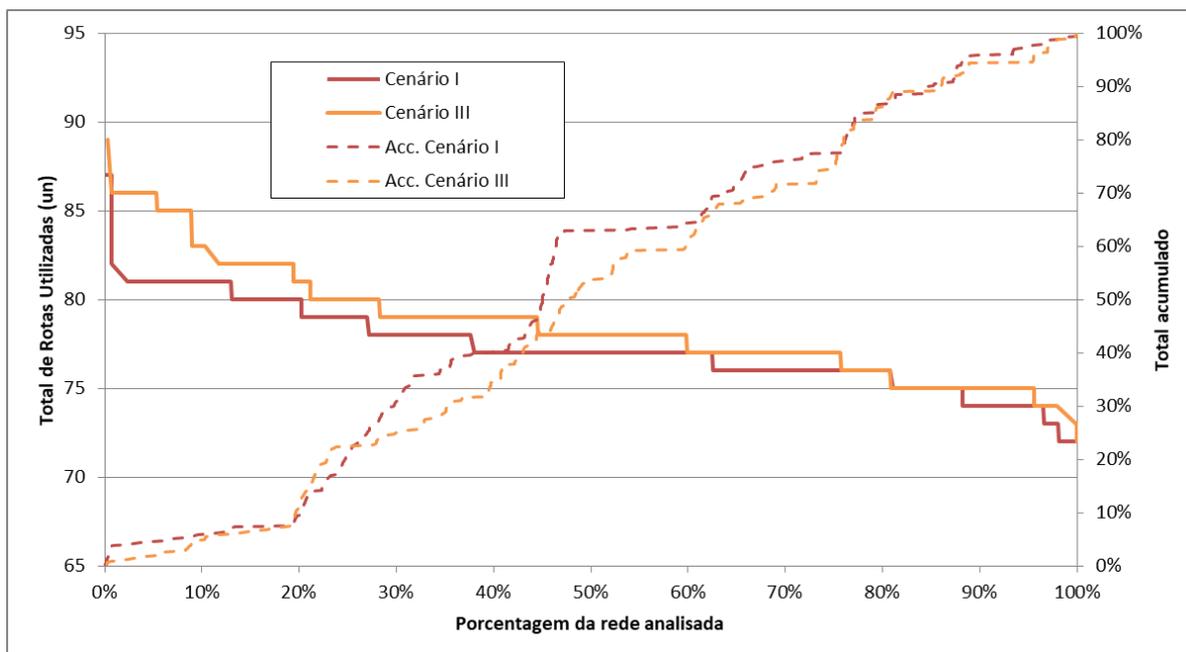
Figura 45: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador TRR nos cenários I e II



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando a Figura 45 identifica-se a sensibilidade do indicador em relação ao sentido da demanda através da comparação entre os cenários I e III. Apesar de que, de forma geral, os valores observados para o cenário III são maiores que os observados no cenário I, percebe-se que diversos trechos da rede apresentam mesmo valores de impacto observados. Verifica-se com esta análise que não há influência no sentido da demanda para este indicador.

Figura 46: Avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmento pelo indicador DMV nos cenários I e III

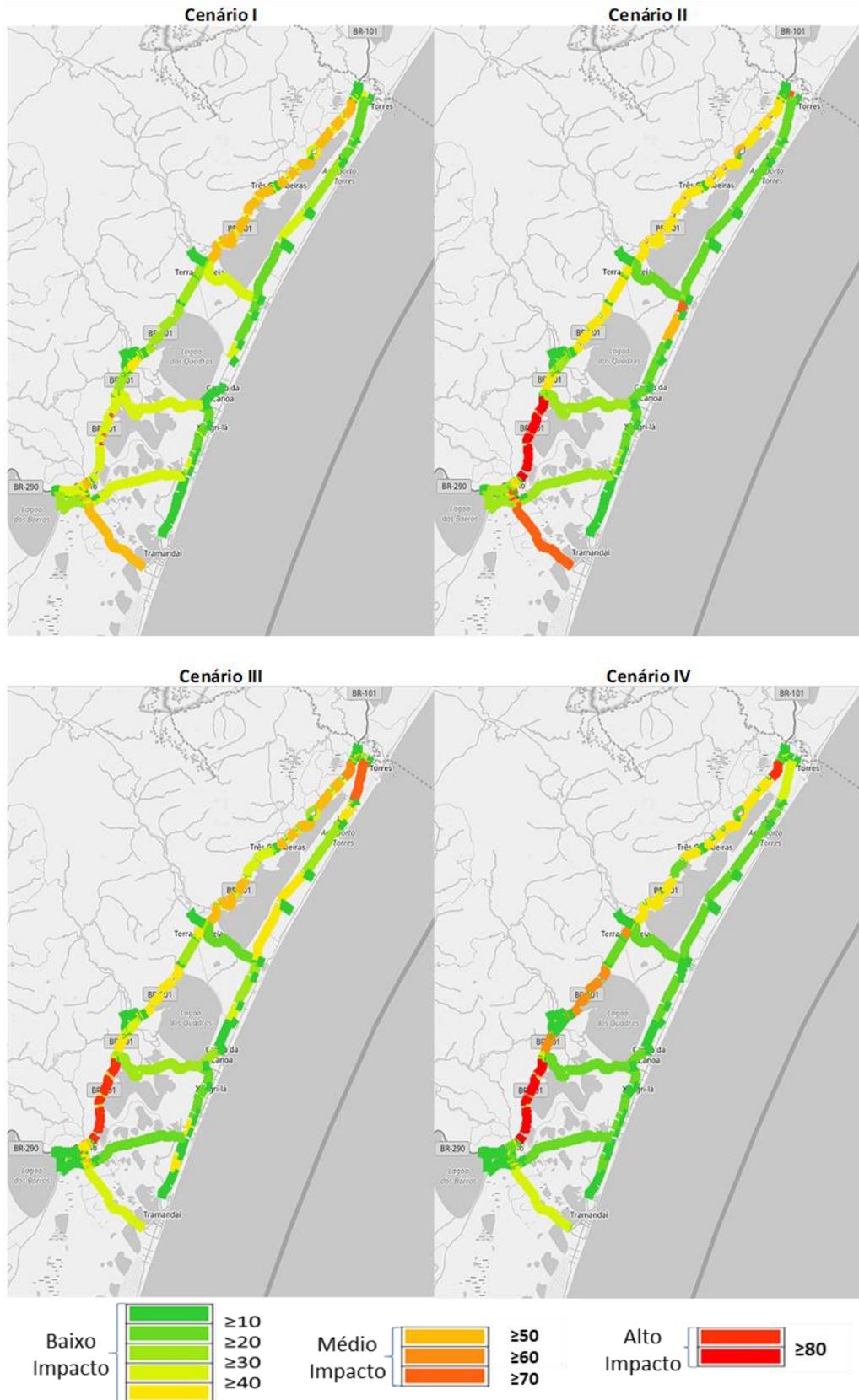


(fonte: elaborado pelo autor)

A classificação normalizada dos valores observados é apresentada na Figura 47. A partir desta classificação é possível identificar a importância de cada um dos segmentos para cada um dos cenários. Percebe-se que há grande diferença na identificação de segmentos mais críticos entre os cenários I e II. Apesar dessa diferença, nota-se que a BR-101 apresenta uma nota intermediária (em amarelo escuro). Comparando os cenários III e IV, constata-se uma grande semelhança entre a importância de cada trecho, priorizando o trecho da BR-101 entre os municípios de Osório e Terra de Areia.

Por fim, constata-se que o impacto na rede decorrente da obstrução de cada segmento avaliadas pelo indicador TRR apresenta diferentes distribuições de frequência entre os cenários. A distribuição de frequência das observações apresenta maior dispersão nos cenários II e IV, de baixa demanda. Nos cenários I e III, de alta demanda, a distribuição das observações apresenta maior concentração. Conclui-se que o indicador de desempenho TRR é sensível à demanda, apresentado incremento no número de rotas decorrente das obstruções (Figura 45) e não é influenciado diretamente sentido da demanda (Figura 46).

Figura 47: Comparação da classificação dos valores observados para todos os cenários – TRR



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

### 5.1.5 ANÁLISES E DISCUSSÕES SOBRE A AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO

Esta seção apresentou a comparação de diferentes métricas e critérios encontrados na literatura na avaliação desempenho da rede viária e importância dos seus segmentos para a rede viária do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Os indicadores de desempenho empregados na análise são os definidos na seção 4.4 do Capítulo anterior.

Os indicadores de desempenho não correlacionados apresentam diferentes distribuições de frequência para a avaliação dos impactos na rede decorrente da obstrução de cada segmentos da rede. Essa distribuição permite identificar se:

- a) O histograma de frequência é disperso, com alta variabilidade para os impactos de cada segmento. Nessa condição, há segmentos com relativa maior importância em relação aos demais;
- b) O histograma de frequência é compacto, com baixa variabilidade para os impactos de cada segmento. Nesta condição os impactos da obstrução dos segmentos tende a se aproximar do valor médio, indicando que, de forma geral, o impacto do segmento crítico é próximo do valor médio.

Além disso, ao normalizar e classificar o impacto decorrente das obstruções dos segmentos para cada indicador percebe-se que há diferença nos trechos priorizados da rede conforme o indicador considerado. Além disso, essa variação também pode ser percebida para cenários avaliados sobre diferentes condições de demanda para o mesmo indicador.

Apesar das diferenças na distribuição de frequência para os diferentes indicadores, percebe-se que em todos os casos há uma pequena extensão da rede viária associada à faixa de alto impacto na rede. A porcentagem de observações na faixa de cada valor para cada indicador de desempenho é apresentada Quadro 3. Essa extensão apresenta o valor máximo de 7,0% no caso do indicador TIV para a demanda do cenário I. Decorrente dessa constatação pode-se afirmar que são poucos os segmentos críticos da rede viária, ou seja, independente das condições de demanda e da métrica selecionada para se avaliar a rede viária há um conjunto de segmentos que é majoritariamente mais importante os demais. Dessa forma,

evitar com que essa parcela da rede viária seja obstruída é fundamental para evitar a ocorrência da pior situação possível na rede viária estudada.

Quadro 3 – Extensão ad rede viária acumulada na faixa de maior valor dos histogramas de distribuição de frequência para os indicadores de desempenho selecionados

Indicador	Cenários			
	I	II	III	IV
DTD	4.8%	1.2%	5.0%	1.3%
CRA	1.0%	1.9%	1.3%	2.3%
DMV	0.7%	0.7%	0.3%	0.3%
TRR	3.1%	1.2%	0.5%	1.3%

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se para os valores encontrados para os indicadores TTD, DTD e TMV que o incremento da demanda não acarreta a alteração da ordem de importância dos segmentos para a rede. Contudo, provoca o incremento na importância relativa dos segmentos na rede, tornando segmentos importantes muito mais importantes. Estes indicadores apresentaram uma dispersão dos valores observados para a obstrução dos segmentos da rede similar a uma distribuição logarítmica.

No indicador de desempenho TRR o incremento da demanda provoca um incremento no valor apresentado pelo indicador, porém este incremento ocorre de forma igual para todos os segmentos da rede. Apesar do incremento no impacto, não observa-se alteração na ordem entre os trechos priorizados nem na importância relativa entre a importância de cada segmento.

O indicador de desempenho CRA apresentou distribuições diferentes para os quatro cenários estudados. Além disso, verificou-se que a importância de cada segmento é altera com o incremento da demanda ou com a alteração do sentido. Entretanto, o trecho de maior importância é o mesmo nos cenários I e III.

Conclui-se que o tempo de viagem total na rede é uma informação trivial de desempenho do sistema viária, principalmente quando registrado pelo indicador DTD, quando há comparação entre o valor obtido da obstrução o segmento e o cenário base. Corroborando a metodologia apresentada por JENELIUS *et al.* (2006). Contudo, a abordagem da classificação dos segmentos por critérios relacionados exclusivamente ao tempo de viagem torna a avaliação limitada por não considerar a abrangência do impacto na rede viária.

Decorrente desse raciocínio entende-se que a relação entre medidas de intensidade e medidas de abrangência traria uma avaliação mais completa da real importância de cada segmento para a rede viária. Esta relação pode ser obtida a partir da avaliação conjunta dos diferentes indicadores de desempenho registrados na literatura.

## 5.2 ANÁLISE DE CLASSIFICAÇÃO CONJUNTA DOS SEGMENTOS E IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO DA REDE

Esta análise objetiva considerar o conjunto de indicadores de desempenho nos quatro cenários para classificar a malha viária e identificar o segmento crítico da rede. Nesta seção, primeiramente são apresentados os resultados da análise de classificação conjunta dos segmentos. Esta etapa consiste na classificação de cada um dos segmentos da rede viária considerando a avaliação conjunta dos indicadores de desempenho selecionados na etapa 4 do método apresentado, para os quatro cenários. Em seguida, é apresentado o segmento mais crítico da rede e sua localização. Por fim são apresentadas as discussões sobre esta análise.

### 5.2.1 AVALIAÇÃO CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO PARA A IDENTIFICAÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO

A avaliação conjunta dos indicadores de desempenho para identificar o segmento crítico tem como base a avaliação individual dos indicadores de desempenho selecionados na etapa 4 do método utilizado. Utilizou-se a classificação por Pareto em Classes A, B e C para realizar a avaliação individual dos segmentos para cada indicador. A classificação por Pareto divide a extensão total da rede em três Classes, respectivamente, A, B e C. Nesta classificação, a classe A representa a categoria de maior importância, correspondendo a 20% da extensão da rede viária de maior impacto. A classe C está relacionada com as observações de menor importância que correspondem aos 50% da extensão total da rede viária que apresenta menor impacto. A classe B corresponde aos 30% da extensão da rede viária de valores observados intermediários.

Após a classificação individual do impacto de cada segmento para os indicadores selecionados, realizou-se o teste estático probabilidade de significância (*p-value*) para verificar se havia diferença significativa entre cada Classe. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 11 – Resultados do teste ANOVA (F crítico e calculado) para avaliação de significância para os indicadores selecionados em todos os cenários

Indicador	Cenário I		Cenário II		Cenário III		Cenário IV	
	<i>F crítico</i>	<i>F calculado</i>						
DTD	3.018	568.3	3.018	523.5	3.019	1313.1	3.019	532.0
CRA	=	562.9		710.2		169.4		318.0
DMV	=	227.9		450.1		337.4		955.9
TRR	=	227.9		450.1		337.4		955.9

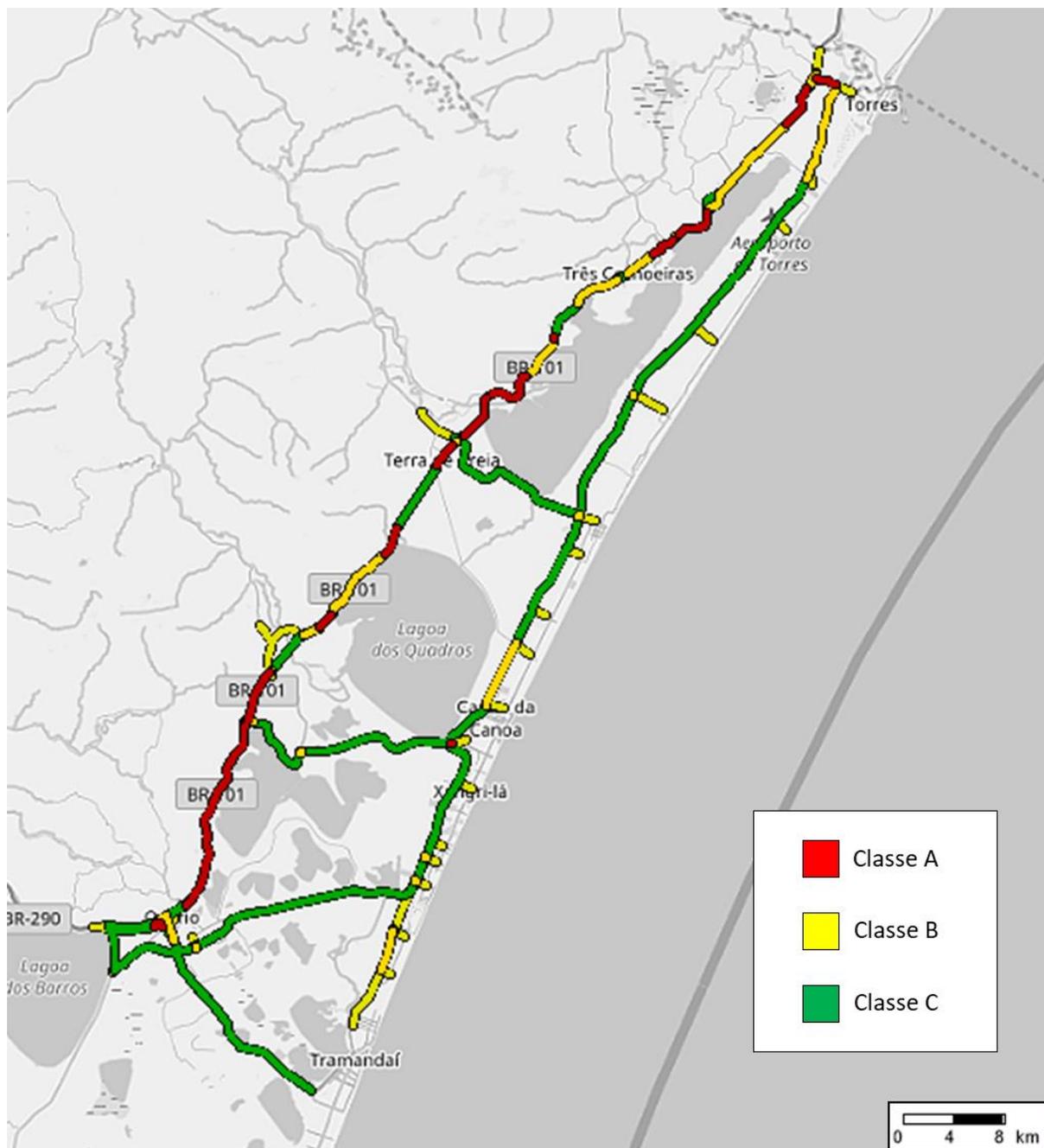
(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que em todos os cenários e para todos os indicadores selecionados houve diferença significativa entre as Classes A, B e C. Também se identifica que o maior *F calculado* foi o DTD no cenário III e o menor valor de *F calculado* foi encontrado no CRA do cenário III.

Tendo como base o resultado da análise ANOVA, consideraram-se todos os cenários para a avaliação conjunta dos indicadores. Para realizar essa tarefa, primeiramente foram comparadas as classificações A, B e C de todos os cenários e todos os indicadores. Assim, o segmento pertenceria a Classe A se, majoritariamente, fosse classificado nessa classe (essa classificação equivale a moda do conjunto de avaliações individuais atribuídas ao segmento pelos diferentes indicadores nos diferentes cenários). A metodologia foi aplicada para as Classes B e C também, classificando todos os segmentos da rede. Os resultados são apresentados na Figura 48.

Como resultado desta etapa, identificou-se que 15,5% da extensão total da rede foi avaliada como Classe A, 19,8% a foi classificada na Classe B e 64,7% corresponde a Classe C.

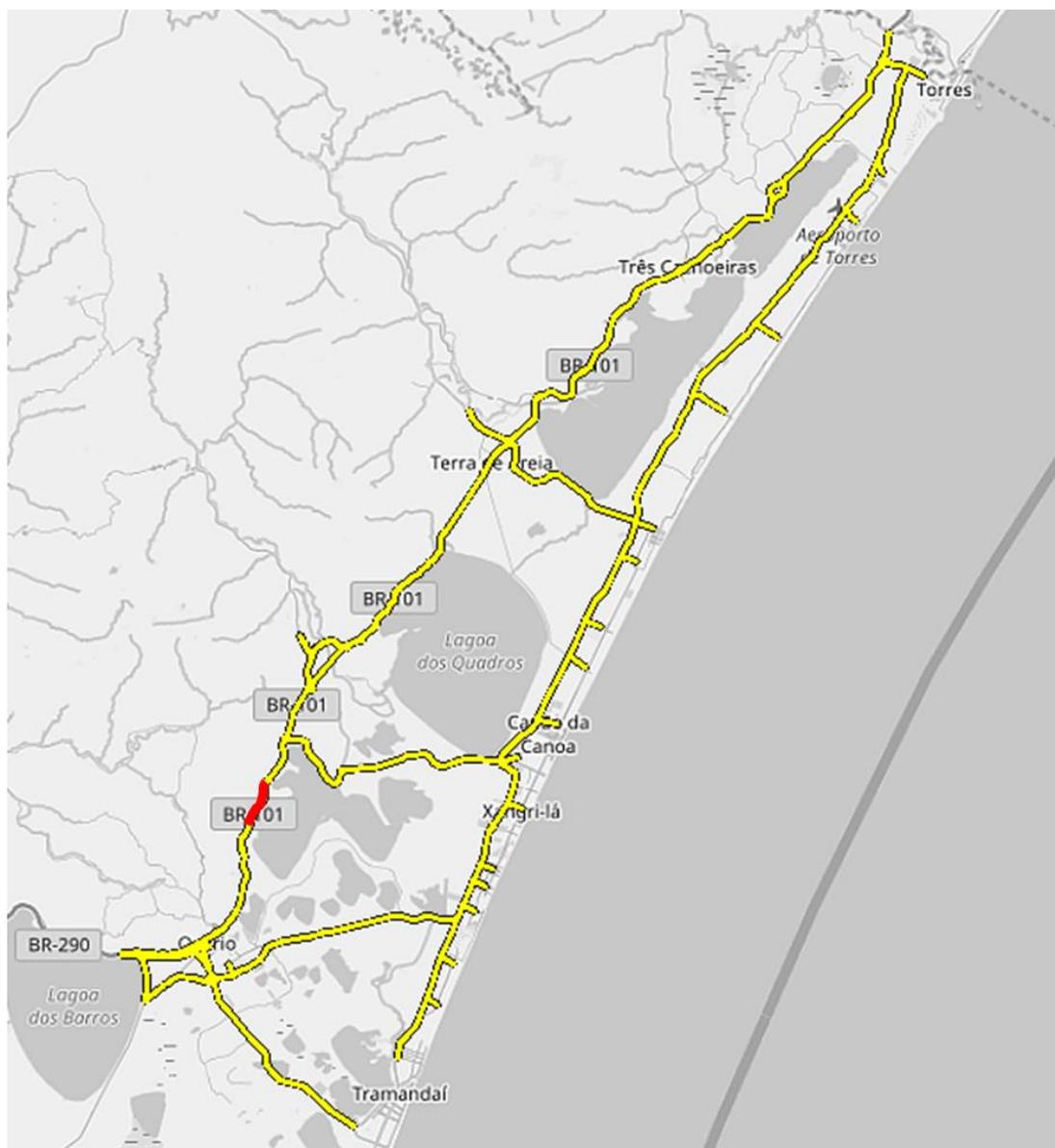
Figura 48 – Rede viária classificada nas Classes A, B e C considerando os indicadores de desempenho selecionados nos quatro cenários modelados



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

Para identificar o segmento crítico da rede, observou-se o segmento de maior frequência de ocorrência na Classe A para cada indicador em todos os cenários. O segmento crítico foi classificado na Classe A em 13 dos 16 casos. A Figura 49 ilustra o segmento apontado de maior importância da rede.

Figura 49 – Segmento crítico da rede viária indicado pela classificação conjunta dos indicadores de desempenho por Pareto



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

### 5.2.2 ANÁLISES E DISCUSSÕES SOBRE A AVALIAÇÃO CONJUNTA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

A avaliação da rede por Classe ABC de priorização mostrou-se adequada. No caso aplicado para a área de estudo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, indicou que 15,5% da extensão total da rede foi avaliada como Classe A, 19,4% a foi classificada na Classe B e 64,7% correspondente a Classe C, os valores são referentes aos apresentados na Figura 48.

Observando os resultados da região estudada (Figura 48), se identifica a BR-101 como rodovia que mais apresenta segmentos de alta importância na área de estudo, referentes à Classe A. Dentre esses, se destaca o trecho da BR-101 próximos do município de Osório e Torres que apresenta alta importância em toda a sua extensão. Apesar da aglomeração urbana na região litorânea nenhum trecho viário demonstrou apresentar importância de mesmo grau que os segmentos da BR-101 quando obstruídos.

A partir dos resultados esta análise pode-se definir com segurança a extensão da rede pode ser priorizada na distribuição de investimentos de reparo e de manutenção, visando diminuir a vulnerabilidade a eventos dos segmentos da Classe A. Do ponto de vista de eventos disruptivos, a obstrução de segmentos de Classe A provocam impacto muito acima da média na rede viária. Assim, para ventos disruptivos nestes trechos sugere-se a elaboração de planos de contingência e medidas estratégicas especiais.

Pode-se inferir que a classificação é útil para administradores de rodovias, uma vez que a análise discretiza a rede em categorias, permite realizar análises de custo benefício de diferentes alternativas de medidas de emergência a serem tomadas para obstruções em cada Classe. Dessa forma, segmentos de Classes B e C podem apresentar medidas mais brandas para mitigação dos impactos na rede viária, enquanto os segmentos de Classe A devem apresentar medidas severas de mitigação dos impactos.

A análise também permite facilitar a escolha de centrais de apoio. Uma vez sabendo a localização dos segmentos mais críticos, a central de apoio pode ser posicionada de forma estratégica a melhor atender esse grupo de segmentos críticos. Principalmente na ocorrência de eventos mais graves, como acidentes com cargas tóxicas que prejudicariam não somente os usuários da rede, mas também causariam impactos nas comunidades de forma econômica e ambiental.

### 5.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDE VIÁRIA DECORRENTE DA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO

Esta seção apresenta os resultados da avaliação estática e dinâmica dos impactos na rede viária decorrente da obstrução do segmento crítico identificado na seção 5.2.1 deste capítulo.

Em seguida, é realizada a comparação dos processos de alocação estática e dinâmica na obstrução do segmento crítico da rede.

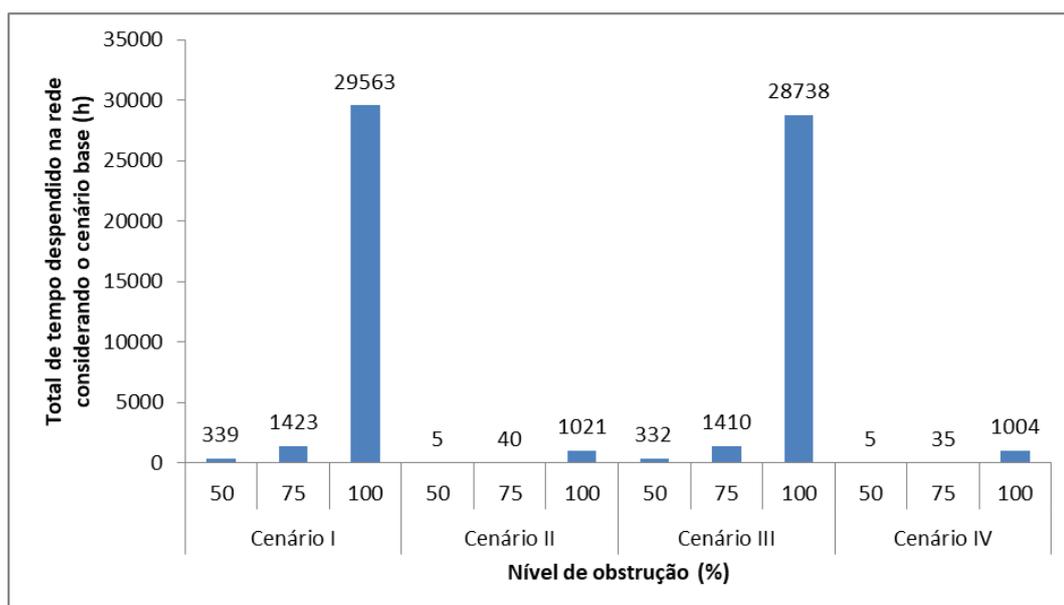
### 5.3.1 AVALIAÇÃO ESTÁTICA DOS IMPACTOS NA REDE

Esta seção objetiva investigar os valores dos indicadores de desempenho de rede para avaliar diferentes níveis de obstrução do segmento crítico. Os resultados desta avaliação são apresentados a seguir. A rede viária do caso estudado foi avaliada para os indicadores DTD, CRA, DMV e TRR nos cenários I, II, III e IV para três níveis de obstrução. Os níveis de redução de capacidade são 50%, 75% e 100%. No final desta seção são feitas análises e discussões após a exposição dos resultados encontrados.

#### 5.3.1.1 Total de tempo despendido na rede considerando o cenário base - DTD

Os resultados registrados pelo indicador DTD na comparação dos cenários I, II, III e IV para reduções de 50, 75 e 100% da capacidade do segmento crítico são apresentados na Figura 50. Constata-se que, em todos os cenários, quanto mais intensa é a obstrução, mais severo é o impacto na rede viária. Observando o crescimento do indicador em função do nível de redução da capacidade, percebe-se que o maior crescimento ocorre nos cenários de alta demanda (I e III).

Figura 50 – Análise do tempo total despendido na rede considerando o cenário base para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários



(fonte: elaborado pelo autor)

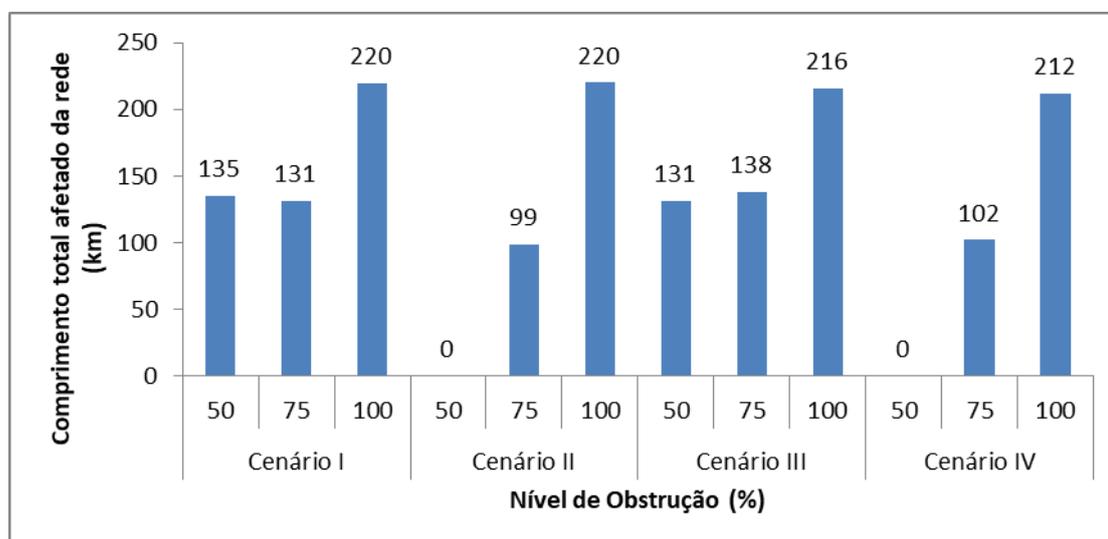
Para o cenário I, constata-se que o impacto decorrente da redução de 100% da capacidade do segmento crítico é 19 vezes maior que o impacto para a redução de 75% da capacidade. Comparando o impacto das reduções de 50% e 75% da capacidade, o valor do indicador é somente 3,2 vezes maior. Constata-se também que, no caso das obstruções com restrição de capacidade de 50% e 75% para os cenários de baixa demanda (II e IV), praticamente não há impacto na rede viária.

A partir desta análise constata-se que a relação entre o nível da obstrução e o impacto na rede viária não é linear para a obstrução do segmento crítico da rede estudada. Também se verifica que mesmo um segmento crítico da rede, pode não apresentar impacto dependendo do nível de obstrução e do nível da demanda.

### 5.3.1.2 Comprimento total da rede afetada - CRA

A Figura 51 apresenta os resultados encontrados para o indicador de desempenho comprimento total da rede afetado decorrente de diferentes níveis de obstrução. São comparados os cenários I, II, III e IV.

Figura 51 – Análise do comprimento total afetado da rede para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários



(fonte: elaborado pelo autor)

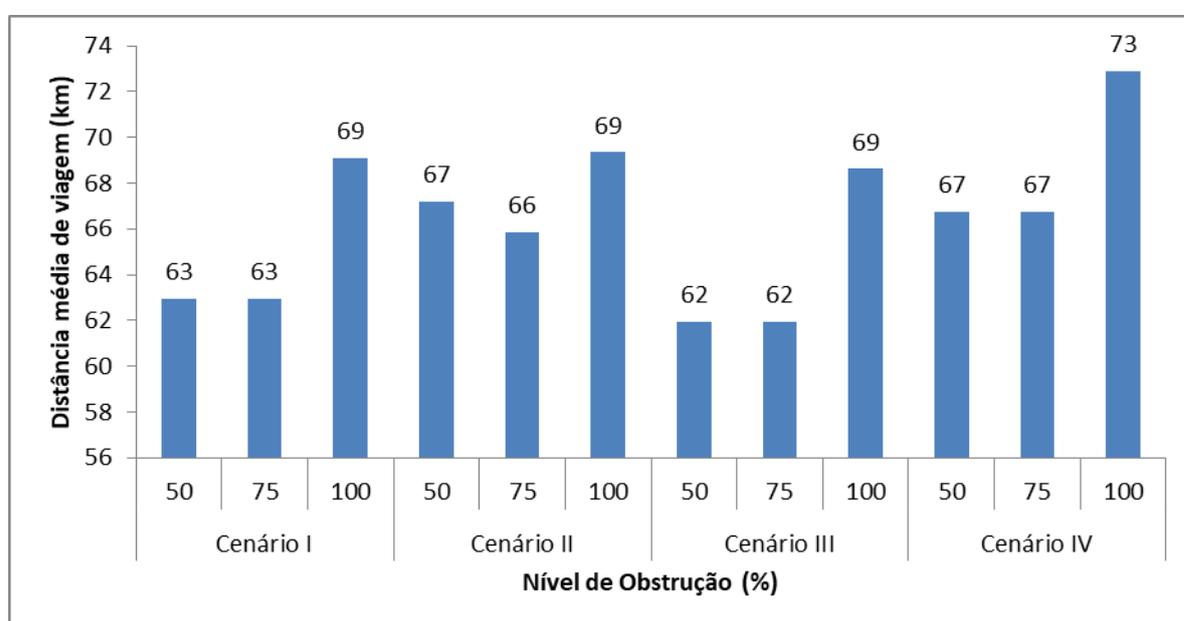
Percebe-se que independente do sentido, todos os cenários apresentam valores similares do indicador CRA para a obstrução de 100% da capacidade, porém esse comportamento não se repete para as obstruções de menor intensidade. Constata-se que o

indicador é sensível à variação da intensidade da demanda, ao contrário do apontado a seção 5.1.2 deste Capítulo. Observa-se também que os cenários II e IV não apresentam valor para o nível obstrução e 50%.

### 5.3.1.3 Distância média de viagem - DMV

Os resultados da avaliação da rede pelo indicador DMV para diferentes níveis de obstrução são apresentado na Figura 52. Observa-se que em todos os cenários a maior distância média de viagem ocorreu no cenário IV e corresponde a média de 73 km.

Figura 52 – Análise da distância média de viagem para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários



(fonte: elaborado pelo autor)

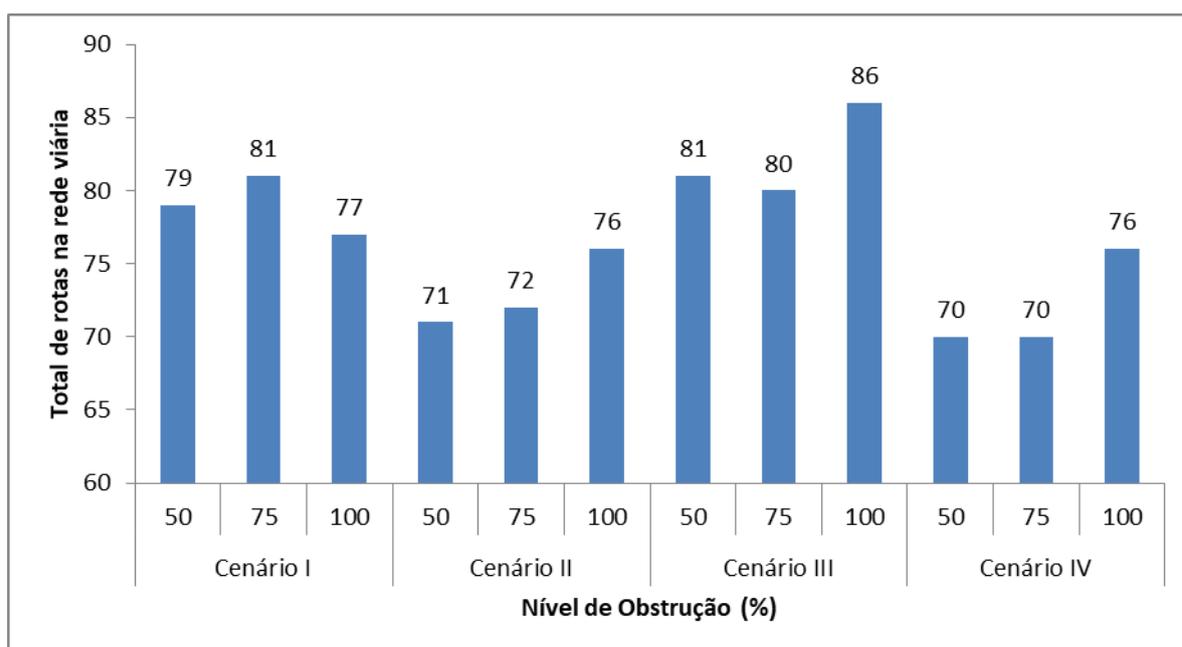
Avaliando os resultados apresentados na Figura 52 observa-se que o maior crescimento do indicador DMV é de 111% no cenário III quando o nível de obstrução passa de 75% para 100%. Também é possível constatar que a distância média de viagem apresenta resultados confusos, no caso do cenário II apresenta uma diminuição do valor apontado pelo indicador para o incremento do nível de obstrução, no caso do cenário IV apresenta o maior valor observado num cenário de baixa demanda, agindo de forma contra intuitiva.

#### 5.3.1.4 Total de rotas na rede - TRR

A Figura 53 apresenta os resultados observados para o indicador TRR na rede viária para os quatro cenários modelados sujeitos a diferentes níveis de restrição da capacidade. O maior valor observado é no cenário III onde é registrada a existência de 86 rotas na rede viária. Identifica-se que, com exceção do cenário I, todos os demais registraram o maior número de rotas no cenário de maior nível de obstrução.

Constata-se que nos cenários saturados (cenário I e III) o indicador não reage de forma constante ao incremento do nível da obstrução. Todavia em cenários sujeitos a uma baixa demanda (II e IV) o indicador aponta que há um incremento no número de rotas utilizado na rede viária para um incremento no nível da obstrução de um segmento crítico.

Figura 53 – Análise do total de rotas utilizadas na rede viária para diferentes níveis de obstrução em todos os cenários



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.3.1.5 Análises e discussões sobre a avaliação estática dos impactos na rede

Esta seção apresentou a aplicação de diferentes indicadores de desempenho de rede para avaliar a obstrução do segmento crítico da rede viária do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. A rede viária foi avaliada para os indicadores DTD, CRA, DMV e TRR em quatro cenários de

demanda distintas, formam avaliados três diferentes níveis redução da capacidade do segmento crítico, sendo elas 50%, 75% e 100%.

O indicador de desempenho DTD é um indicador de desempenho sensível à variação demanda, porém a alteração do sentido da demanda não provoca mudança significativa nas medições de desempenho apontadas por esse indicador. Comparando os cenários de alta e baixa demanda, o DTD apresenta resultados até 19 vezes maior para a mesma obstrução. O DTD, também apresentou comportamento dentro do esperado para diferentes níveis de obstrução.

O indicador de desempenho CRA apresentou resultados similares em todos os cenários para a redução de 10% da capacidade do segmento crítico, porém para obstruções de menor intensidade os resultados foram distintos. Nos cenários I e III o indicador não apresentou diferença para os níveis de obstrução de 50% e 75%. Contudo para os cenários II e IV não foram registrados extensão da rede com incremento de volume para a obstrução de 50%. Ao verificar que o indicador apresenta diferentes valores nas reduções de capacidade de 50% e 75% nos distintos cenários identificou-se que o indicador é sensível a variação da intensidade da demanda, ao contrário do apontado na avaliação considerando somente a obstrução de 100% de redução da capacidade.

O indicador de desempenho DMV apresenta sempre maior valor observado para o maior nível de obstrução para os quatro cenários. Porém, para outros níveis de redução de capacidade não apresenta um comportamento esperado. Os valores observados oscilam, não apresentando conformidade.

O indicador de desempenho TRR apresentou ser um bom indicador de desempenho em redes não saturadas (cenários II e IV de baixa demanda). Nestes cenários quanto maior o nível de obstrução maior o número de rotas na rede. Contudo, em cenários de alta demanda (I e III), onde a rede tende a ser saturada, o indicador TRR não apresentou essa relação. Assim, este indicador não é adequado para rede com poucas rotas alternativas.

Percebe-se que os indicadores de desempenho apresentam comportamento diferente para diferentes níveis de obstrução. O indicador DTD aponta ter um relação exponencial com crescimento do nível de obstrução, muito nítida nos cenários de alta demanda. O indicador

CRA, para obstruções de 100% da capacidade, independente do sentido ou intensidade da demanda apresenta o mesmo resultado. O indicador TRR aparenta ter uma relação linear para diferentes níveis de obstrução, porém somente para cenários não saturados.

Para isso, entende-se que o uso de indicadores de desempenho para a avaliação de impactos na rede viária deve ser empregado considerando aspectos morfológicos, como o aspecto de conectividade apresentados por QIANG e NAGURNEY (2008) e LATORA e MARCHIORI (2004). Contudo, deve ser também relacionado com a condição que a demanda é atendida frente à obstrução do segmento da rede, averiguando a abrangência e a intensidade do impacto. Não foi encontrado trabalho na literatura que conciliasse esses aspectos em um único modelo de hierarquização de segmentos de redes viárias.

### **5.3.2 AVALIAÇÃO DINÂMICA DOS IMPACTOS NA REDE**

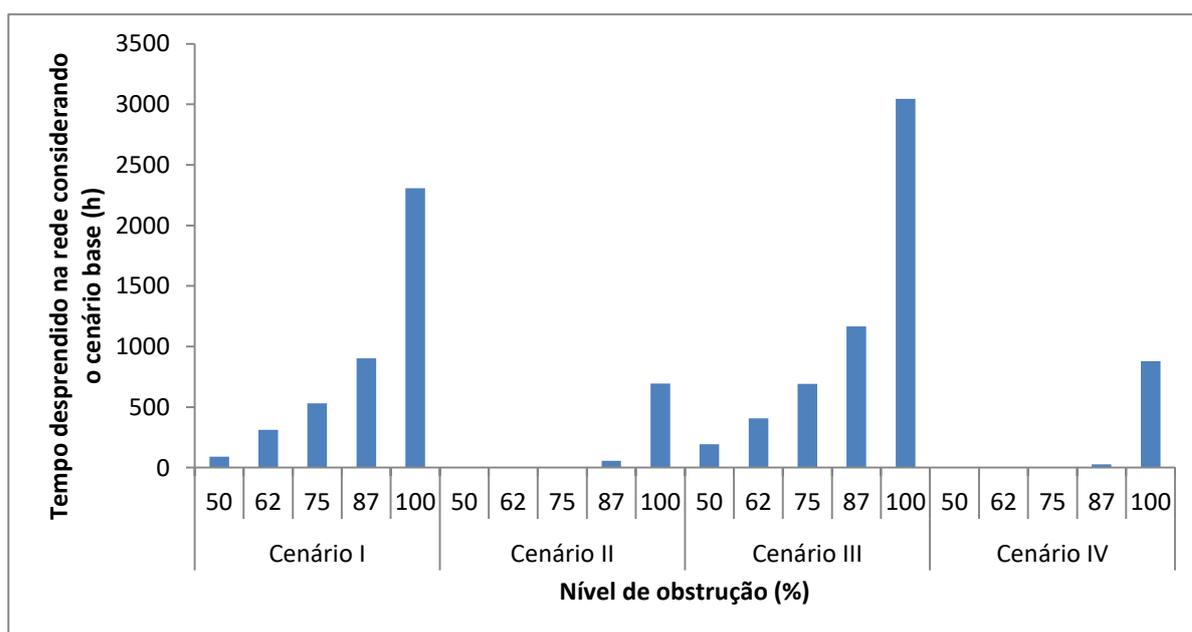
Esta seção apresenta os resultados da aplicação de indicadores de desempenho de rede para avaliar diferentes níveis de obstrução do segmento crítico. Também são apresentadas as avaliações da rede para diferentes níveis de duração da obstrução e de diferentes horários de ocorrência da obstrução. A rede viária foi avaliada para os indicadores DTD, CRA, DMV e TRR nos cenários I, II, III e IV para cinco níveis de obstrução. Os níveis de redução de capacidade são 50, 62,5, 75, 87,5 e 100%. No final da seção são apresentadas algumas análises e discussões sobre a análise dinâmica da obstrução de um segmento crítico da rede viária.

#### *5.3.2.1 Total de tempo despendido na rede viária considerando a base – DTD*

A Figura 54 apresenta os resultados agregados da análise dinâmica para o total de tempo despendido na rede considerando o cenário base. Constata-se que, em todos os cenários, quanto maior a intensidade da obstrução maior é o tempo adicional despendido na rede. Também se identifica que os cenários I e III registram um maior incremento no valor observado para a mesma intensidade de obstrução. Os cenários II e IV não apresentam tempo adicional despendido na rede para as obstruções de níveis 50, 62,5 e 75%, esta relação provavelmente ocorre, pois o fluxo de veículos no ponto deve ser tal que não excede a capacidade do segmento, mesmo quando a capacidade neste ponto for reduzida. Por fim, constata-se uma forma exponencial de relação entre o valor do indicador e o valor da intensidade da obstrução. Apesar dos cenários II e IV apresentarem um menor valor

observado, o incremento do impacto na rede é mais intenso para estes, no cenário II e IV há um crescimento de 19,39 vezes o valor observado quando ocorre o aumento do nível de obstrução de 87,5% para 100%. Porém no caso dos cenários de alta demanda, este mesmo crescimento ocorre de forma mais gradual. Para o caso do cenário I o crescimento do impacto na rede é de 178% quando há o crescimento do nível de obstrução de 87,5% para 100%, já no caso do cenário III o crescimento é de 161% para o mesmo o aumento de nível de obstrução.

Figura 54 – Análise dinâmica do total de tempo despendido na rede considerando a base para diferentes níveis de obstrução em todos os



(fonte: elaborado pelo autor)

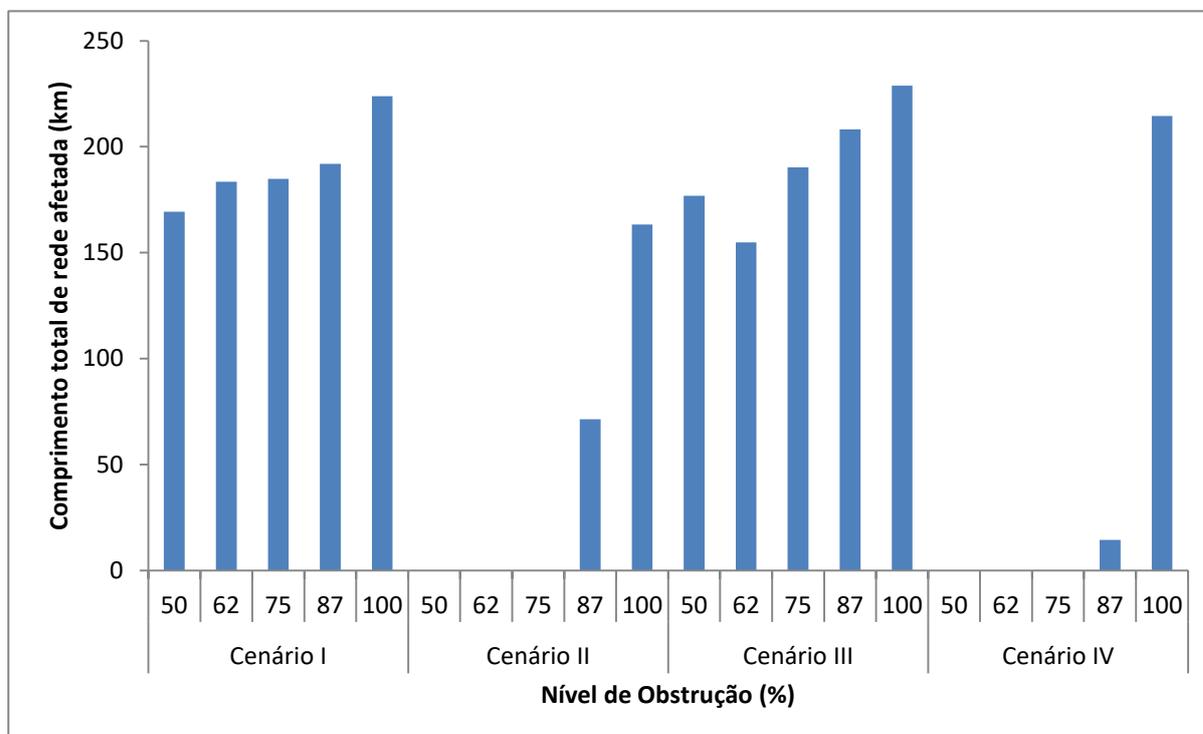
### 5.3.2.2 Comprimento total da rede com incremento de volume – CRA

O impacto na rede viária para diferentes níveis de obstrução do segmento crítico avaliado pelo indicador de desempenho CRA é apresentado na Figura 55. Nesta análise é possível observar as mudanças do valor observado para diferentes níveis de obstrução em cada um dos cenários.

Nesta análise, se constata que o cenário III apresenta o maior valor medido pelo indicador para a redução de 100% da capacidade. Porém este valor é muito próximo dos calculados nos cenários I e IV para o mesmo nível de redução de capacidade. Identifica-se que, exceto a observação do cenário III para redução de 62,5% de capacidade, todas as observações apresentam um valor crescente do indicador CRA em relação à intensidade da

obstrução. Além disso, se identifica que não há valor observado para as reduções de 50, 62,5 e 75% da capacidade nos cenários II e IV.

Figura 55 – Análise dinâmica do comprimento total de rede com incremento de volume para diferentes níveis de obstrução em todos os



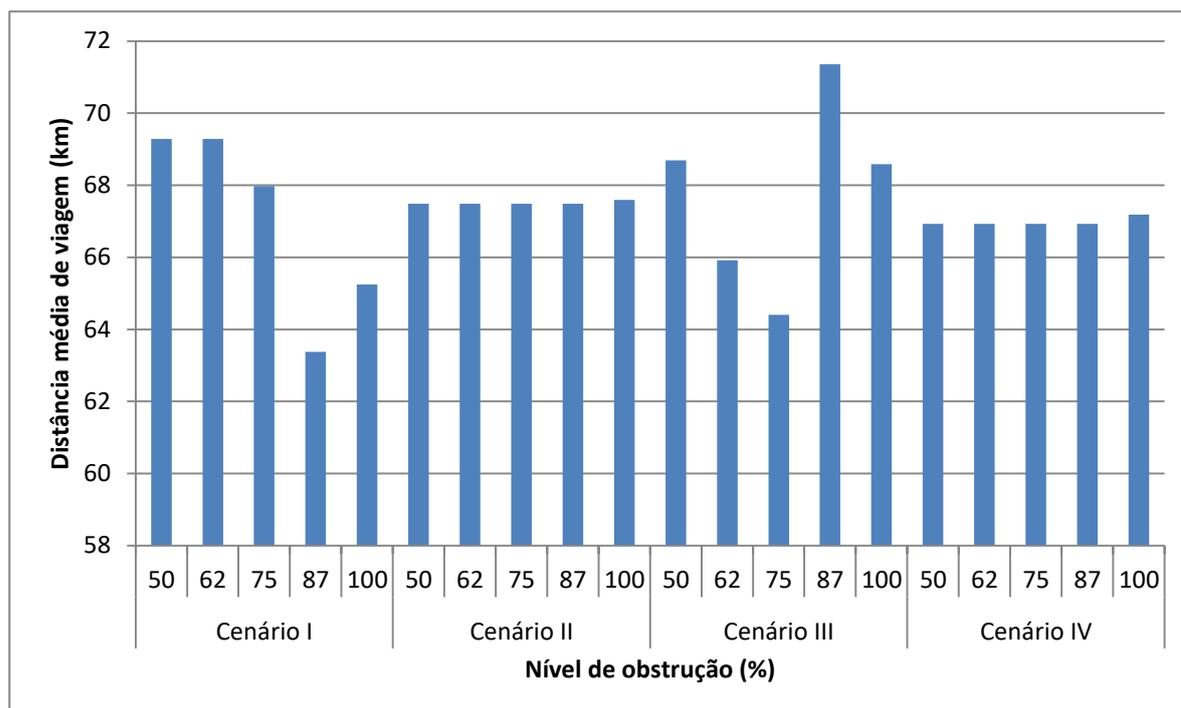
(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.2.3 Distância média de viagem – DMV

Os impactos na rede viária para diferentes níveis de obstrução do segmento crítico avaliado pelo indicador de desempenho DMV são apresentado na Figura 56. Observa-se que o maior impacto na rede viária ocorre no cenário III para a redução de 87,5% da capacidade do segmento crítico da rede.

Constata-se que para os cenários II e IV (de baixa demanda), a distância média de viagem apresenta um valor constante, até a redução de 100% da capacidade do segmento crítico. Esse comportamento não ocorre nos cenários de alta demanda. Nos cenários I e III se identifica que não há relação direta entre o valor observado e a intensidade da obstrução. Esse comportamento possivelmente ocorre devido à saturação dos cenários I e III aliando há limitação de rotas disponíveis na rede.

Figura 56 – Análise dinâmica da distância média de viagem para diferentes níveis de obstrução em todos os

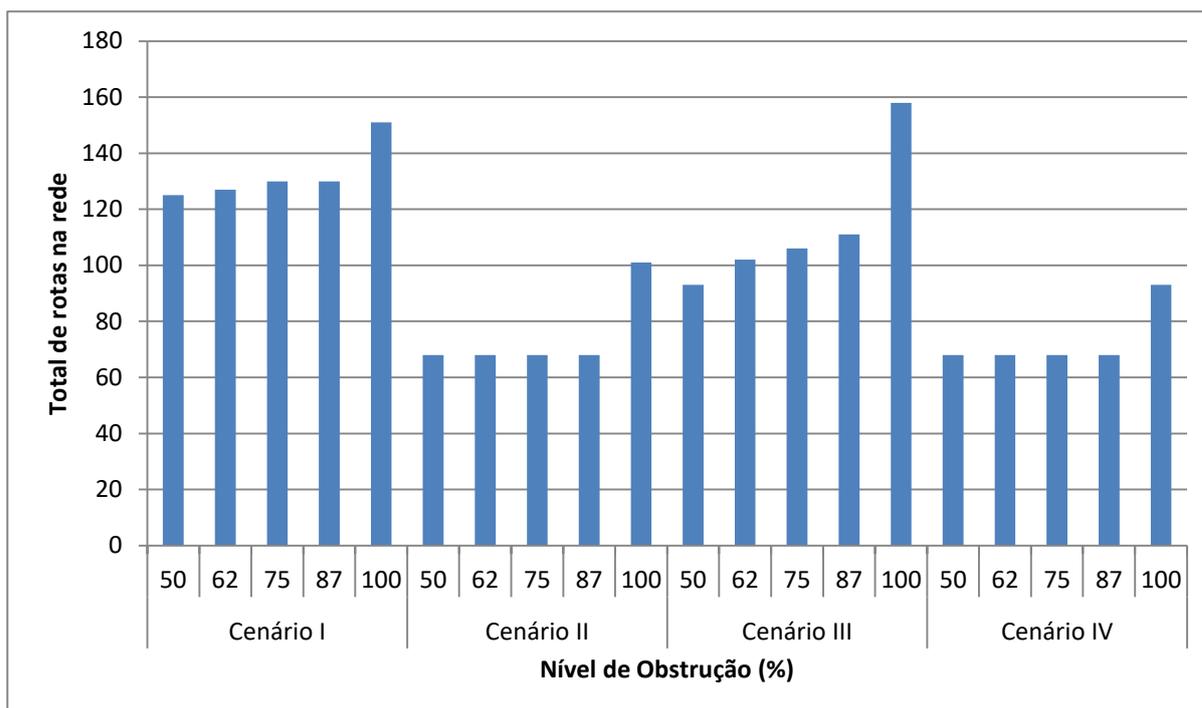


(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.3.2.4 Total de rotas utilizada na rede – TRR

A Figura 57 apresenta o total de rotas utilizadas na rede para os diferentes níveis de obstrução nos quatro cenários. É possível perceber em todos os cenários que conforme ocorre o incremento do nível de obstrução ocorre o incremento do número de rotas utilizadas na rede. O maior valor observado é de 158 rotas e ocorre no cenário III para a obstrução de 100% da capacidade. Além disso, se identifica que os cenários de alta demanda apresentam maior valor observado para todos os níveis de obstrução.

Figura 57 – Análise dinâmica do total de rotas utilizadas na rede para diferentes níveis de obstrução em todos os



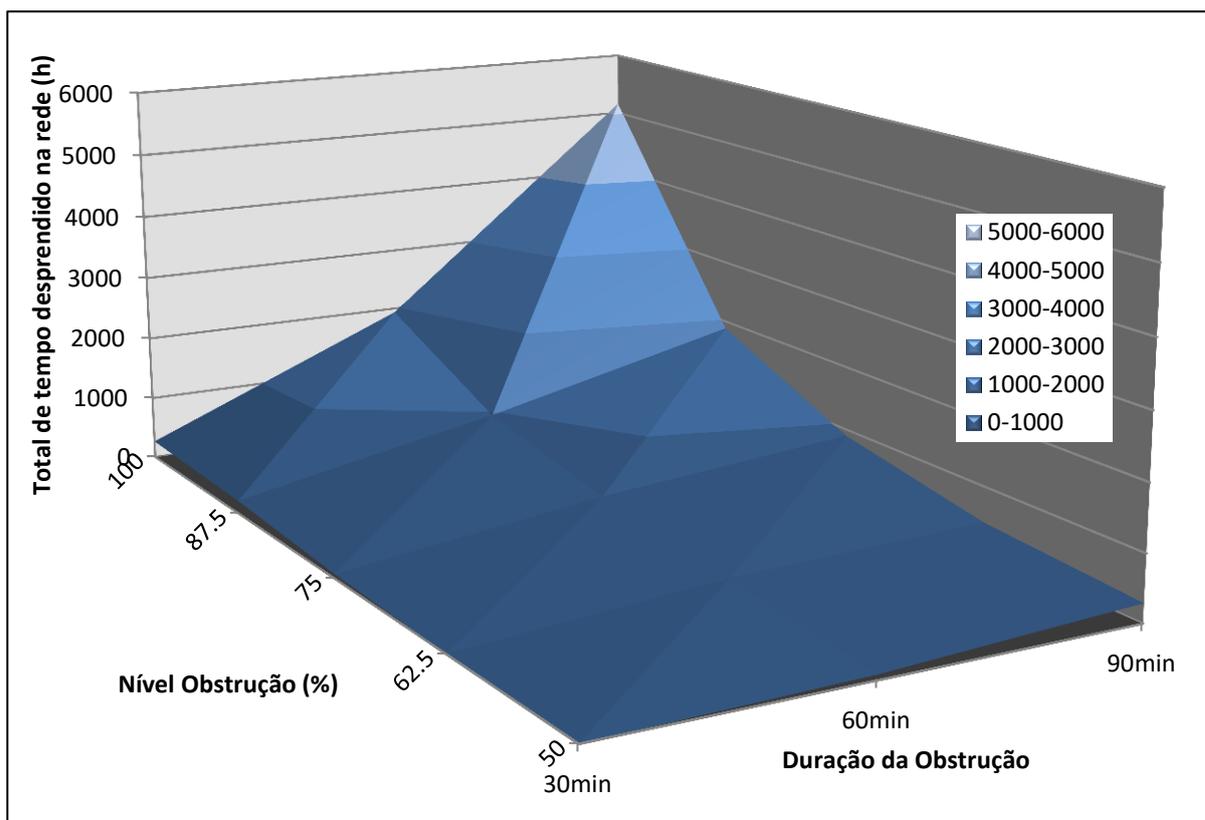
(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.3.2.5 Comparação da duração da obstrução para o DTD no caso do cenário I

Considerando o cenário I foi explorada a vantagem da alocação dinâmica de adicionar um caráter temporal para o evento de obstrução do segmento. A Figura 58 apresenta a superfície resposta da análise para obstruções de diferentes durações da obstrução e de diferentes intensidades de redução da capacidade do segmento crítico a partir do indicador DTD. Identifica-se que, conforme ocorre o incremento da intensidade e da duração da obstrução ocorre o aumento do valor do tempo total despendido na rede.

Comparando a intensidade do impacto na rede viária, observa-se que, para o caso da obstrução de duração de 30 minutos, a obstrução com redução de 100% da capacidade é 309% maior que a redução de 75% da capacidade. Para a obstrução de duração de 60 minutos a relação entre as mesmas intensidades de obstrução registra o crescimento de 245% e no caso de obstrução de duração de 90 minutos o impacto na rede viária é 475% maior.

Figura 58 – Avaliação da duração da obstrução segundo o DTD para diferentes níveis de obstrução



(fonte: elaborado pelo autor)

Observando do ponto de vista do nível de obstrução, no caso da redução de 75% da capacidade, comparando as obstruções de 30 e 90 minutos de duração, registra-se que há um crescimento de 1281% do tempo total despendido na rede viária. No caso da redução de 100% da capacidade, comparando os impactos das obstruções de 30 e 90 minutos de duração registra-se o crescimento de 1840%.

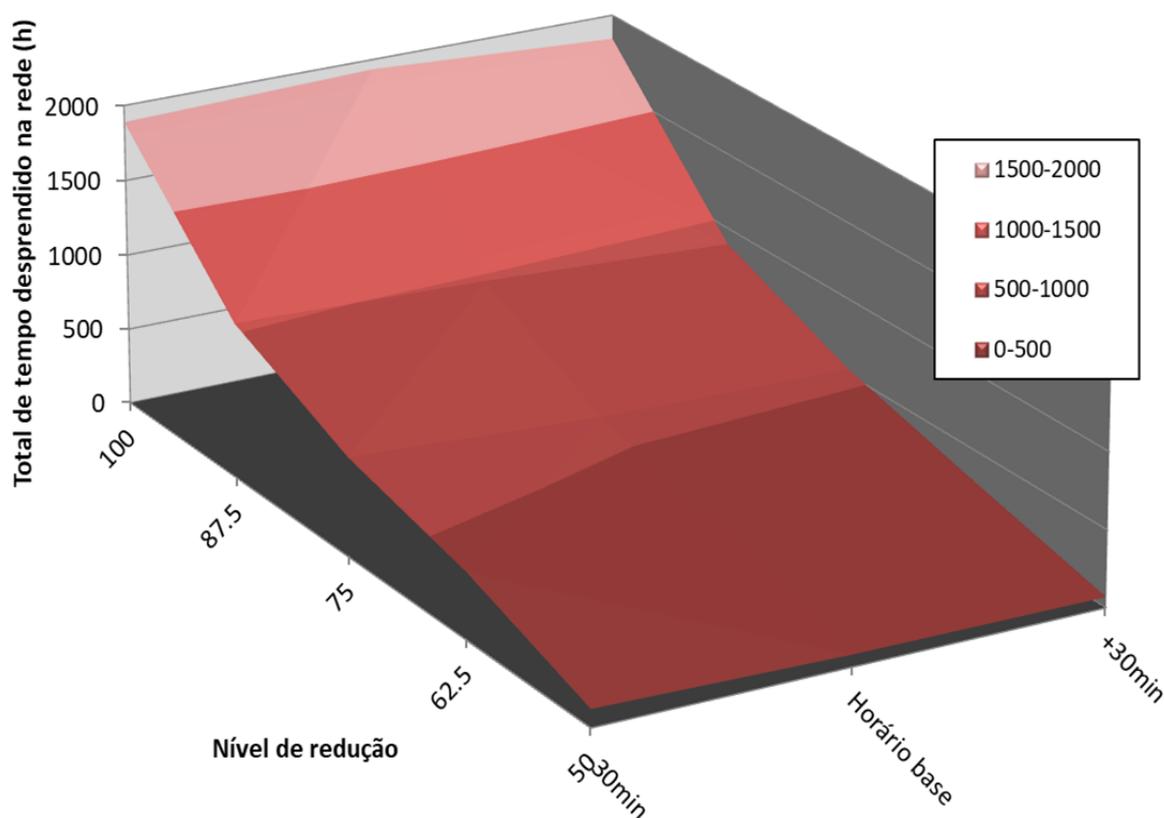
#### 5.3.2.6 Comparação do horário de início da obstrução do DTD no caso do cenário I

Outra vantagem do uso da análise dinâmica é possibilidade de alocar a obstrução em intervenção no tempo, escolhendo assim o tempo exato de ocorrência de uma intervenção. Assim, a intervenção de 60 minutos (base) foi testada com 30 minutos de atraso do horário original e 30 minutos de antecedência.

Optou-se novamente pelo DTD no cenário I para avaliar essa propriedade. Os resultados são apresentados na Figura 59. Observa-se que não há diferença no impacto na rede viária decorrentes do deslocamento de 30 minutos do horário da intervenção. Possivelmente, por se

tratar de um horário de alta demanda e a demanda não oscilar de maneira significativa dentro do período analisado, a mudança do horário da intervenção não ocasiona alterações perceptível no valor do impacto na rede viária registrado pelo indicador.

Figura 59 – Avaliação do horário da obstrução segundo o DTD para diferentes níveis de obstrução



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.2.7 Análise e discussões sobre a avaliação dinâmica dos impactos na rede

Esta seção apresentou a aplicação de diferentes indicadores de desempenho de rede para avaliar a obstrução do segmento crítico da rede viária do Litoral Norte do Rio Grande do Sul de forma dinâmica. A rede viária foi avaliada para os indicadores DTD, CRA, DMV e TRR em quatro cenários de demanda distintas, formam avaliados cinco diferentes níveis de obstrução. Além disso, para melhor explorar a natureza dinâmica de impacto o indicador DTA foi aplicado para o cenário I onde formam avaliados a duração e o horário de início da obstrução.

O indicador de desempenho DMV apresenta resultados de intensidade diferente para demandas diferentes. Percebe-se que o crescimento do valor do indicador ocorre de exponencial com o incremento do nível de obstrução.

O indicador de desempenho CRA resultados similares para a redução de 100% da capacidade nos cenários I, III e IV. Os cenários de alta demanda apresentam resultados similares pra todos os níveis de obstrução.

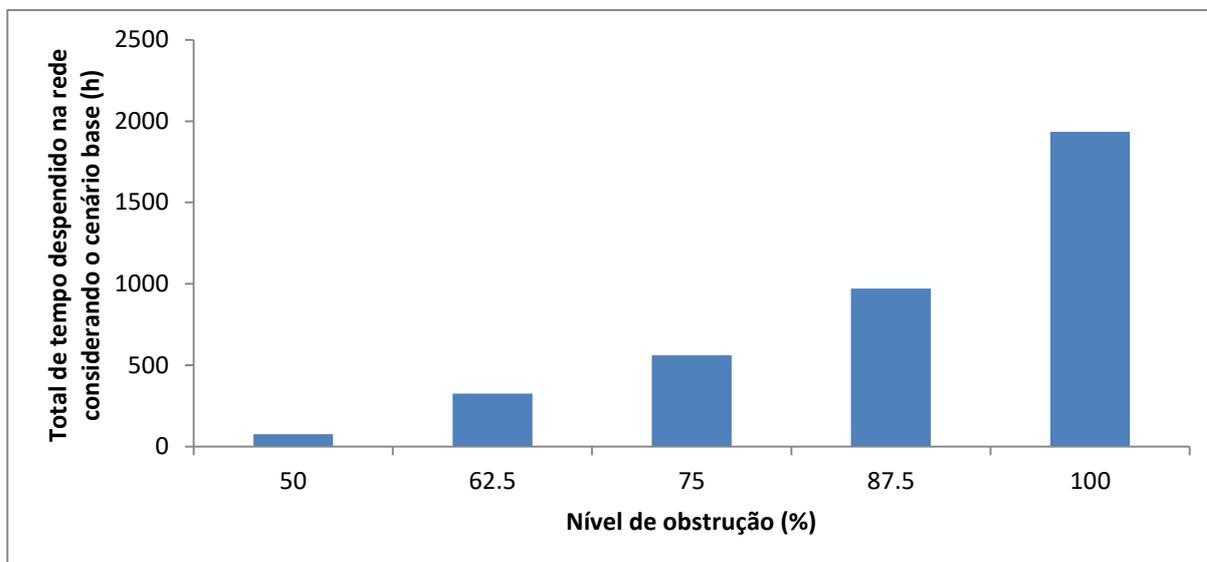
O indicador de desempenho DMV apresenta um comportamento fora do esperado para os cenários I e III de alta demanda, oscilando nos valores encontrados para diferentes de obstrução de capacidade do segmento obstruído. Nos cenários II e IV, não apresenta oscilações perceptíveis para nenhum nível de obstrução.

O indicador de desempenho TRR apresenta resultados que condizentes com o esperado. Para todos os cenários, quanto maior o nível de obstrução do segmento crítico, maior o valor registrado pelo indicador.

O indicador de desempenho DTD foi utilizado para a demanda do cenário I para avaliar a duração e o horário da obstrução. Identificou-se que quanto maior a duração da obstrução maior a impacto registrado pelo indicador, contudo essa relação não é linear e cresce de maneira exponencial. O horário de inicio da obstrução não apresentou interferência no valor do indicador.

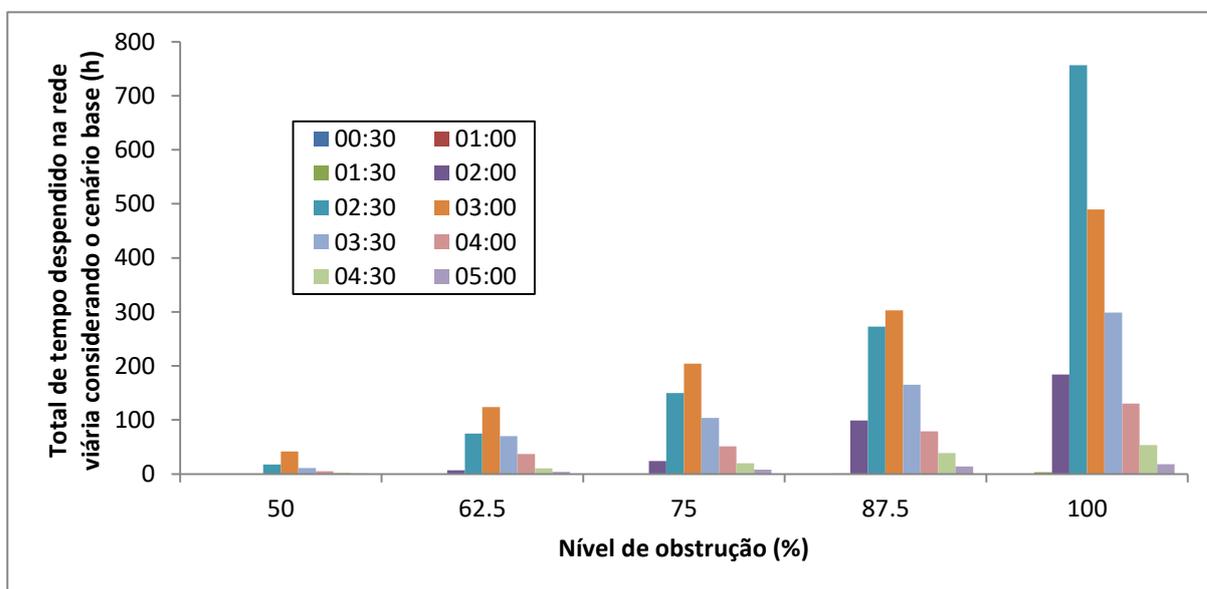
Identifica-se que a análise dinâmica permite avaliar o impacto na rede com mais detalhes que a análise estática onde o indicador era apresentado de forma agregada. Tais detalhamentos são apresentados por cada intervalo de tempo da análise, permitindo observar a variação do valor do indicador de forma segregada por intervalo de tempo. A avaliação por intervalo de tempo possibilita identificar o valor do impacto na rede referente aquele determinado período e avaliar a contribuição que cada valor desagregado tem no valor total do impacto. A Figura 60 apresenta o nível de detalhamento da análise agregado, similar aos resultados apresentados pela análise estática, e a Figura 61 o nível de detalhamento da análise desagregado por intervalo de análise. Em ambos os casos a rede foi avaliada pelo indicador DTD e são considerados os cinco níveis de redução de capacidade.

Figura 60 – Nível de informação oferecido pela análise estática (valor atemporal), para diferentes níveis de obstrução, cenário I



(fonte: elaborado pelo autor)

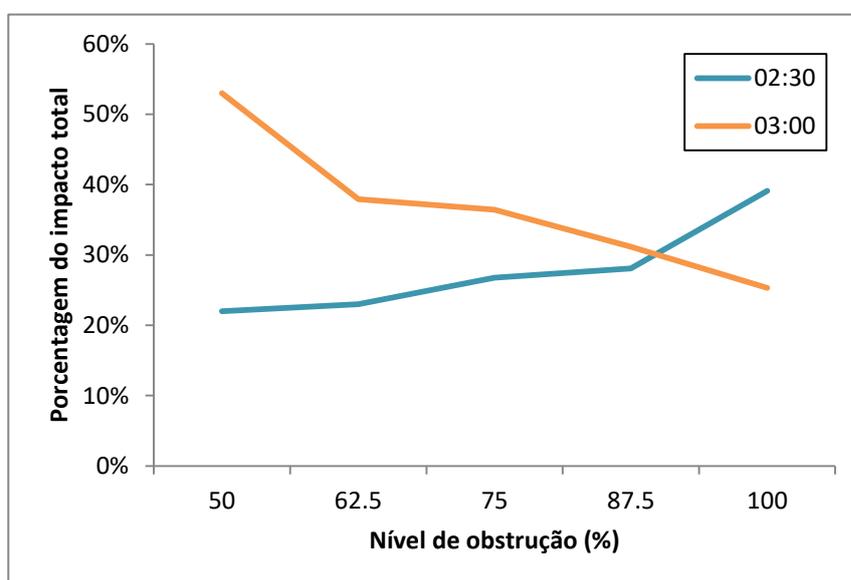
Figura 61 – Nível de informação oferecido pela análise dinâmica (segregada por intervalo de análise), para diferentes níveis de obstrução, cenário I



(fonte: elaborado pelo autor)

Observando a Figura 61, percebe-se que diferentes intervalos da análise contribuem de maior ou menor proporção para o valor agregado do indicador conforme ocorre o aumento do nível de obstrução. Mais detalhadamente na Figura 61 identifica-se que a maior contribuição para o impacto ocorre sempre no intervalo 03:00 (em laranja), exceto para a obstrução 100% de redução de capacidade. Para esta obstrução de maior redução da capacidade o intervalo 02:30 (azul) é o intervalo que mais contribui para o impacto total. A Figura 62 representa a variação da porcentagem do impacto total de cada nível de obstrução para os intervalos 02:30 e 03:30.

Figura 62 – Porcentagem de contribuição de intervalos para diferentes níveis de obstrução, caso do DTD para o cenário 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Observando essa relação identifica-se que quanto mais severa é a obstrução mais imediato é o seu impacto na rede viária. Com isso entende-se que o intervalo imediatamente após o início da obstrução aumenta sua contribuição para o impacto total na rede quanto mais severo for o nível de obstrução da rede. Por outro lado, a participação dos intervalos mais tardios ao início da obstrução diminui e esses intervalos relativamente reduzem a sua contribuição para o impacto total na rede quanto mais severo for o nível de obstrução.

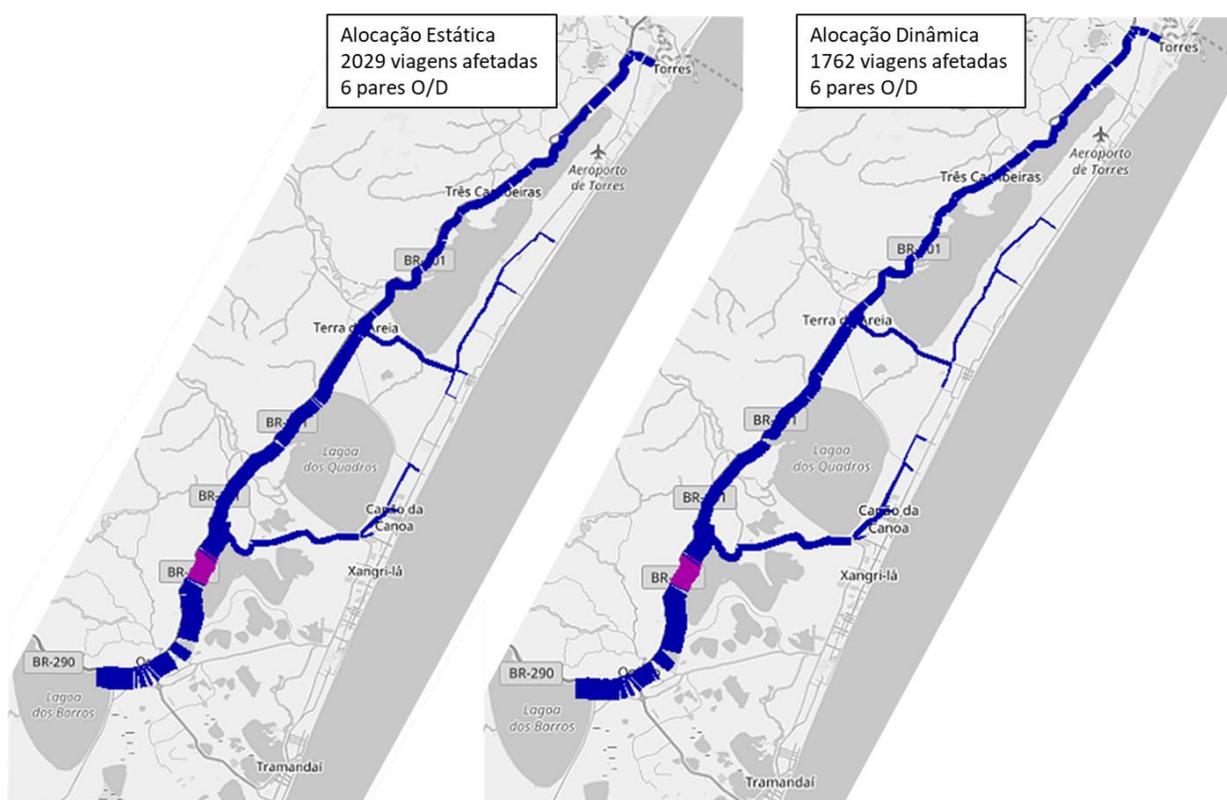
Com base nessa avaliação entende-se que, para alta redução da capacidade de um segmento viário crítico as ações devem ser imediatas ao período de início da obstrução, atuando assim no intervalo de maior contribuição para o impacto na rede. No caso de

obstruções de menor nível redução da capacidade as ações para mitigar os impactos na rede podem ser aplicadas em até 30 minutos de após o início da obstrução, atuando diretamente no intervalo que mais contribui para o impacto na rede. Para tornar possível que as ações sejam tomadas no período correto conforme a intensidade da obstrução se faz necessário o monitoramento constante das condições de trânsito dos segmentos críticos.

### 5.3.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE ALOCAÇÕES ESTÁTICA E DINÂMICA NA OBSTRUÇÃO DO SEGMENTO CRÍTICO

As rotas modificadas e volumes de tráfego afetados decorrente de uma obstrução de um segmento crítico são similares para as alocações estática e dinâmica. A Figura 63 apresenta os segmentos que tiveram redução de volume, os pares O/D afetados e o total de viagens afetadas para as duas alocações de tráfego. A alocação estática afeta 2029 viagens, para seis pares O/D, contudo a alocação dinâmica afeta somente 1762 viagens para os mesmo pares O/D para a obstrução do segmento crítico.

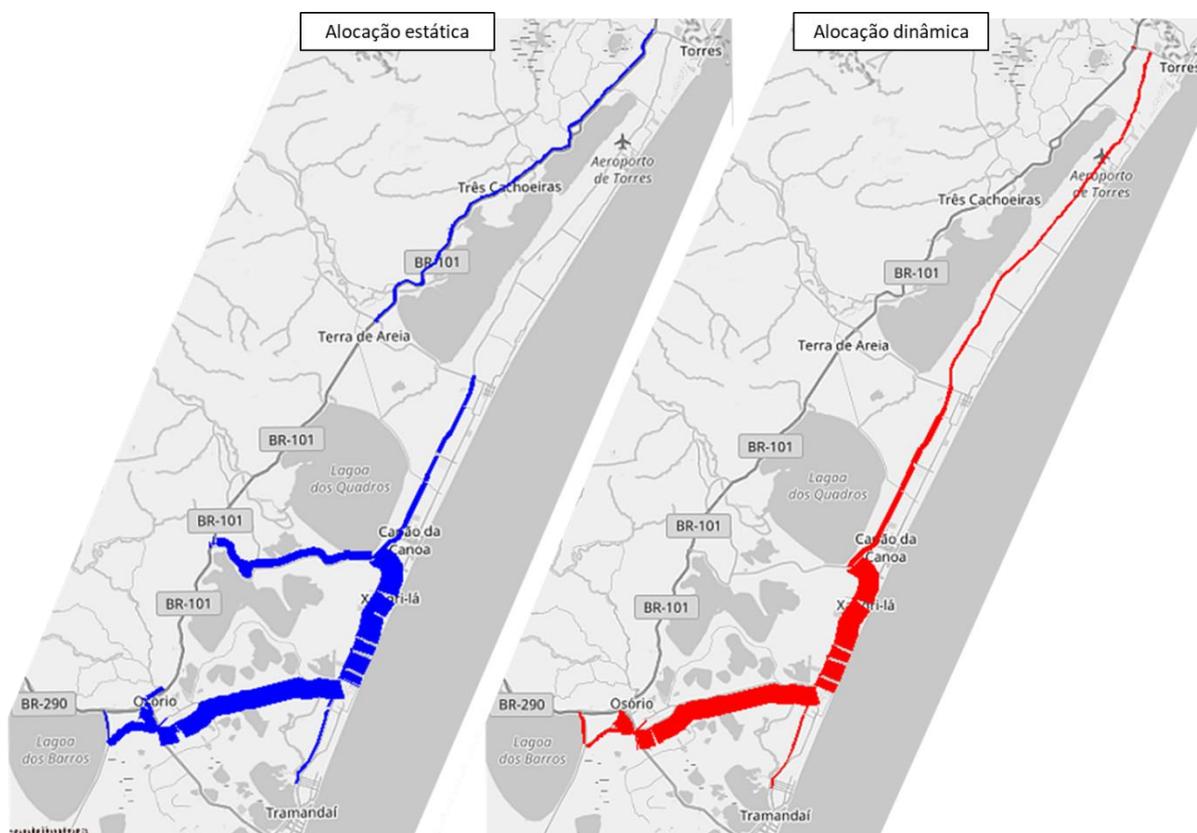
Figura 63 – Análise do total de viagens afetadas nas análises de alocação dinâmica e estática para obstrução de um segmento crítico no cenário I



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

Outro aspecto importante é a distribuição das viagens afetadas. A Figura 64 apresenta os segmentos que apresentam incremento de volume decorrente da obstrução do segmento crítico. Identifica-se que os trechos mais carregados são muito similares para os dois processos de alocação. Contudo, há diferença entre as alocações, a BR-407 e o trecho da BR-101 entre Terra de Areia e Torres são sobrecarregados na análise estática e não sofrem incrementos de volume na análise dinâmica. Entende-se que os incrementos de volume nos trechos não registrados na análise dinâmica ocorram devido ao algoritmo de escolha de rota da análise dinâmica ser mais complexo, possibilitando a redefinição da rota dos segmentos da demanda em cada intervalo de tempo. Posto que, a análise estática não considera a natureza dinâmica do tráfego, esta pode gerar resultados que, ao visarem a solução matemática, assumem que todos os usuários apresentam conhecimento das condições da rede. A análise estática realiza somente uma vez a escolha de rota de distribuição da demanda. Estes resultados, por sua vez, não apresentam tanta verossimilhança com a realidade quanto a análise dinâmica.

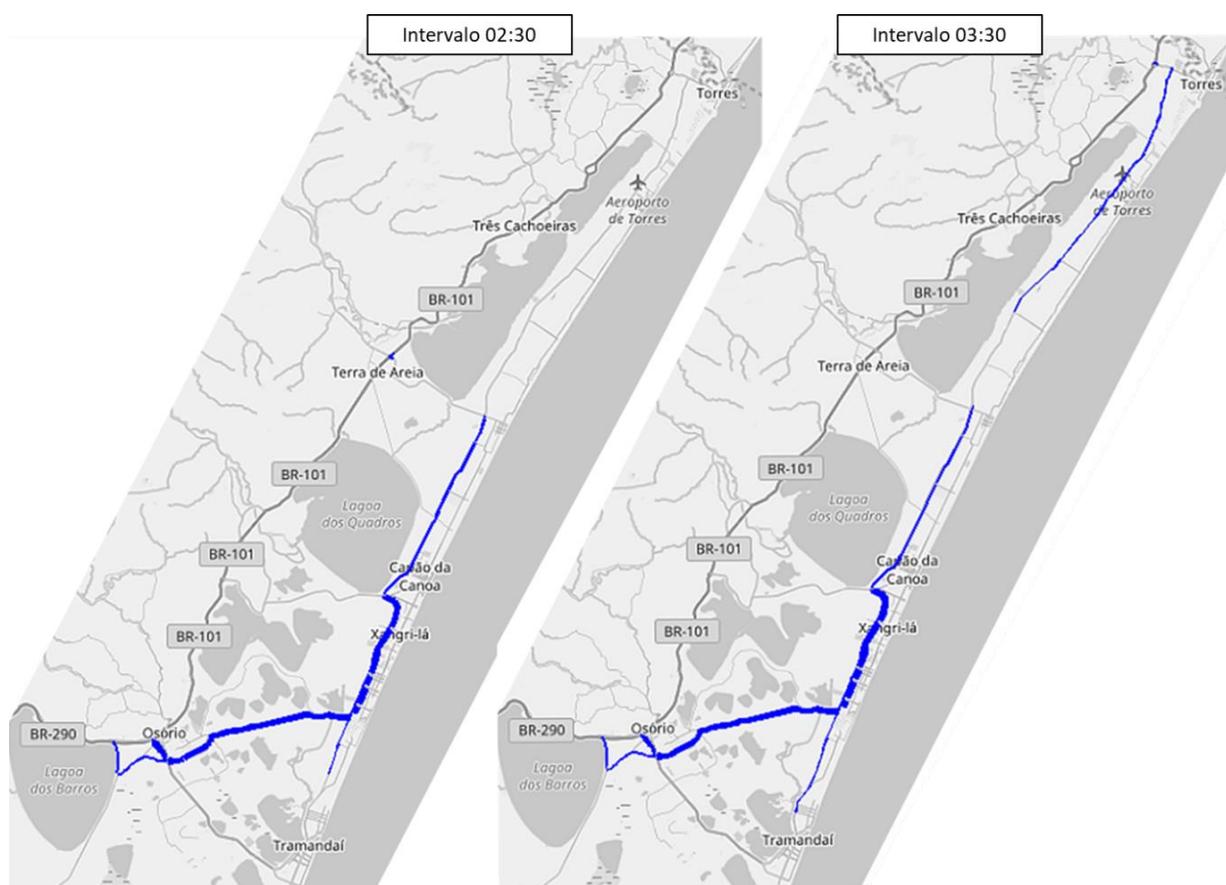
Figura 64 – Redistribuição das viagens afetadas nas análises dinâmicas e estáticas para obstrução de um segmento crítico no cenário I



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

A análise dinâmica se destaca pelo nível de detalhamento dos resultados. A Figura 65 e a Figura 66 apresentam os segmentos com incremento de volume por intervalos da análise dinâmica (02:30, 03:00, 03:30 e 04:00). Percebe-se que os resultados quando observados por intervalos se diferem muito do resultado agregado apresentado na Figura 64 para a análise dinâmica. No primeiro intervalo (início da obstrução), observa-se que houve o desvio de viagens da BR-101 para a Estrada do Mar através da RS-389 entre Osório e Atlântida. No intervalo seguinte (03:30) percebe-se que ainda ocorram os desvios de viagens.

Figura 65 – Incremento do volume nos intervalos 02:30 e 03:00

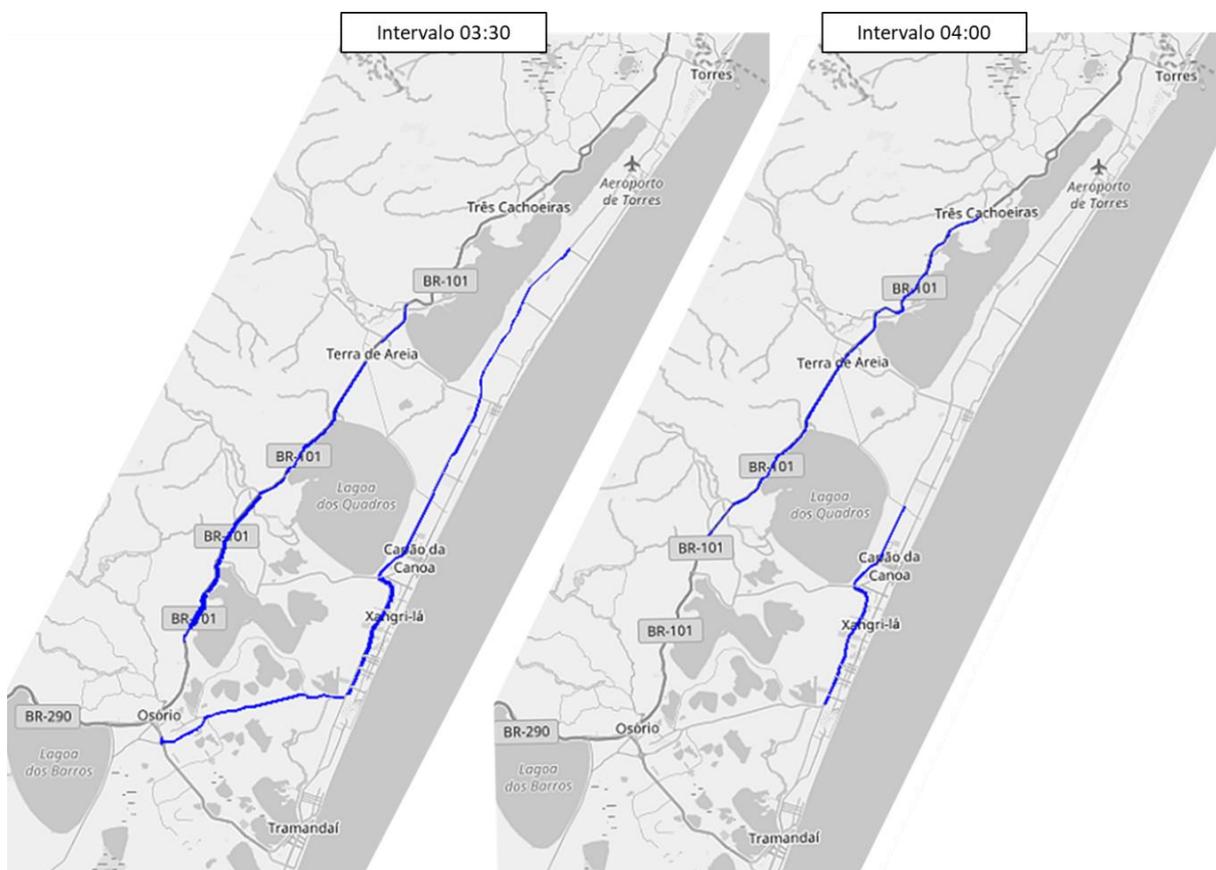


(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

No intervalo seguinte, 03:30 (Figura 66) ocorre o término da obstrução. Neste intervalo percebe-se que o volume retido na BR-101 devido a obstrução é liberado. Este volume é composto majoritariamente por viagens que se destinam a Torres, não ocasionando incremento de volume em rotas para outro destino. Por fim, no último intervalo (04:00), identificam-se alguns segmentos que ainda apresentam incremento volumes, uma fração desse

volume utiliza a Estrada do Mar para se destinar as praias de Capão da Canoa, Xangri-Lá e Atlântida, as demais viagens utilizam a BR-101 para a praia de Torres.

Figura 66 - Incremento do volume nos intervalos 03:30 e 04:00



(fonte: extraído do programa VISUM e adaptado pelo autor)

Por fim, a diferença de volumes apresentados na análise agregada e na análise segregada por intervalos fica nítida. De forma geral, a BR-101 apresenta uma redução no total de viagens para as cinco horas de análise. Contudo, quando se realiza a análise de forma desagregada se identifica que há um registro de incremento da intensidade de volume após a desobstrução do segmento bloqueado apresentados nos intervalos 03:30 e 04:00. No caso estudado, se observa que há incremento dos volumes nos segmentos até duas horas depois do início da obstrução. Também se observa que o incremento de volume na BR-101 se dissipa em uma hora depois do término do acidente.

Com base nos resultados analisados entende-se que, a análise dinâmica apresenta um detalhamento muito enriquecedor a avaliação da obstrução de um segmento. Ao registrar as

viagens adicionais por intervalo de tempo, consegue estimar a extensão do impacto na rede e seu período.

Informações com detalhamento dinâmico permitem que, a partir da obstrução do segmento crítico o planejador de transportes pode com segurança: (i) dimensionar medidas de mitigação para os trechos com maior incremento de volume afetados pela obstrução do segmento crítico; (ii) identificar pontos críticos onde a rede é mais afetada, orientado estudos mais específicos, como por exemplo, de microssimulação; e (iii) posicionar painéis eletrônicos em pontos estratégicos que permita aos usuários identificar os trechos com incremento de volume atípico.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi aplicado o método de para avaliar a importância dos segmentos de uma rede viária a partir de indicadores de desempenho na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Os indicadores de desempenho aplicados tiveram com base o levantamento bibliográfico na área de avaliação de redes viária frente a obstrução de seus segmentos.

Observou-se que indicadores de desempenho, quando não correlacionados, apresentam uma diferente priorização dos segmentos viários, uma diferença de dispersão dos valores para as obstruções. Além disso, apresentam diferente sensibilidade à intensidade e ao sentido da demanda.

Empregou-se uma avaliação conjunta dos indicadores de desempenho, que a partir da classificação de Pareto, identificou o segmento crítico da rede. Em seguida foi avaliado o impacto da obstrução do segmento crítico através do processo de alocação estático e dinâmico.

Os resultados indicam que o método aplicado é válido para identificar do segmento crítico e que os indicadores são sensíveis à intensidade da obstrução do segmento crítico. Por fim, a análise dinâmica mostrou-se mais ampla para avaliar a rede viária frente a obstrução do segmento crítico

## 6 CONCLUSÃO

Visando garantir a eficiência do funcionamento de redes de transportes, os planejadores de transportes e agentes tomadores de decisão necessitam saber o nível de impacto na rede viária decorrente de eventos que provoquem a redução de capacidade dos elementos da rede. Assim, o presente trabalho propõe a avaliação da rede viária através do uso de indicadores de desempenho de rede e identifica e avalia a obstrução do segmento crítico da rede de forma estática e dinâmica. Para averiguar a aplicabilidade do trabalho proposto, realizou-se a análise na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul sujeito a quatro padrões de demanda distintos.

A revisão bibliográfica sobre os processos de hierarquização de rodovias e avaliação de rede de transportes a partir de indicadores de desempenho apontou que não existem metodologias definidas para realizar tais tarefas. Constatou-se que a maioria dos trabalhos que avaliam as obstruções na rede viária considera a obstrução de um segmento pré-definido para realizar a análise. Outra abordagem documentada na literatura visa identificar qual é o segmento mais crítico da rede com base em processos de hierarquização. Contudo, percebe-se que diferentes metodologias apontam diferentes segmentos priorizados da rede, e que muitas vezes, métricas diferentes são utilizadas para selecionar o segmento crítico da rede, além de não apresentarem conformidade do indicador de desempenho utilizado para avaliar os impactos na rede decorrente da obstrução. Do ponto de vista de análise de redes, percebe-se que há diferentes maneiras de se avaliar o desempenho da rede e que, a escolha do indicador de desempenho esta relacionada com a abordagem da análise, ou as limitações dos *softwares* utilizados nos trabalhos.

Dentro dessa problemática, foi possível avaliar diversos indicadores de desempenho de rede frente à obstrução dos segmentos da rede. Também foi realizada a avaliação da importância de segmentos da rede que possibilita identificar o segmento mais crítico. Por fim, o método aplicado avalia o impacto da obstrução de um segmento crítico a partir de uma análise dinâmica e uma análise estática.

A definição dos indicadores de desempenho teve como base os trabalhos encontrados na literatura. Este estudo avaliou sete indicadores de desempenho de rede. Alguns desses indicadores, apesar de terem diferenças na sua base de cálculo, apresentaram alta correção.

Dessa forma, o estudo foi desenvolvido somente com indicadores não diretamente correlacionados. Dentre os indicadores utilizados, destaca-se a ‘diferença total de tempo despendido na rede com o cenário base’ e o ‘comprimento total da rede afetado’. O primeiro por utilizar características do cenário sem obstrução, registrando somente o acréscimo do tempo de viagem decorrente da obstrução. O segundo é importante por ser uma medida da extensão do impacto decorrente da obstrução. Recomenda-se a combinação dos dois indicadores para um índice mais robusto de avaliação do impacto na rede viária.

A classificação dos segmentos da rede quanto a sua importância foi verificada para os sete indicadores de desempenho da rede selecionados nos quatro cenários sujeito a padrões de demanda distintos. Para realizar tal classificação foram obstruídos todos os segmentos da rede viária um a um. Cada obstrução permitiu que, através do processo estático de alocação, fosse realizada a avaliação de desempenho da rede viária através dos indicadores de desempenho previamente selecionados.

Através da avaliação da dispersão dos valores encontrados e da normalização e classificação dos segmentos, verificou-se a alta correlação dos indicadores *total de tempo despendido na rede viária* (TTD), *diferença de tempo despendido com o cenário base* (DTD) e *tempo médio de viagem* (TMD), e os indicadores *total de segmento com incremento de volume* (TIV) e *comprimento total da rede afetada* (CRA). Para esses indicadores foi encontrado coeficiente de correlação igual a 1.0. Entretanto, os demais indicadores de desempenho apresentaram diferentes resultados para a avaliação de importância dos segmentos da rede. Além disso, a distribuição dos valores observados para cada indicador de desempenho em histogramas de frequência mostrou que somente uma pequena fração dos segmentos pertencia ao intervalo de maior valor. O indicador de desempenho DTD apresentou 4,8% das observações no intervalo de maior frequência.

Em relação à classificação final dos segmentos, observou-se que, ao considerar a classificação conjunta dos indicadores de desempenho por Pareto, 15,5% da malha viária apresentou Classe A de importância, 19,4% da malha viária é definida para a Classe B e 64,7% para a Classe C. O segmento crítico da área de estudo foi definido como o segmento de maior frequência na Classe A a partir da classificação individual da rede por Pareto de cada indicador para todos os cenários.

A obstrução do segmento crítico foi avaliada a partir dos processos de alocação estática e dinâmica. Ambas os processos de alocação foram avaliados pelos indicadores de desempenho: *diferença do tempo despendido com o cenário base (DTD)*, *comprimento total da rede afetada (CRA)*, *distância média de viagem (DMV)* e o *total de rotas da rede (TRR)*, para diferentes intensidades de obstrução.

A análise estática mostrou-se útil principalmente para avaliação de medidas estratégicas, identificando o total de viagens afetadas, os principais pares O/D afetados e os trechos viários com incremento de volume decorrentes da realocação das viagens. Esta análise também permite concluir que quanto mais intenso o nível de obstrução do segmento crítico, maior o tempo despendido na rede e a abrangência do impacto. Porém, o tempo despendido na rede cresce de forma exponencial, enquanto a abrangência do impacto cresce de forma linear.

A análise dinâmica apresenta resultados que podem ser desagregados por intervalos de tempo, ou avaliados de forma agregada, que neste caso, apresentando resultados similares à análise estática. Os resultados separados por intervalo de tempo mostraram-se úteis para identificar a contribuição de cada intervalo da análise no valor total do impacto. Estes valores desagregados possibilitam a aplicação de medidas de gestão e operação de tráfego, visando mitigar os impactos em cada intervalo da análise. Estas medidas podem ser referentes tanto ao nível de severidade da obstrução quanto ao nível de duração da obstrução.

A duração da obstrução influencia exponencialmente o crescimento do impacto na rede em uma proporção maior do que o nível da obstrução. Nesse sentido, deve-se buscar a aplicação de medidas de mitigação da duração de interrupção da via. Uma boa medida é a definição da localização ótima de uma central de apoio, que pode ser obtida considerando o maior número possível de segmentos de alto impacto na rede a serem atendidos pela central.

Quanto ao grau de obstrução do segmento crítico, identifica-se que obstruções mais severas apresentam um impacto na rede crescente com a decorrência do tempo de forma extremamente mais rápida do que obstruções menos severas, além disso, impactos mais severos têm a maior parte do seu impacto total ocorrendo logo após o início da obstrução. Essa forma, medidas de gestão de tráfego distintas podem ser utilizadas para os diferentes graus de obstrução. Além disso, a definição de qual medida de operação a ser utilizada,

depende das características de cada rede e das condições de demanda que ela está sujeita no momento da ocorrência da obstrução.

Tendo em vista que eventos disruptivos são raros, o processo de hierarquização que avalia obstrução sistemática de cada segmento da rede apresenta ser adequado, pois representa a ocorrência desses eventos pontuais. A aplicação de outros métodos de hierarquização que avaliam os impactos na conectividade da rede a partir da obstrução simultânea de diversos segmentos se afasta da realidade de sistemas de transportes.

A utilização de indicadores de desempenho ser empregada para diagnosticar as condições de funcionamento da rede e quando relacionados a uma obstrução podem registrar a intensidade do impacto e a abrangência com que eventos impactam na rede. Estes indicadores podem, por sua vez, serem empregados de forma combinada para definir a importância dos segmentos segundo os diferentes aspectos pertinentes. Além disso, características morfológicas interferem no desempenho de alguns indicadores. Indicadores de desempenho relacionados com a distância de viagem e o total de rotas não apresentam crescimento junto com o incremento do nível de obstrução. Os valores desses indicadores podem estar relacionados a especificidades morfológicas da rede, por exemplo, redes onde o número de rotas alternativas é limitado.

Como trabalhos futuros entende-se que há a possibilidade de desenvolvimento de estudos que possam relacionar aspectos morfológicos da rede viária aos indicadores de desempenho. Somado a isso, a limitação dos achados neste trabalho fazem referência específica a rede estudada, nesse sentido, para se consolidar a relação do nível de obstrução e o nível do impacto registrado na rede pelo indicador de desempenho recomenda-se a avaliação de mais redes de transporte.

Espera-se também que a metodologia possa ser adaptada para as redes de transporte coletivo, uma vez que a rede avaliada não necessita ser de transporte privado. Além disso, pode-se estudar a vulnerabilidade de diferentes modos de transportes em suas respectivas redes, e o processo de hierarquização de trechos da rede podem ser realizados sobre a ótica de diferentes indicadores de desempenho. Tais indicadores podem ser relacionados com impactos ambientais, no caso de acidentes envolvendo cargas tóxicas, ou relacionados com

impactos na mobilidade e na acessibilidade, principalmente para casos específicos de redes dentro de perímetro urbano.

Por fim, visando a consolidação da metodologia que utilize mais de um indicador de desempenho para mensurar o impacto na rede, sugere-se a realização da análise em outras redes viárias possibilitando a confirmação se indicadores são concorrentes ou complementares.

## REFERÊNCIAS

- ABDELGHANY K. F., VALDES D. M., ABDELFATAH A. S., MAHMASSANI H. S., Real-Time Dynamic Traffic Assignment and Path-based Signal Coordination – Application to Network Traffic Management. **Transportation Research Record**, número 99, 1999.
- AKÇELIK, R., Travel Time Functions for Transportation Planning purpose: Davidson's Functions, its time-dependent form and an Alternative Travel Time Function. **Australian Road Research**, volume 21 número 3, páginas 49-59, 1991.
- AN S., LENG. J., WANG J., LI W. e HE Y., Vulnerability of Road Network Based on Generalized Travel Time. **Transport**, 2014.
- BABABEIK M., KHADEMI N., CHEN A. e NASIRI M. M. Vulnerability Analysis of Railway Network in Case of Multi-Link Blockage. **Transportation Research Procedia**, volume 22, número 2016, páginas 275-284, 2017.
- BAR-GERA, H. e BOYCE, D. Origin-based algorithms for combined travel forecasting models, **Transportation Research Part B: Methodological**, volume 37, número 5, páginas 405-422, 2003.
- BERDICA K. An Introduction to Road Vulnerability: What has been done, is done and should be done. **Transportation Policy**, volume 9, número 2, páginas 117-127, 2002.
- BPR, **Traffic Assignment Manual: Bureau of Public Roads**, U.S. Department of Commerce, Washington, Estados Unidos, 1964.
- BRANSTON D., Link Capacity Functions: a Review. **Transportation Research**, volume 10, número 4, páginas 223-236, 1976.
- BURGHOUT W., KOUTSOPOULOS H. N. e ANDREASSON I., Incident Management and Traffic Information – Tools and Methods for Simulation-Based Traffic Prediction. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, número 2161, páginas 20-28, 2010.
- CAMPOS, V. B. G. Método de alocação de fluxo no planejamento de transportes em situações de emergência: definição de rotas disjuntas. **Tese doutorado**, COPPE/UFRJ, 1997.
- CHEN X. Z., LU Q. C., PENG Z. R. e ASH J. E. **Analysis of Transportation Network Vulnerability Under Flooding Disasters**. Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, número 2532, páginas 33 a 44, 2015.
- CHENG G., WILMOT C. G., BAKER E. J. **Dynamic Gravity Model for Hurricane Evacuation Planning**. Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, número 2234, páginas 125 a 134, 2011.
- CHIU Y., BOTTON J., MAHUT M., PAZ A., BALAKRISHNA R., WALLER T. e HICK J. **Dynamic Traffic Assignment A PRIMER**. Transportation Research Circular E-C153, Transportation Network Modelling Committee, Washington, EUA, 2011.
- CHU C. H. e CHU Y. C., Computerized ABC Analysis: The Basis for Inventory Management . **Computers and Industry**. Volume: 13, páginas 66 a 70, 1987.

CUI J., AN S., ZHAO M., A Generalized Minimum Cost Flow Model for Multiple Emergency Routing. **Mathematical Problems in Engineering**, volume 2014, 2014.

DAER-RS, **Estudos estatísticos de acidentes de Trânsito**. Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem, Rio Grande do Sul, Brasil, 2017. Disponível em: <[http://www4.daer.rs.gov.br/site/controle\\_estudos\\_estatisticos\\_acidentes\\_transito.php](http://www4.daer.rs.gov.br/site/controle_estudos_estatisticos_acidentes_transito.php)>. Acessado em: 30 agosto de 2017.

DAGANZO, C. F. Urban gridlock: Macroscopic modelling and mitigation approaches. **Transportation Research Part B**, volume 41, páginas 49-62, 2007

DAVIDSON, K. B. A Flow-Travel Time Relationship for use in Transportation Planning. **Australian Road Research Board 3th Proceedings**, volume 3, parte 1, páginas 183-194, 1966.

DIA H., Evaluation of the Impacts of ITS Using Traffic Simulation. **IPENZ Transportation Group Conference Auckland**, 2011.

DIAL R. B. A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration. **Transportation Research**, volume 5, páginas 83-111, 1971.

DIJKSTRA E. W. Notes of Two Problems in Connexion with Graphs (Spanning Tree, Shoetest Path) **Numerical Mathematics**, número 1, páginas 126-271, 1959.

DINH T. N. THAI M. T., Network Under Joint Node and Link Attacks: Vulnerability Assessment Methods and Analysis. **IEEE Transaction on Networks**, volume 23, número 3, páginas 1001-1011, 2016.

DNIT, **Estatísticas de Acidentes**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil, 2017. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes>>. Acessado em: 30 agosto 2017.

FLORES B E. e WHYBARK D. C. Implementing multiple critérios ABC analysis. **Journal of Operations Management**, volume 7, páginas 79-85, 1987.

FLORIAN M., GAUDRY M. e LARDINOIS C. A Two-Dimensional Framework for the Understanding of Transportation Planning Models. **Transportation Research Part B**, volume 22, número 6, páginas 41-419, 1988.

FISK C. Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment. **Transportation Research Part B: Methodological**, volume 14, número 3, páginas 243-255, 1980.

FU L., SUN D. e RILETT L. R. Heuristic Shortest Path Algorithms for Transportation Applications: State of the Art. **Computers & Operations Research**, volume 33, número 11, páginas 3324-3343, 2006.

GALLO e PALLOTINO, Shortest Paths Algorithms. **Annals of Operations Research**, volume 13, páginas 3-79, 1988.

HADI-VENCHEH Na improvement to multiple criteria ABC inventory classification using Shannon entropy, **Journal of systems science and complexity**, volume 30, número 4, páginas 857 a 865, 2010.

HANSEN C. O. **Estimation of New Speed-Flow Curves for the OTM Model (in Danish)**. Danish road Directorate, Copenhagen, Dinamarca, 2011.

HAUTANIEMI P. e PIRTTILÄ T. The choice of replenishment policies in an MRP environment Petri. **International Journal of Production Economics**, volume 59 número 1, páginas 85-92, 1999.

HCM – **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board of National Academies, Washington, USA, 2010.

HERRON D. Industrial Engineering Applications od ABC Curve, **AIIE Transactions**, volume 8, número 2, páginas 210-218, 1976.

HOJATI A. T. FERREIRA L e WASHINGTON S. CHALES P. SHOBEIRINEJAD A. Modelling the impact of traffic incidents on travel time reliability, **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, volume 65, páginas 49-60.

MATTSSON L.G. e JENELIUS E., PETERSON T. Importance and Exposure on Road Network Vulnerability Analysis. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, volume 40, número 7, páginas 537-560, 2006.

JENELIUS E., PETERSEN T. K e MATTSSON L. G. Road network vulnerability: Identifying important links and exposed regions. **Transportation Research A**, volume 20 páginas 537-560, 2006.

KAMGA C. N., MOUSKOS K. C. e PASWEEL R. E., A Methodology to Estimate Time Using Dynamic Traffic Assignment (DTA) under Incident Conditions. **Transportation Research Part C**, volume 19, número 6, páginas 1215-1224, 2011.

KIM G., PARK C. S. e YOON K. P. Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement. **International Journal of Production Economics**, volume 50 número 1 páginas 23-33, 1997.

KIM J., MAHMASSANI H. S., ALFELOR R., CHEN Y., HOU T., JIANG L., SABERI M., VERBAS O. e ZOCCAIE A. Implementation and Evaluation of Weather-Responsive Traffic – Insight from Different Networks, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, número 2396, páginas 93-106, 2013.

KNOOP V. L., SNELDER M., ZUYLEN H. J. e HOOGENDOORN S. P. Link-Level Vulnerability Indicators for Real-World Networks. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, volume 46, número 5, páginas 843-854, 2012.

KUCHARSKI R. e DRABICKI A. Estimation Macroscopic Volume Delay Function with the Density Derived from Measured Speed Flows. **Journal of Advanced Transportation**, volume 2017, 2017.

KURTH D., VAN DEN HOUT A. e IVES B., Implementation of Highway Capacity Manual-Based Volume-Delay Functions in a Regional Traffic Assignment Process. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, volume 1556, número 1, páginas 27-37, 1996.

- LATORA V. e MARCHIORI M. How the Science of Complex Network Can Help Developing Strategies Againsts Terrorism. **Chaos, Solutions and Fractals**, volume 20, número 1, páginas 69-75, 2004.
- LEONG L. V., Effects of Volume-Delay Function on Time, Speed and Assigned Volume in Transportation Planning Process. **International Journal of Applied Engineering Research**, volume 11, número 13, página 8010-8018, 2016.
- LOU Y. e ZHANG L. Defending Transportation Networks Against Random and Targeted Attacks. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, volume 2234, páginas 31-40, 2012.
- MANUAL PTV VISUM, Group, **MANUAL PTV VISUM 15**, 2016.
- MANHEIM M. L. **Fundamentals of Transportation System Analysis**. Editora The MIT Press, 1979.
- MANZO S., NIELSEN O. A. e PRATO C. G., Effects of Uncertainty in Speed-Flow Curve Parameters on a Large-Scale Model Case Study of the Danish National Model. **Transportation Research Record: Journal of the Research Board**, número 2429, páginas 30-37, 2014.
- MARQUIZ, L., Conical and the BPR Volume-Delay Functions for Multilane Roads **Boletín Técnico**, volume 54, número 3, páginas 14-24, 2015.
- MOORE E. F. The Shortest Path Throught a Maze. **Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching**, Harvard University, Cambridge, 1957.
- MORRIS, J. M., DUMBLE P. L. e WIGAN M. R. Accessibility indicators for transport planning. **Transportation Research Part A: General**, volume 13, número 2, páginas 91-109, 1979.
- MURRAY-TUITE P. M. e MAHMASSANI H. S. Methodology for Determining Vulnerable Links in a Transportation Network. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, volume 1882, páginas 88-96, 2004.
- NICHOLSON, A. J. Road network unreliability: impact assessment and mitigation. **International Journal of Critical Infrastructures** volume 3, páginas 346-375, 2007.
- NÚÑES E. R. e GÁRCIA-PALOMARES J. C. Measuring the Vulnerability of Public Transportaion Network. **Journal of Transport Geography**, volume 35, páginas 50-63, 2014.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4ª edição, Londres: Wiley, 2011.
- PAPACOSTAS C. S. e PREVEDOUROS P. D. **Transportation Engineering and Planning**. 2ª edição, 1989
- PAPACOSTAS C.S. **Fundamentals of Transportation Engineering**, editora Prentice-Hall, University of Hawaii at Manoa, 1987.
- PEETA S. e ZILIASKOPOULOS A. Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future. **Networks and Spatial Economics**, volume 1 páginas 233-265, 2001.

- PRATT, R. H. e LOMAX, T. J. Performance measures for multi-modal transportation systems, **Transportation Research Record**, número 1518, páginas 85-93, 1996.
- QIANG Q. e NAGURNEY A. A Unified Network Performance Measure with Importance Identification and Ranking Network Components. **Optimization Letters**, volume 2, número 1, páginas 127-142, 2008.
- QUINTERO, E. **Modelling the Route Choice: The Role of Volume-Delay Functions in Transport Planning**, Handbook of Research on Military, Aeronautical and Maritime Logistics and Operation, Mexican Transportation Institute, México, 2016.
- RAMANATAHN, R. ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. **Computers and Operations Research**, volume 33, número 3, páginas 695-700, 2006.
- SISIOPIKU V. P., LI X., MOUSKOS K. C., KAMGA, C. BARRETT C. e ABRO A. M. Dynamic Traffic Assignment Modelling for Incident Management. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, volume 1994 páginas 110-166, 2007.
- SLOBODEN J., LEWIS J., ALEXIADIS V., CHIU Y. e NAVA E. **Traffic Analysis Toolbox Volume XIV: Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment Modeling**. Federal Highway Administration, 2012.
- SPIESS H., Conical Volume-Delay Functions. **Transportation Science**, volume 24, número 2, 1990.
- SPIESS H. e FLORIAN M. Optimal Strategies: a New Assignment Model for Transit Network. **Transportation Research Part B**, volume 23B, número 2, páginas 83-102, 1989.
- STEENBRINK P. A., **Optimization of Transport Network**. Mathematical Optimization, Editora Wiley, 1974.
- SUNDSTROM L. L. **Measuring Transportation Network Performance**. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, 2010.
- TAYLOR, M. A. P., Parameter Estimation and Sensitivity of Parameter Values in a Flow-Rate/Travel-Time Relation. **Transportation Science**, volume 11, número 3, 1977
- TU Y., YANG C. e CHEN X. Road Network Topology Vulnerability Analysis and Application. **Transport**, volume 166, número TR2, 2013.
- VAN VLIET D. Improved Shortest Path Algorithms for Transportation Networks. **Transportation Research**, volume 12, número 1, páginas 7-20, 1978.
- VAN DEN HOUT A., **Travel Demand Forecasting Models in the San Francisco Bay Area**, EUA, 1992.
- WARDROP J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. **Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II**, volume 1, número 5, páginas 325-378, 1952.
- WIE, B. Space Vehicle Dynamics and Control. **AIAA Education Series**, 1987.

WIRTZ J. J., SCHOFER J. L. e SCHULZ D. F. Using Simulation to Test Traffic Incident Management Strategies – The Benefits of Preplaning. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, número 1923, páginas 82-90, 2005.

ZHENG H., NAVA E. e CHIU Y. C., Measuring Networkwide Traffic Delay in Schedule Optimizatón for Work-Zone Planing in Urban Networks. **IEEE Transactions on Inteligente Transportation Systems**, volume 15, número 6, páginas 1595-2604, 2014.