



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GESTÃO
TERRITORIAL

Anderson Schmitt

**Proposta de um algoritmo híbrido GA-TS para definição do traçado geométrico de
rodovias**

Florianópolis
2020

Anderson Schmitt

Proposta de um algoritmo híbrido GA-TS para definição do traçado geométrico de rodovias

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Orientador: Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schmitt, Anderson

Proposta de um algoritmo híbrido GA-TS para definição do traçado geométrico de rodovias / Anderson Schmitt ; orientador, Alexandre Hering Coelho, 2020.

115 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Projeto geométrico rodoviário. 3. Otimização. 4. Algoritmo Genético. 5. Busca Tabu. I. Coelho, Alexandre Hering. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Anderson Schmitt

Proposta de um algoritmo híbrido GA-TS para definição do traçado geométrico de rodovias

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Amir Mattar Valente, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Luciana Rohde, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos mais que especiais à minha família, por sempre me apoiar e me proporcionar tempo para os estudos. Sou privilegiado.

Agradeço também ao meu orientador, Alexandre, pela parceria e amizade que se consolidaram nesses anos. Espero a continuidade dessa parceria em futuros estudos e projetos.

Aos membros da banca, pelo tempo, atenção e colaboração para a qualidade deste trabalho.

Gostaria de agradecer à minha namorada, Natália, que me acompanhou durante todo o caminho de construção deste trabalho. Ela que participou do início, do projeto e das discussões dos resultados parciais, ao fim, até a última revisão antes da publicação. Além de me chacoalhar nos momentos de enrolação. Teria sido mais difícil sem você.

Por fim, aos amigos (do LabTrans/UFSC, do Mestrado e da vida), muitos com os quais tive o prazer de discutir meu trabalho e que trouxeram diversos pontos de melhoria e aperfeiçoamento.

RESUMO

O traçado geométrico de rodovias deve respeitar restrições técnicas e socioambientais. Essas restrições, juntamente com orçamentos limitados, fazem com que a investigação detalhada da área de interesse seja um aspecto indispensável para a escolha do traçado e para a viabilidade do projeto. Técnicas computacionais de otimização, que aplicam conceitos de inteligência artificial, surgiram como alternativa aos métodos clássicos para a definição de traçados. Esta pesquisa apresenta um modelo de otimização para auxiliar essa definição. O modelo leva em consideração limitações geométricas de traçados viários, além de custos construtivos e socioambientais calculados a partir de dados geográficos da área de estudo. Como método de resolução foi implementado um Algoritmo Genético híbrido com aplicação de Listas Tabu provenientes do algoritmo de Busca Tabu. A aplicabilidade do modelo foi testada na análise de traçado para um contorno rodoviário em área urbana que tornou possível gerar traçados econômicos que buscam diminuir o impacto socioambiental.

Palavras-chave: Projeto geométrico rodoviário. Otimização. Algoritmo Genético. Busca Tabu.

ABSTRACT

The highway alignments must respect technical and environmental constraints. These constraints combined with limited budgets demand a detailed investigation into the area of interest to seek the preferable road alignment and therefor to aim the project viability. The computational methods of road design optimization, which applies artificial intelligence concepts, have emerged as alternative to the classic methods. This research presents an optimization model to seek the preferable road alignment. The model considers geometric constraint of road design, also construction and environmental costs calculated from geographical data in the area of interest. A hybrid Genetic Algorithm was implemented applying Tabu Lists from the Tabu Search algorithm as a resolution method. The applicability of the model presented in a case study of a urban bypass road that makes it possible to generate cost-effective alignments with reduced environmental impact.

Key-words: *Highway design. Optimization. Genetic algorithms. Tabu Search.*

Lista de Figuras

1	Densidade da rede de transporte	1
2	Acidentes por tipo de uso de solo em rodovias federais	2
3	Estudos e projetos para implantação de uma rodovia	8
4	Elementos do projeto geométrico	11
5	Elementos do eixo de uma rodovia no plano horizontal	11
6	Critérios para escolha de raios de curvas sucessivas	13
7	Elementos do eixo de uma rodovia no plano vertical	14
8	Elementos da seção transversal - rodovias pista simples (seção-tipo de projeto)	16
9	Elementos da seção transversal - rodovias pista dupla (seção-tipo de projeto)	16
10	O modelo HDM	18
11	Seções transversais de corte e aterro	19
12	Seções transversal mista	20
13	Camadas geográficas	29
14	O processo de construção de modelos	31
15	Técnicas e modelos de resolução da Pesquisa Operacional	31
16	Cruzamento simples de posição aleatória	34
17	Exemplo de um mecanismo de mutação	35
18	Pseudocódigo - Algoritmo genético (GA)	35
19	Pseudocódigo - Busca Tabu	36
20	Variáveis do modelo de Jong, Jha e Schonfeld (2000)	38
21	Variáveis do modelo de Jong e Schonfeld (2003)	39
22	Diferença entre traçados backtracking e non-backtracking	40
23	Mutação - Simples	41
24	Mutação - Eliminação de curva	41
25	Reprodução - Simples	42
26	Reprodução - Dois pontos	42
27	Reprodução - Média	42
28	Resultado da aplicação do modelo de Jong e Schonfeld (2003)	43
29	Exemplo da aplicação da segmentação do traçado	44
30	Resultado de uma otimização multiobjetivo com quatro alternativas	46
31	Macroprocesso do método de otimização	49
32	Diagrama de classes - Caracterização geométrica da rodovia	50
33	Caracterização da geometria horizontal	51
34	Concordância com curva circular simples	52

35	Exemplo de não concordância entre curvas	53
36	Exemplo de eliminação de curvas	54
37	Caracterização da geometria vertical	55
38	Fluxograma do processo de obtenção do traçado geométrico vertical	56
39	Exemplo de obtenção do traçado geométrico vertical	57
40	Caracterização das seções transversais	58
41	Exemplo de ocorrência de intersecções com rodovias existentes	62
42	Exemplo de ocorrência de áreas a serem desapropriadas	63
43	Fluxograma geral das etapas da otimização global por meio de algoritmo híbrido GA-TS	66
44	Atualização das listas tabu	69
45	Reprodução simples	70
46	Reprodução dupla	71
47	Reprodução media	72
48	Reprodução heurística	72
49	Aplicação das listas tabu	73
50	Mutação simples	74
51	Mutação com eliminação de curva	75
52	Localização do Lote 2.2	77
53	Seção-tipo da rodovia	80
54	Trechos de estudo	82
55	Trecho I - <i>Fitness</i>	83
56	Trecho I - Horizontal	83
57	Trecho I - Greide e perfil do terreno	84
58	Trecho II - <i>Fitness</i>	85
59	Trecho II - Horizontal	85
60	Trecho II - Greide e perfil do terreno	86
61	Trecho III - <i>Fitness</i>	87
62	Trecho III - Horizontal	87
63	Trecho III - Greide e perfil do terreno	88
64	Trecho IV - <i>Fitness</i>	89
65	Trecho IV - Horizontal	89
66	Trecho IV - Greide e perfil do terreno	90
67	Trecho completo - <i>Fitness</i>	91
68	Trecho completo - Horizontal	91
69	Trecho completo - Greide e perfil do terreno	92
70	Comparação entre os resultados e o projeto existente	93

71	Ajuste polinomial	98
72	Tempo de processamento de cálculo de custo de cada indivíduo	99
73	Ábaco de comprimento de curva vertical - Condições mínimas	111
74	Ábaco de comprimento de curva vertical - Condições desejáveis	112
75	Camada geográfica - Topografia	113
76	Camada geográfica - Área urbana	113
77	Camada geográfica - Vias	114
78	Camada geográfica - Rios	114
79	Camada geográfica - Áreas socioambientais	115
80	Camada geográfica - Áreas ambiental proibida	115

Lista de Tabelas

1	Posição do Brasil no <i>The Global Competitiveness Report</i>	2
2	Custos considerados na otimização de traçado rodoviário	26
3	Custos considerados na avaliação de alternativas de traçado	26
4	Algoritmos utilizados para otimização do traçado de rodovias e ferrovias	32
5	Camadas geográficas	78
6	Características técnicas adotadas	79
7	Dados de entrada de custos	80
8	Dados de entrada para o algoritmo de otimização	82
9	Trecho I - Custos	84
10	Trecho II - Custos	86
11	Trecho III - Custos	88
12	Trecho IV - Custos	90
13	Trecho completo - Custos	92
14	Comparação entre os custos dos traçados encontrados	94
15	Limitações geométricas do modelo	97
16	Custos do modelo	99
17	Comparação entre número de genes e número de curvas resultantes	101
18	Características técnicas para projeto de novas rodovias - Classes 0, I e II	109
19	Características técnicas para projeto de novas rodovias - Classes III e IV	110

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DMT	Distância Média de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DT	<i>Distance Transform</i>
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
EVTEA	Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica-Ambiental
FG	<i>Feasible Gate</i>
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
Funai	Fundação Nacional do Índio
GA	Algoritmo Genético
HDM	<i>Highway Development and Management</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
Iphan	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Pontset Chaussées</i>
LT	Lista Tabu
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NATM	<i>New Austrian Tunnelling Method</i>
OAE	Obra de Arte Especial
OSM	<i>Open Street Map</i>
PI	Ponto de intersecção horizontal
PIB	Produto Interno Bruto
PIV	Ponto de intersecção vertical
PRF	Polícia Rodoviária Federal
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TAV	Trem de Alta Velocidade
TRRL	<i>Transport and Road Research Laboratory</i>
TS	Busca Tabu
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

Lista de Símbolos

L_t	Comprimento da tangente (km)
L_{ci}	Comprimento da i -ésima curva adjacente (m)
V_d	Velocidade diretriz (km/h)
\hat{I}	Ângulo de deflexão horizontal ($^\circ$)
L_c	Comprimento da curva (m)
L_{tm}	Extensão da tangente mínima (m)
R_M	Maior raio da curva horizontal (m)
R_m	Menor raio da curva horizontal (m)
D_g	Declividade do greide ($\%$)
L_{min}	Comprimento mínimo da curva vertical (m)
K_{min}	Parâmetro de curvatura para os valores máximos de aceleração ($m/\%$)
A	Diferença algébrica entre as declividades do greide ($\%$)
V_i	Volume do i -ésimo prismoide (m^3)
S_i	Área da extremidade do i -ésimo prismoide (m^2)
d_i	Altura do i -ésimo prismoide (m)
$S_{(A,C)}$	Área da seção transversal de corte ou aterro (m^2)
p_C	Semiplataforma de corte (m)
p_A	Semiplataforma de aterro (m)
i_A	Proporção da inclinação da saia do aterro
i_C	Proporção da inclinação da rampa de corte
t	Proporção da inclinação transversal do terreno natural
h_A	Cota vermelha de aterro (m)
h_C	cota vermelha do corte (m)
λ_i	i -ésimo gene
λ_n	n -ésimo gene
X_{min}	Longitude mínima (m)
X_{max}	Longitude máxima (m)
Y_{min}	Latitude mínima (m)
Y_{max}	Latitude máxima (m)
x_i	i -ésima longitude i (m)
y_i	i -ésima latitude i (m)
PI	Ponto de intersecção horizontal (x, y)
PI_n	n -ésimo ponto de intersecção horizontal (x, y)
T	Tangente externa da curva (m)
T_n	n -ésima tangente externa da curva horizontal (m)
R_{min}	Raio mínimo da curva horizontal (m)
$\hat{A}C$	Ângulo central da curva (rad)
$\ PI_n-PI_{n-1}\ $	Distância entre PI_n e PI_{n-1} (m)
$x'n$	n -ésima coordenada de extensão vertical do traçado (m)
z_n	n -ésima cota do greide (m)
L'_n	comprimento da n -ésima curva vertical (m)
PIV_n	n -ésima ponto de intersecção vertical (x, y)
$\ PIV_n-PIV_{n-1}\ $	Distância horizontal entre PIV_n e PIV_{n-1} (m)
P	Largura da plataforma de terraplenagem (m)

p_g	Ponto de cota do greide na seção transversal
$p_{g\pm 1}$	Pontos de extremidades da plataforma de terraplenagem
p_t	Ponto de cota do terreno
H	Diferença de cota entre o ponto de greide (p_g) e do terreno (p_t) (m)
p_a	Ponto de <i>off-set</i> de aterro
p_c	Ponto de <i>off-set</i> de corte
F	Distância horizontal entre <i>off-set</i> de corte (p_c) e aterro (p_a) (m)
CT	Custo total ($R\$$)
C_{ter}	Custo de terraplanagem ($R\$$)
V_c	Volume de material do corte (m^3)
V_a	Volume de material do aterro (m^3)
V_e	Volume de material provindo de empréstimo de jazidas (m^3)
V_e	Volume de material descartado em bota-fora (m^3)
c_c	Custo unitário do corte ($R\$/m^3$)
c_a	Custo unitário do aterro ($R\$/m^3$)
c_e	Custo unitário do empréstimo ($R\$/m^3$)
c_b	Custo unitário do bota-fora ($R\$/m^3$)
C_{pav}	Custo de pavimentação ($R\$$)
L_{rod}	Comprimento horizontal da rodovia (km)
c_{pav}	Custo unitário de pavimentação ($R\$/km$)
C_{oea}	Custo de obras de arte especiais ($R\$$)
L_{ponte}	Comprimento horizontal da ponte (km)
c_{ponte}	Custo unitário da ponte ($R\$/km$)
L_{tunel}	Comprimento horizontal do túnel (km)
c_{tunel}	Custo unitário do túnel ($R\$/km$)
C_{int}	Custo por intersecções ($R\$$)
n_{int}	Número de intersecções
c_{int}	Custo unitário por intersecção ($R\$$)
C_{des}	Custo de desapropriação ($R\$$)
a_{des}	Área total a ser desapropriada (m^2)
c_{des}	custo unitário da área a ser desapropriada ($R\$/m^2$)
C_{amb}	Custo ambiental e socioeconômico ($R\$$)
a_{amb}	Área ambiental invadida pela faixa de domínio (m^2)
c_{amb}	Custo unitário da área ambiental ($R\$/m^2$)
\angle	Ângulo entre duas retas ($^\circ$)
R_i	Raio da i -ésima curva circular horizontal (m)
Dg_{max}	Declividade máxima do greide (%)
Dg_j	Declividade do greide nos trechos entre PIV_j e PIV_{j-1}
ST_n	Número de seções trasnversais da rodovia
ST_k	k -ésima seção trasnversal
P_k	Largura da plataforma de terraplenagem da k -ésima seção trasnversal
P_{max}	Largura máxima da plataforma de terraplenagem
iC_k	Inclinação do talude de corte da k -ésima seção trasnversal
iA_k	Inclinação do talude de aterro da k -ésima seção trasnversal
iAC_{max}	Inclinação máxima do talude de corte ou aterro.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	4
1.1.1	Objetivo geral	4
1.1.2	Objetivos específicos	4
1.2	Premissas e limitações	5
2	Revisão bibliográfica	7
2.1	Rodovias	7
2.1.1	Projeto e estudos de traçado	7
2.1.2	Classes de projeto	9
2.1.3	Projeto geométrico de rodovias	10
2.2	Estimativas de custos rodoviários	17
2.2.1	Custos construtivos	18
2.2.2	Custos de manutenção	22
2.2.3	Custos dos usuários	23
2.2.4	Custos socioambientais	24
2.2.5	Outras classificações de custos	25
2.3	Dados geográficos	28
2.4	Problemas de otimização	30
2.4.1	Técnicas e modelos de resolução	31
2.4.2	Algoritmo genético	33
2.4.3	Busca tabu	35
2.4.4	Algoritmos híbridos	37
2.5	Otimização do traçado de obras rodoviárias com o uso de algoritmos meta-heurísticos	38
3	Materiais e método	49
3.1	Caracterização geométrica do indivíduo	49
3.1.1	Traçado geométrico horizontal	51
3.1.2	Traçado geométrico vertical	55
3.1.3	Seção transversal	57
3.2	Cálculo do custo	59
3.2.1	Custo de terraplenagem	60
3.2.2	Custo de pavimentação	61
3.2.3	Custo de obras de arte especiais	61

3.2.4	Custo por intersecções com obras existentes	62
3.2.5	Custo de desapropriação	62
3.2.6	Custo ambiental e socioeconômico	63
3.3	Processo de otimização	64
3.3.1	Otimização global	66
3.3.2	Otimização local	75
3.4	Implementação	75
4	Aplicação em área de estudo	77
4.1	Contextualização	77
4.2	Dados de entrada	78
4.2.1	Camadas geográficas	78
4.2.2	Características técnicas de projeto	79
4.2.3	Custos	80
4.2.4	Algoritmo de otimização	81
4.3	Resultados	82
4.3.1	Trecho I	82
4.3.2	Trecho II	84
4.3.3	Trecho III	86
4.3.4	Trecho IV	89
4.3.5	Trecho Completo	90
4.4	Comparação com projeto existente	92
5	Conclusões e discussões	97
5.1	Recomendação para trabalhos futuros	101
	Referências	103
A	Caraterísticas técnicas para projeto de rodovias	109
B	Ábacos - Critério de distância de visibilidade	111
C	Dados geográficos	113

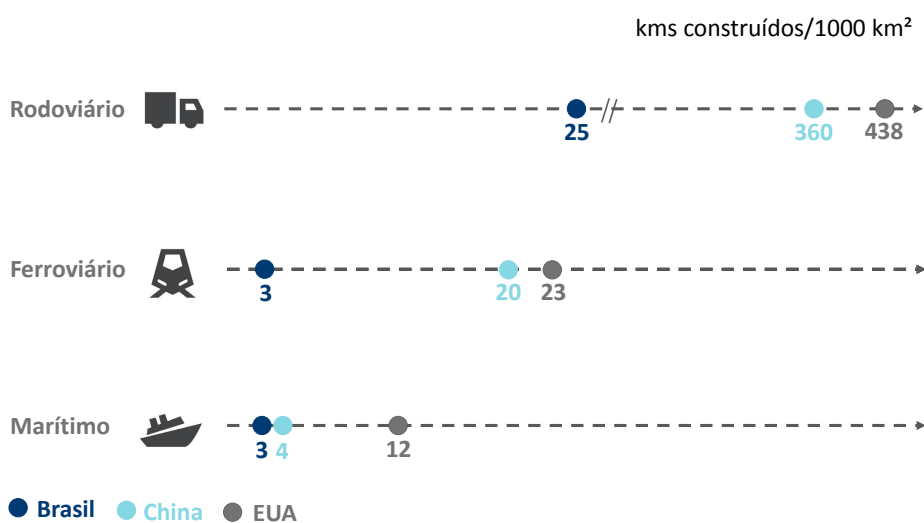
1 Introdução

O investimento em infraestrutura, em especial de transporte, produz efeitos benéficos para o desenvolvimento econômico e social de uma região ou país (MATAS; MARÍN; BARA, 2016; ISMAIL; MAHYIDEEN, 2015; DONALDSON, 2018). No entanto, dados mostram que o Brasil investe menos do que o necessário nesse tipo de obra.

Conforme Costa e Carrasco (2018), são investidos apenas cerca de 2% do Produto Interno Bruto (PIB), enquanto a China investe mais de três vezes esse valor (quase 7% do PIB) e a Índia cerca de 5,5%. Mesmo os países que já possuem uma infraestrutura bem desenvolvida, cujo foco é a manutenção (em vez de expansão), tendem a investir mais. Singapura, por exemplo, designa cerca de 2,5% do PIB e os Estados Unidos da América (EUA) investem percentual similar apenas em infraestrutura para água e transporte.

Costa e Carrasco (2018) complementam que, comparado com EUA e China, o Brasil tem cerca de 200 vezes menos estradas pavimentadas do que os EUA e a rede ferroviária tem apenas 10% do tamanho da dos EUA e da China (Figura 1).

Figura 1: Densidade da rede de transporte



Fonte: COSTA; CARRASCO (2018)

Dados do recente *The Global Competitiveness Report* (SCHWAB; MARTÍN, 2018), elaborado pelo Fórum Econômico Mundial, confirmam a necessidade de investimento em todas as áreas de infraestrutura de transporte no Brasil. Conforme apresentado na Tabela 1, entre os 137 países avaliados, o Brasil ocupa apenas a 65ª posição em infraestrutura de transporte, com ênfase negativo para a qualidade da infraestrutura rodoviária (103ª) e portuária (106ª).

Tabela 1: Posição do Brasil no *The Global Competitiveness Report*

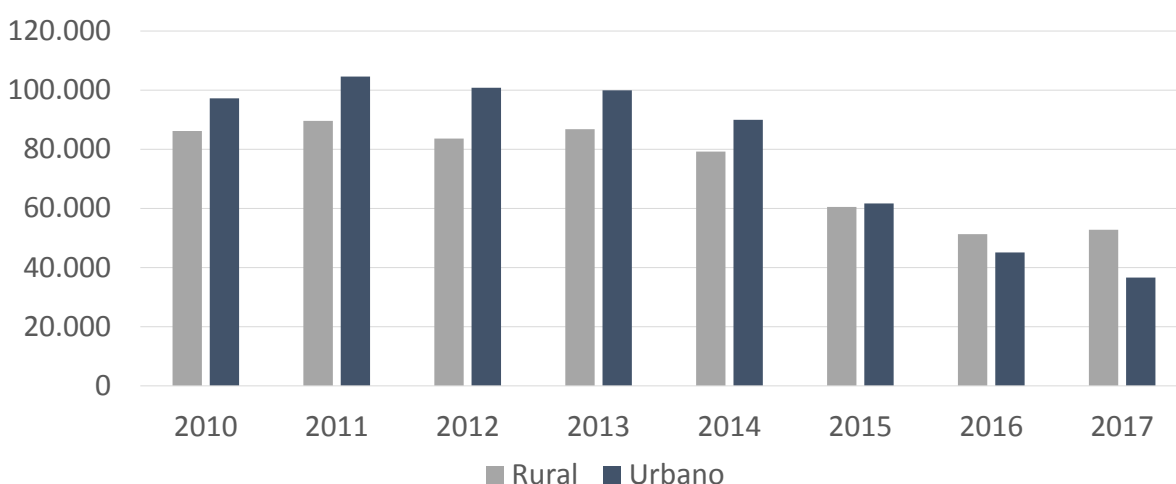
	Posição
Qualidade da infraestrutura rodoviária	103°
Qualidade da infraestrutura ferroviária	88°
Qualidade da infraestrutura portuária	106°
Qualidade da infraestrutura aeroviária	95°

Fonte: SCHWAB; MARTÍN (2018)

Outro problema enfrentado pelo país é o rápido crescimento da população urbana sem um planejamento adequado. Conforme Carmo e Junior (2019), esse crescimento populacional está associado à expansão urbana, a qual, não raramente, tem ocorrido em áreas ao longo da infraestrutura rodoviária. Os autores complementam que, rodovias rurais, que antes ligavam cidades, foram envolvidas pela urbanização. As rodovias inseridas nesses ambientes tornam-se a alternativa para deslocamentos mais rápidos, podendo ser também a ligação entre cidades vizinhas, em aglomerações urbanas cada vez mais próximas. Assim, nessas rodovias, antes exclusivamente rurais, o tráfego urbano e o de passagem se confundem, causando maiores riscos de ocorrência de acidentes.

O gráfico da Figura 2 apresenta dados de acidentes por tipo de solo, organizados no Anuário de Segurança Rodoviária 2010-2017 (BRASIL, 2017) com dados da Polícia Rodoviária Federal (PRF). Nota-se que, apesar da diminuição no número de acidentes, no ano de 2017 ocorreram mais de 89 mil acidentes de trânsito nas rodovias federais, dos quais cerca de 69% (36.618) ocorreram em áreas urbanas, causando um total de 1.652 mortes.

Figura 2: Acidentes por tipo de uso de solo em rodovias federais



Fonte: BRASIL (2017)

Conforme DNIT (2018b), o tráfego rodoviário pode ter sérios impactos negativos nas aglomerações urbanas sob vários aspectos, tais como a segurança de motoristas e pedestres, níveis de ruído

e poluição, concorrência entre o tráfego local e o de longa distância, entre outros. Para mitigar tais impactos pode-se optar pela construção de contornos rodoviários, que desviam o tráfego intermunicipal das regiões com maior adensamento populacional. Define-se contorno rodoviário como trecho de rodovia destinado à circulação de veículos na periferia das áreas urbanas, de modo a evitar ou minimizar o tráfego no seu interior, sem circundar completamente a localidade, sendo uma alternativa intermediária ao anel rodoviário, que circunda completamente a localidade (DNIT, 2002).

Em um contexto de recursos sempre inferiores às necessidades, Costa e Carrasco (2018) consideram que o país enfrenta atualmente uma das maiores crises fiscais da sua história e não será possível promover a melhoria necessária na infraestrutura com recursos públicos. Isso causa dificuldades para a administração pública na garantia de fundos adequados para a construção de novas obras de transporte, visto que essas geralmente dependem muitos investimentos governamentais.

Essa necessidade de investimento na infraestrutura de transporte aliada à dificuldade financeira faz com que seja essencial procurar soluções para que os recursos sejam utilizados da melhor forma possível. Em outras palavras, novas obras de transporte necessitam impreterivelmente de um bom planejamento, que otimize o uso dos recursos.

Para maximizar o impacto da expansão da infraestrutura sobre a produtividade e segurança, é necessário que haja planejamento com priorização e governança que estimulem o dimensionamento adequado das obras. Do contrário, desperdiçam-se recursos em projetos de baixo retorno econômico e social ou que acabam por gerar capacidade ociosa, alocando recursos escassos de forma ineficiente (COSTA; CARRASCO, 2018).

Com relação especificamente ao planejamento e projeto de novas obras lineares de transporte, uma das principais tarefas é encontrar um traçado com o menor custo de implantação que concilia todos os requisitos, condições e restrições nos âmbitos ambiental, social e político. De acordo com Gipps et al. (2001), a solução mais economicamente viável de traçado seria seguir a superfície natural do terreno, no entanto isso é frequentemente impossível, já que o alinhamento está sujeito a muitas restrições. Devem ser garantidas inúmeras questões ambientais para que a obra não reduza a biodiversidade ou não degrade tanto o meio ambiente. O problema se torna mais complexo em ambientes urbanos ou semi-urbanos (como no caso dos contornos rodoviários), onde a construção da obra também é influenciada pela localização da mancha urbana. Por conta disto, o planejamento do traçado de uma obra de alta qualidade e baixo custo se torna uma arte de grande dificuldade. Devido a isso, muitas vezes, o número de traçados estudados é limitado, pois não há tempo nem recursos suficientes na fase de planejamento para investigar e calcular mais do que alguns traçados para o projeto final.

O planejamento de novas rodovias inicia com a investigação em uma ampla área de estudo, reduzindo-se a vários corredores até, finalmente, se desenvolver projetos geométricos detalhados no corredor selecionado. Esse procedimento requer julgamentos de profissionais em vários campos de

estudo, que incluem engenheiros, economistas, geólogos e ambientalistas (JHA et al., 2006).

Na questão da otimização do uso de recursos, avançou-se muito em técnicas de busca de resultados satisfatórios em problemas de grande complexidade. Diversas heurísticas e meta-heurísticas combinadas com técnicas de Pesquisa Operacional, da inteligência artificial e computacional surgiram como alternativas aos métodos exatos para resolução de problemas de alta complexidade computacional (BELFIORE; FAVERO, 2012).

Ainda, o desenvolvimento de novas tecnologias e o suporte propiciado pelos computadores em conjunto com técnicas de otimização fizeram com que o processo de planejamento de obras lineares de transporte fosse agilizado. Com o tempo, novas técnicas de definição de traçados lineares foram desenvolvidas, essas tecnologias incluem plataformas de *Computer Aided Design* (CAD) e de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). É possível, por exemplo, com o uso de tecnologias de SIG, espacializar e analisar os requisitos, condições e restrições presentes no planejamento de uma obra linear. Com a automatização computacional dos processos e o auxílio de métodos de tomada de decisão é possível analisar e gerar um maior número de rotas em um menor tempo. Além disso, pode-se visualizar e compreender as mudanças, vantagens e desvantagens das alternativas de traçado na área de implantação da obra linear.

Conforme Menezes et al. (2014), a automação de projetos viários por meio de computadores transformou-se numa ferramenta que poupa cálculos e trabalhos árduos. Atualmente, existem vários *softwares* disponíveis no mercado, porém, na maioria das vezes, estes não são acessíveis devido ao seu alto custo de aquisição, pouca oferta de cursos operacionais e/ou suporte e até mesmo a dificuldade de compreensão de termos técnicos em diferentes linguagens.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver, implementar e aplicar um modelo meta-heurístico para auxiliar a escolha do traçado geométrico de rodovias.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Elencar as limitações técnicas e geométricas dos traçados viários, considerando as regras e limitações de geometria dos manuais brasileiros;
- Elencar os custos que estão envolvidos na escolha do traçado das rodovias e os procedimentos existentes de cálculo desses custos;

- Implementar um modelo com o relacionamento entre os custos e as configurações geométricas do traçado;
- Implementar e utilizar um algoritmo de otimização com o objetivo de minimizar os custos considerados durante a determinação do traçado;
- Verificar o resultado de aplicação do método, comparando com traçados já implantados ou planejados.

1.2 Premissas e limitações

Assume-se as seguintes premissas e limitações:

- O modelo se enquadra na utilização para estudos de traçado geométrico de rodovias em nível de planejamento (Seção 2.1.1).
- A pesquisa não pretende utilizar todos os componentes de custos utilizados em orçamentos de novas rodovias. As medições para o cálculo dos custos e os próprios custos unitários são estimativas aproximadas utilizadas em nível de planejamento (Seção 2.2).
- Algoritmos meta-heurísticos (Seção 2.4), utilizados nessa pesquisa, não garantem a otimalidade da solução final encontrada, nem informam o quão próximo do ótimo ela está (BELFIORE; FAVERO, 2012).

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta informações quanto ao planejamento de rodovias, tipos de projeto e estimativas de custo; visão geral sobre dados geográficos e sua aplicação no planejamento de transportes; visão geral sobre problemas de otimização e, especificamente, sobre a otimização por meio de algoritmo genético e busca tabu; e, finalmente, a otimização aplicada especificamente às obras de traçado rodoviário.

2.1 Rodovias

O Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) classifica rodovia como uma via rural pavimentada. Diferentemente da via urbana, rodovia é um caminho público de transporte interurbano, destinado à circulação de veículos fora do perímetro das cidades. As rodovias devem ser construídas de acordo com certos requisitos técnicos presentes em manuais, diretrizes e instruções de serviço.

Esta seção trata sobre algumas das características das rodovias, elenca informações sobre o processo de planejamento, projeto geométrico e procedimentos para estimativa dos custos de implantação.

2.1.1 Projeto e estudos de traçado

Para fins de contextualização, é necessário diferenciar as diversas fases de planejamento e projetos necessários para a implantação de uma rodovia.

Denomina-se Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica-Ambiental (EVTEA) de rodovias o conjunto de estudos desenvolvidos para avaliação dos benefícios sociais e econômicos decorrentes dos investimentos na implantação de novas rodovias. O EVTEA deve demonstrar se a alternativa escolhida, sob o enfoque de traçado e características técnicas e operacionais, oferece maior benefício que outras, em termos de custo total de transporte (DNIT, 2006).

Por sua vez, o Projeto Básico deve conter o conjunto de elementos necessários e suficientes com nível de precisão adequado, para caracterizar a obra, ou serviços, de implantação e/ou pavimentação de segmentos rodoviários (DNIT, 2006).

Enquanto que, o Projeto Executivo atende o conjunto de elementos necessários e suficientes para execução completa da obra, de acordo com todas as Normas Técnicas (DNIT, 2006).

Todas as três fases (EVTEA, Básico e Executivo) do projeto exigem o estudo preliminar de traçado. No entanto, somente a partir do Projeto Básico é exigido o projeto geométrico completo da rodovia. O presente trabalho, ainda que tenha como objetivo o estudo de traçado, possui elementos já encontrados no Projeto Geométrico do Projeto Básico. Assim, é válido diferenciar:

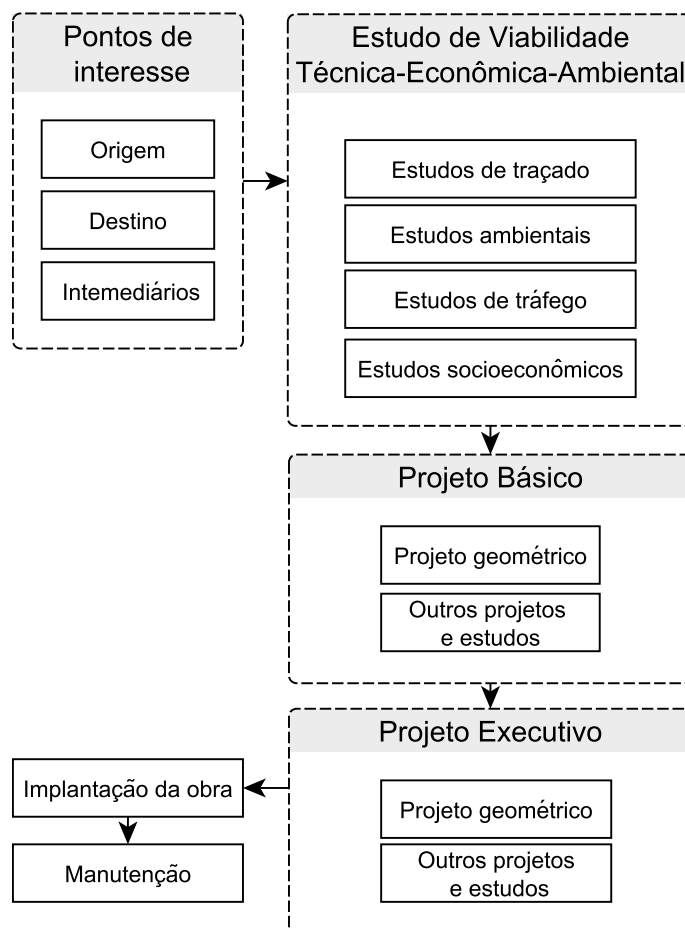
- a. **Estudo preliminar de traçado (contido no EVTEA)** - Estabelecimento das diretrizes tecnicamente possíveis da rodovia. As alternativas de traçado, inicialmente estabelecidas,

deverão ser comparadas entre si. A etapa finaliza com a seleção da alternativa de traçado que mais atende aos objetivos do projeto (DNIT, 2006).

b. Projeto geométrico (contido nos projetos básico e executivo) - O projeto geométrico é elaborado a partir dos elementos obtidos nos estudos topográficos. Visa à definição geométrica da travessia projetada, com seu alinhamento planialtimetricamente detalhado, além da determinação da configuração geométrica da seção transversal da rodovia, das ruas laterais, dos acessos e dos retornos (DNIT, 2006).

O Fluxograma da Figura 3 resume o apresentado quanto as fases de planejamento e projetos necessários para a implantação de uma rodovia.

Figura 3: Estudos e projetos para implantação de uma rodovia



Fonte: Elaborado pelo autor com informações de DNIT (2006)

Para o início do planejamento do estudo de traçado pressupõe-se sempre a existência de dois pontos (origem e destino) a serem ligados pela obra. No entanto, no desenvolvimento dos estudos de traçado, poderão vir a ser estabelecidos, além dos pontos de início e de fim do traçado, outros pontos intermediários que devem ser obrigatoriamente atingidos pelo traçado (LEE, 2017).

Após a identificação dos pontos de interesse (origem, destino e intermediários), deve-se realizar o reconhecimento da área de estudo. Conforme Lee (2017), a etapa de reconhecimento da área de estudo compreende a realização de estudos topológicos, com o objetivo de definir a forma global e a conformação do terreno. Tais estudos topológicos consistem na observação detalhada da configuração ou forma da região situada entre os pontos extremos que se quer ligar pela rodovia. Deve-se registrar planimétrica e/ou altimetricamente os acidentes geográficos e identificar características da região de estudo. A forma de ser realizada depende das características da região, dos recursos disponíveis e do próprio tipo de projeto a realizar.

No geral, pode-se concluir que o reconhecimento da superfície, ou seja, da área de estudo é de extrema importância para a definição do traçado. A escolha do melhor traçado envolve várias informações de diversas áreas do conhecimento, como também de diversas fontes e requer a análise de uma grande quantidade de informações.

Após a etapa de coleta de dados inicia-se a identificação e estudo das alternativas de diretrizes de traçado. DNIT (2006) define que as alternativas de traçado, inicialmente estabelecidas na Fase Preliminar, deverão ser comparadas entre si. Essa comparação deve considerar os custos preliminares de implantação, estimativa do volume de terraplenagem, quantidade e extensão de obras de arte especiais e túneis, e as características técnicas de cada alternativa. Em consequência dessa avaliação preliminar deve ser possível reduzir as alternativas concebidas, que serão avaliadas e comparadas com um maior detalhamento na fase seguinte.

Por sua vez, a Fase Definitiva abrange a análise e avaliação das alternativas e a definição de suas concepções geométricas. Nessa fase é feita a seleção da alternativa de traçado, onde deve ser considerada a análise da compatibilidade técnica das alternativas com os objetivos do projeto, e a avaliação de suas implicações econômicas.

Nota-se que, não importa o tipo de projeto, deve-se realizar a análise integrada dos dados e suas interações, de forma a obter-se um quadro referencial da área de estudo, que irá subsidiar a seleção da traçado. Devem ser considerados aspectos socioambientais, técnicos e restrições referentes a cada tipo de obra. A definição do traçado deve buscar a minimização do custo total e dos impactos sócio-ambientais causados por sua implantação.

2.1.2 Classes de projeto

O *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais* (DNER, 1999) estabelece cinco classes de projeto. Conforme DNER (1999), em um extremo situam-se as rodovias do mais alto nível, com mais de uma pista, interseções em desnível e controle total de acesso de veículos e bloqueio total de pedestres: Classe 0. No outro extremo, tem-se as estradas vicinais e pioneiras. Essas rodovias se destinam a canalizar a produção para o sistema viário troncal e centros de armazenagem, consumo, industrialização, comercialização ou exportação, assegurar acesso a grupos populacionais

com baixa acessibilidade e a áreas inexploradas passíveis de ocupação ou, ainda, de atender decisões de colonização e integração à comunidade nacional de áreas ou territórios isolados: Classes III e IV.

Para cada classe de projeto é estabelecida a velocidade diretriz mínima em função do relevo da região atravessada. A velocidade diretriz condiciona a fixação dos limites das demais características geométricas da rodovia. O Anexo A traz a tabela com as classes de projeto para novos traçados de rodovias em áreas rurais e as características técnicas com os valores recomendados pelo manual (DNER, 1999).

Conforme Lee (2017), não há critérios objetivos para estabelecer o relevo de uma determinada região. Essa definição é realizada pelo projetista com base em sua experiência e percepção.

Assim, após a definição da classe de projeto da nova rodovia e do relevo do terreno obtém-se as principais características técnicas e restrições a serem observadas na realização do projeto geométrico da rodovia.

2.1.3 Projeto geométrico de rodovias

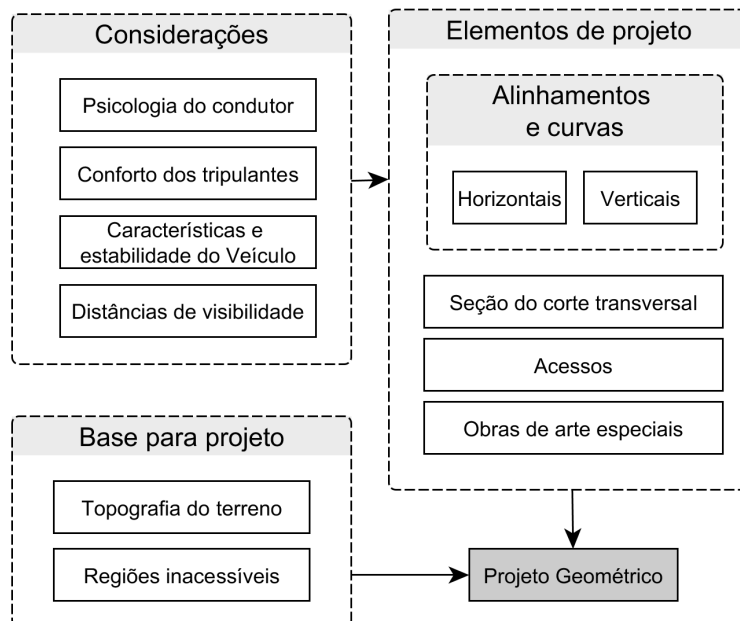
Nesta seção são apresentados os elementos do projeto geométrico de rodovias, bem como as recomendações a serem observadas na definição dos traçados de rodovias. Utilizou-se como referências primárias o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999) e o livro Introdução ao Projeto Geométrico de Rodovias (LEE, 2017).

Segundo Hassan, Easa e Halim (1998), o projeto geométrico deve conter os elementos visíveis da rodovia, respeitar as leis da cinemática e dinâmica, as características físicas dos veículos e a psicologia dos condutores, com o objetivo de produzir rodovias seguras. Conforme representado na Figura 4, essas considerações geram restrições, que por sua vez influenciam o projeto de todos os elementos da rodovia.

Conforme Lee (2017), é importante lembrar que a rodovia apresenta-se aos usuários como uma entidade tridimensional, em perspectiva natural, com todos os seus elementos atuando de forma combinada sobre os usuários em movimento, sujeitando-os a esforços dinâmicos que podem afetar a fluidez do tráfego, as condições de segurança e a qualidade do projeto. Lee (2017) conclui que, é necessário que o projetista busque a continuidade espacial mediante intencional e criteriosa coordenação dos seus elementos geométricos.

Em outras palavras, os elementos de uma rodovia podem ser referenciados geometricamente a uma linha fluente e contínua ou decompostos em três dimensões, o plano horizontal (elementos em planta), o plano vertical (elementos altimétricos) e o plano transversal (elementos em seção transversal).

Figura 4: Elementos do projeto geométrico

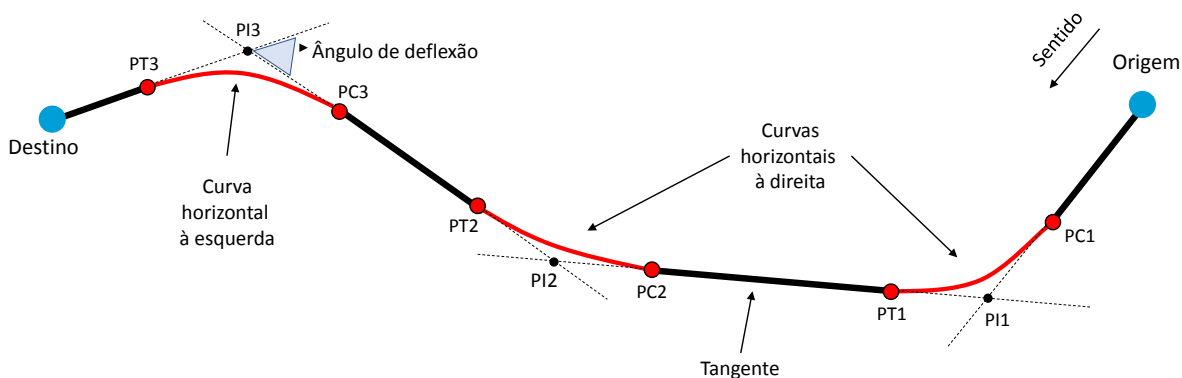


Fonte: Adaptado de HASSAN; EASA; HALIM (1998).

Elementos planimétricos Conforme Lee (2017), o eixo de uma rodovia (Figura 5) pode ser imaginado como uma poligonal aberta, orientada, cujos alinhamentos são concordados nos vértices (Pontos de Intersecção) por curvas horizontais. Assim, o eixo compreenderá trechos retos (tangentes) e curvas.

Com o objetivo de caracterizar os elementos da rodovia, estes deverão ter sua geometria definida em pontos sucessivos ao longo do eixo. Esses pontos são denominados **estacas**. O ponto de origem do projeto constitui a estaca 0 (zero). As demais estacas são marcadas a cada 20,00 metros (em tangentes) e a cada 10,00 metros em curvas com raios menores que 600 metros (LEE, 2017).

Figura 5: Elementos do eixo de uma rodovia no plano horizontal



Fonte: Adaptado de LEE (2017)

Lee (2017) resumiu as principais recomendações de DNER (1999) quanto ao traçado em planta:

- a. os traçados em planta devem ser constituídos por arcos de raios e desenvolvimento tão amplos quanto a topografia o permitir;
- b. as tangentes longas devem ser evitadas, exceto quando harmonizem com a paisagem, ou em travessias urbanas de ordem dominante retilínea. Estas devem seguir as seguintes fórmulas:

$$L_t \leq 3(km) \quad (1)$$

$$L_t \leq 2,5 \cdot \frac{L_{c1} + L_{c2}}{2} \quad (2)$$

$$L_t \leq V_d(km/h) \cdot 0,025(h) \quad (3)$$

onde:

L_t = extensão da tangente;

L_{ci} = comprimento da curva adjacente;

V_d = velocidade diretriz.

- c. o traçado deve ser direcionado e adaptado à topografia. Os ângulos de deflexão (\hat{I}) devem estar situados entre 10 e 35 graus (Equação 4);

$$10^\circ \leq \hat{I} \leq 35^\circ \quad (4)$$

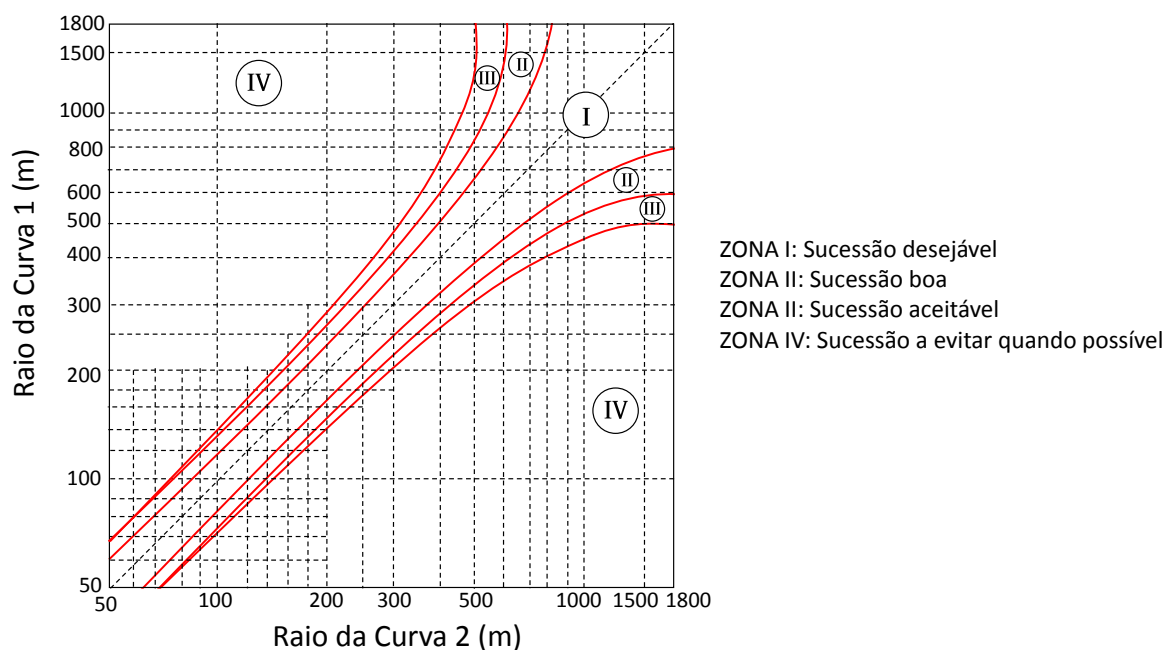
- d. o comprimento mínimo do percurso em curva é definido pela Equação 5 e deve-se evitar o uso de curvas com raios maiores que 5000 m (Equação 6);

$$L_c (m) > 30 \cdot (10 - I) \quad (5)$$

$$L_c (m) < 5000 (m) \quad (6)$$

- e. o raio mínimo da curva horizontal é definido conforme a classe da rodovia e tipo de terreno, vide tabela do Anexo A;
- f. nas extremidades das tangentes longas não devem ser projetadas curvas de raios pequenos;
- g. a passagem de raios grandes para raios pequenos deve ser feita de forma gradativa, deve-se evitar grandes variações;
- h. a relação entre raios de curvas consecutivas deve estar de acordo com os critérios da Figura 6;

Figura 6: Critérios para escolha de raios de curvas sucessivas



Fonte: Adaptado de DNER (1999)

- i. duas curvas horizontais de sentidos opostos devem ser concordadas, preferencialmente, com a tangente mínima necessária;

$$L_{tm} > V_d \cdot 4 \quad (7)$$

onde:

L_{tm} = extensão da tangente mínima em metros;

V_d = velocidade diretriz em km/h.

- j. duas curvas horizontais de mesmo sentido devem ser concordadas com tangente intermediária mínima ou curva composta. A relação entre o raio maior e o raio menor (R_M/R_m) deve seguir as seguintes limitações:

$$R_2 < 100 \text{ m} \rightarrow \frac{R_M}{R_m} < 1,3 \quad (8)$$

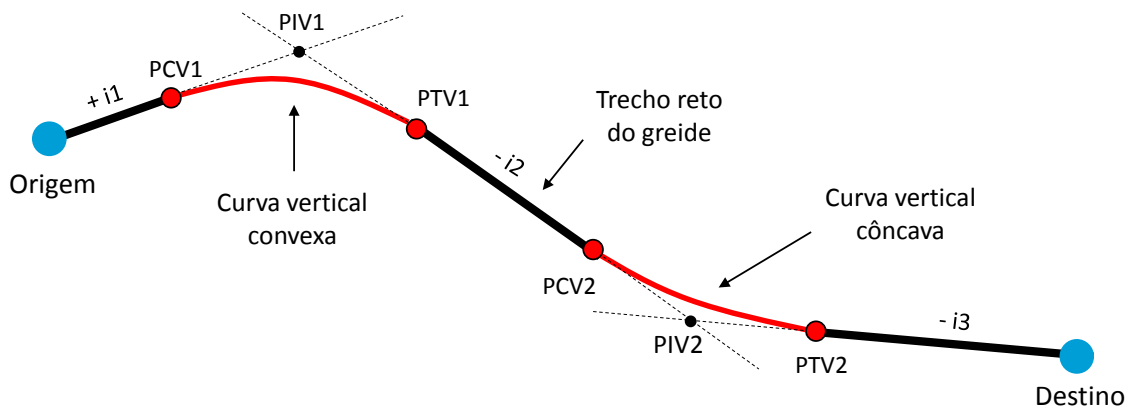
$$100 \text{ m} < R_2 < 500 \text{ m} \rightarrow \frac{R_M}{R_m} < 1,5 \quad (9)$$

$$500 \text{ m} < R_2 < 1000 \text{ m} \rightarrow \frac{R_M}{R_m} < 1,7 \quad (10)$$

$$1000 \text{ m} < R_2 \rightarrow \frac{R_M}{R_m} < 2,0 \quad (11)$$

Elementos altimétricos Segundo Lee (2017), os elementos altimétricos estão contidos no plano vertical da rodovia, que pode ser considerado como uma superfície cilíndrica, gerada pelo deslocamento de uma reta vertical ao longo do eixo projetado. O greide é a representação do eixo da rodovia segundo o eixo vertical. Os elementos do greide podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7: Elementos do eixo de uma rodovia no plano vertical



Fonte: Adaptado de LEE (2017)

Assim como para o traçado em planta, Lee (2017) resumiu as principais recomendações de DNER (1999) quanto ao traçado em perfil:

- a. o greide deve ser suave e uniforme, deve-se evitar constantes quebras do alinhamento vertical e os pequenos comprimentos com rampas diferentes.
- b. Nos trechos em corte ou em seção mista, o greide deve respeitar a declividade (D_g):

$$D_g > 1,000\% \quad (12)$$

- c. nos trechos em corte, deve-se evitar concavidades com rampas de sinais contrários;
- d. em regiões planas, o greide deve ser preferencialmente elevado;
- e. o comprimento mínimo das concordâncias das curvas verticais deve respeitar os seguintes critérios:

- Critério do mínimo valor absoluto:

$$L_{min} = 0,6 \cdot V_d \quad (13)$$

onde:

L_{min} = comprimento mínimo da curva vertical (m);

V_d = velocidade diretriz em km/h.

- Critério da máxima aceleração centrífuga admissível:

$$L_{min} = K_{min} \cdot |A| \quad (14)$$

onde:

K_{min} = parâmetro de curvatura para os valores máximos de aceleração centrífuga admissível (m/%)

A = diferença algébrica entre as declividades do greide nas extremidades da concordância (%)

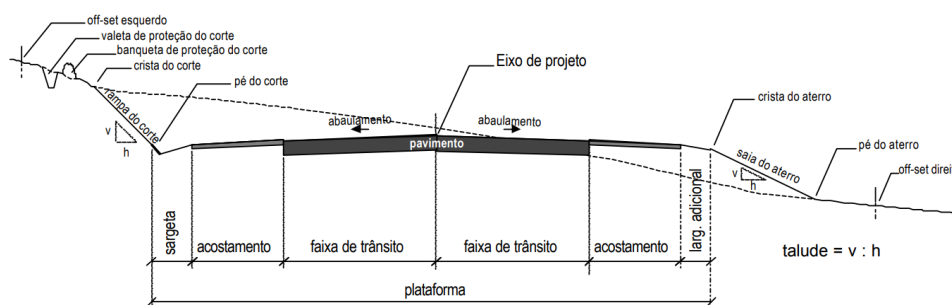
- Critérios da distância de visibilidade: Conforme ábacos do Anexo B.

Lee (2017) completou a lista com as recomendações quanto ao traçado coordenado em planta e em perfil:

- a. tangentes e curvas horizontais de grandes raios não devem estar associadas a rampas elevadas;
- b. curvas horizontais de pequenos raios não devem estar associadas a rampas pequenas;
- c. tangentes longas devem estar, sempre que possível, associadas a curvas verticais côncavas;
- d. o vértice da curva horizontal deve coincidir ou ficar próximo do vértice da curva vertical;

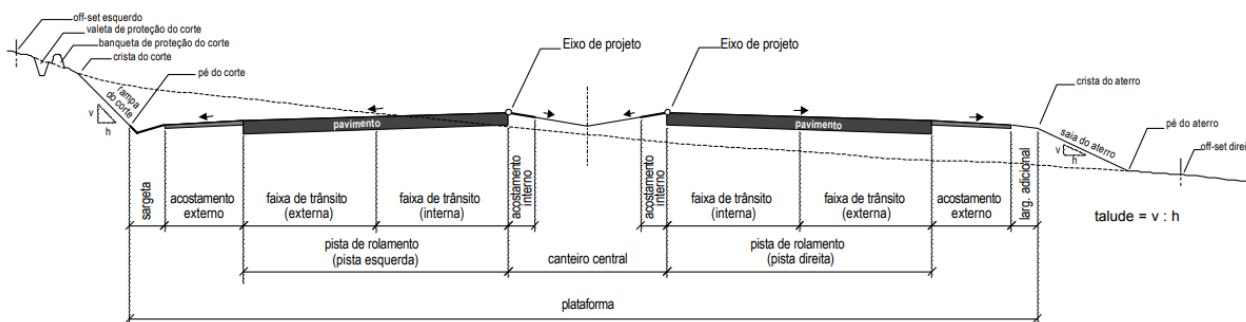
Elementos de seção transversal Conforme Lee (2017), os elementos das seções transversais são configurados de acordo com as exigências e/ou recomendações das normas em função da classe de projeto adotada. Isso define as seções-tipo da rodovia. A Figura 8 apresenta exemplos de elementos para rodovias de pista simples, enquanto que a Figura 9 para rodovias de pista dupla.

Figura 8: Elementos da seção transversal - rodovias pista simples (seção-tipo de projeto)



Fonte: LEE (2017)

Figura 9: Elementos da seção transversal - rodovias pista dupla (seção-tipo de projeto)



Fonte: LEE (2017)

Lee (2017) cita os principais elementos constituintes das seções transversais, sendo:

- a. Largura da faixa de trânsito: estabelecida pelas normas, varia em função da classe de projeto. Deve ser sempre maior que a largura máxima dos veículos autorizados a transitar pela rodovia;
- b. Largura dos acostamentos: exerce função básica de melhorar as condições de fluidez e os níveis de serviço oferecidos pela rodovia, pois favorece a redução de interferências no tráfego;
- c. Declividades transversais em tangentes: utilizadas para o abaulamento da pista para facilitar o escoamento transversal das águas pluviais;
- d. Sarjeta de cortes: varia basicamente com o dimensionamento hidráulico, os padrões de projeto e os materiais disponíveis para sua construção;
- e. Defensas e barreiras rígidas: são equipamentos de segurança dispostos longitudinalmente em relação às trajetórias dos veículos que transitam pela rodovia. Possuem o objetivo de impedir que os veículos desgovernados fiquem sujeitos a choques frontais ou a tombar em aterros com taludes íngremes, caso saiam da pista;

- f. Taludes de cortes e aterros: as inclinações máximas das rampas de cortes e saias dos aterros dependem basicamente dos respectivos dimensionamentos, para fins de estabilização geotécnica, que podem ser efetuados em função das características dos materiais envolvidos. Deve-se avaliar o *tradeoff* entre o custo de construção, devido aos maiores volumes de terraplenagem, e o uso de taludes mais suaves;
- g. Gabaritos verticais e horizontais: o gabarito vertical representa a menor altura livre, acima da pista de rolamento, que é assegurada ao longo de toda a extensão da rodovia, com o objetivo de assegurar a passagem dos veículos mais altos. De modo similar, o gabarito horizontal é a largura, referenciada ao eixo da rodovia, livre de obstáculos para o trânsito de veículos;
- h. Faixa de domínio: faixa de terras que envolve o eixo da rodovia projetada, com largura suficiente para comportar os seus elementos constituintes, de modo a permitir a sua construção, operação, e manutenção, em condições adequadas de segurança.

2.2 Estimativas de custos rodoviários

De acordo com Kerali (2000), um dos primeiros modelos de avaliação de projetos rodoviários foi desenvolvido em 1968 pelo Banco Mundial em conjunto com o *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL) e o *Laboratoire Central des Pontset Chaussées* (LCPC). Posteriormente, o Banco Mundial contratou o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) para construir um modelo com base nas informações disponíveis na época. Tais iniciativas foram o início da construção do modelo *Highway Development and Management* (HDM).

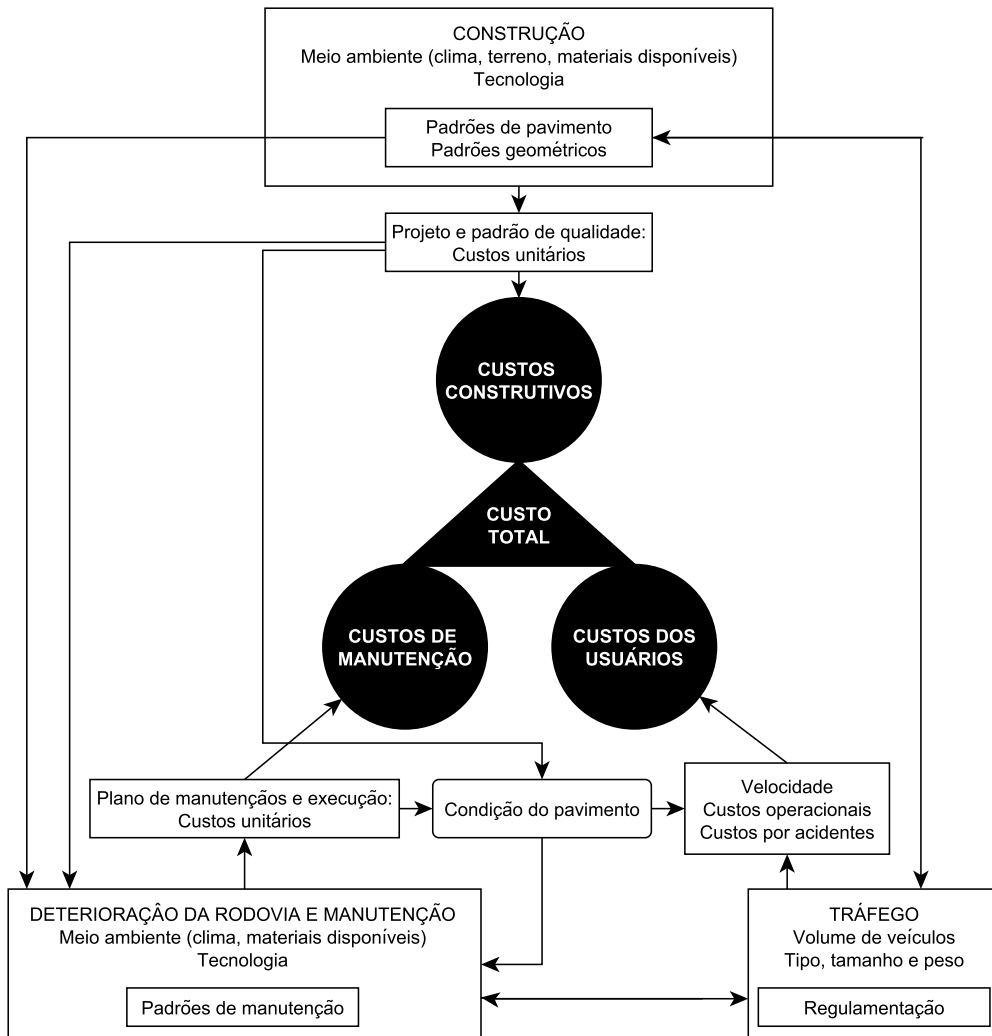
Conforme Watanatada (1988), o HDM foi desenvolvido para estimar custos de construção e manutenção, facilitar as avaliações econômicas e possibilitar a comparação e análise de diferentes investimentos e políticas de um determinado projeto ou para toda a rede.

Ainda segundo Watanatada (1988), o HDM possui três conjuntos de custo:

- Custos construtivos: relativos à construção de novas rodovias;
- Custos de manutenção: relativos à manutenção das rodovias existentes;
- Custos dos usuário: custos para quem usa a infraestrutura.

O custo final é calculado a partir da previsão de consumo dos recursos (em um determinado horizonte de tempo) multiplicados pelos seus respectivos custos unitários. A melhor alternativa de projeto seria aquela indicada pelo maior retorno em seu Valor Presente Líquido. O conceito da relação entre os custos do HDM é ilustrado na Figura 10.

Figura 10: O modelo HDM



Fonte: Adaptado de WATANATADA (1988)

Em consonância com o modelo, mas sem se limitar aos custos aplicados no HDM, diversos autores desenvolveram modelos de quantificação de custos rodoviários. São apresentados nos próximos tópicos conceitos e formulações de custos utilizados em algoritmos de otimização de traçado (Seção 2.5).

2.2.1 Custos construtivos

Como já mencionado, são os custos relacionados diretamente à construção da rodovia. São constituídos pelo somatório dos valores dos insumos (mão-de-obra, equipamentos e materiais) empregados em sua execução e dos custos indiretos incorridos. Os custos de execução ou de produção são parâmetros técnicos e podem ser obtidos de forma racional, por meio dos serviços que compõem a execução da obra, suas respectivas quantidades, bem como as quantidades de insumos necessários para a produção de cada unidade de serviço (DNIT, 2017). Segundo DNIT (2003), os

custos de obras rodoviárias são sensíveis à sua localização geográfica, às condições naturais, sociais, econômicas e logísticas encontradas.

Custo de movimentação de terra - terraplenagem Segundo Chew, Goh e Fwa (1989), o custo de terraplenagem representa em torno de 25% dos custos construtivos. Geralmente é dividido em custo de corte e aterro. Esses custos referem-se basicamente ao volume de terra movimentada, embora o custo unitário de escavação possa variar com a profundidade do corte e o tipo de solo escavado.

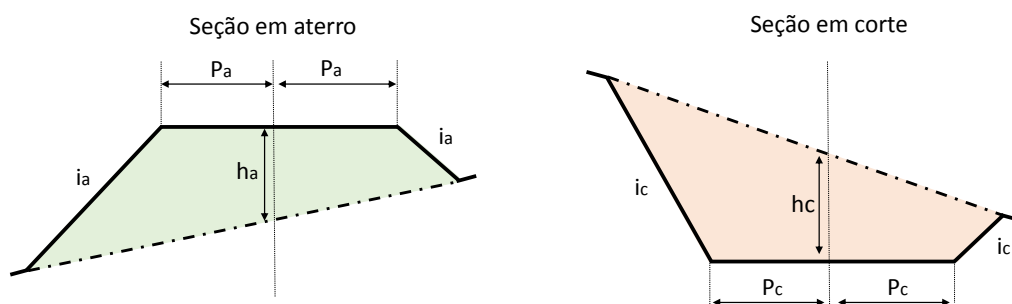
Como disposto em Gipps (1992), a informação geotécnica do solo utilizado é de grande importância. Há casos em que o solo escavado não possui uma composição uniforme, mas extratos com propriedades físicas diferentes que requerem ângulos diferentes para a estabilização dos taludes de corte e aterro. De modo similar, o solo usado no aterro deve possuir propriedades geomecânicas apropriadas. Chew, Goh e Fwa (1989) complementam que o custo de transporte do solo entre o local de implantação da rodovia, bota-fora e jazida também deve ser considerado.

Segundo Lee (2017), o procedimento convencional para a determinação dos volumes de corte e aterro consiste em calcular os volumes dos sólidos geométricos individuais formados entre cada par de estacas, acumulando-se os volumes individuais sucessivos ao longo do eixo da rodovia. O método da média das áreas (S) pode ser utilizado para o cálculo dos volumes. Esse método considera que o volume do prismaide (V) é calculado multiplicando-se a média aritmética das áreas nas extremidade do prismaide pela altura (d), conforme Equação 15.

$$V_{i,i+1} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \cdot d_{i,i+1} \quad (15)$$

Para o cálculo das áreas, podem ser usados diversos métodos, como o método de Gauss ou, de forma simplificada, por meio de modelos matemáticos (Equações 16, 17 e 18) em função de alguns parâmetros elementares que constituem as seções transversais típicas, detalhados na Figuras 11 e 12.

Figura 11: Seções transversais de corte e aterro

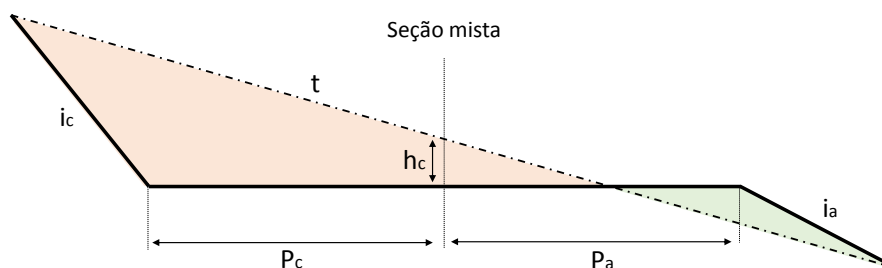


Fonte: Adaptado de LEE (2017)

Para corte e aterro:

$$S_{(A,C)} = \frac{i_{(A,C)} \cdot (|h_{(A,C)}| + i_{(A,C)} \cdot p_{(A,C)})^2}{i_{(A,C)}^2 - t^2} \quad (16)$$

Figura 12: Seções transversal mista



Fonte: Adaptado de LEE (2017)

Para seção mista:

$$S_A = \frac{i_A \cdot (t \cdot p_A - h_{(A,C)})^2}{2 \cdot t \cdot (i_A - t)} \quad (17)$$

$$S_C = \frac{i_C \cdot (t \cdot p_C - h_{(A,C)})^2}{2 \cdot t \cdot (i_C - t)} \quad (18)$$

onde:

$S_{(A,C)}$: área de aterro ou de corte da seção transversal (m^2);

p_C : semiplataforma de corte (m);

p_A : semiplataforma de aterro (m);

i_A : talude da saia do aterro (proporção);

i_C : talude da rampa de corte (proporção);

t : declividade transversal do terreno natural (proporção);

h_A : cota vermelha de aterro (m); e

h_C : cota vermelha do corte (m).

As seções transversais (Figuras 11 e 12) podem ser obtidas por meio da comparação da cota do greide da rodovia com a cota do terreno onde a rodovia percorre. Portanto, tal qual apresenta Jha e Schonfeld (2004), a precisão do cálculo do volume dependerá da disponibilidade de dados de elevação do terreno. Dados de elevação de escala apropriada, no entanto, só podem ser obtidos por

meio de levantamentos topográficos ou aerofotogramétricos, que geralmente são serviços de alto custo. Os autores sugerem que, para avaliações em nível de planejamento, é aceitável usar técnicas de interpolação para obter as seções transversais.

Custo de drenagem e contenção do solo Para Chew, Goh e Fwa (1989), os componentes de drenagem geralmente não são afetados pelo alinhamento da rodovia, mas dependem mais do material de pavimentação selecionado, dos fatores climáticos e do projeto dos elementos da seção transversal da rodovia. O custo de contenção do solo é afetado pela inclinação das rampas de corte e das saias de aterro e pelas características geotécnicas do solo local.

Custo de pavimentação Conforme apresentam Chew, Goh e Fwa (1989), o custo de pavimentação geralmente é calculado a partir da espessura das camadas do pavimento e dos custos unitários dos materiais e serviços utilizados. O custo pode variar ao longo da rodovia, uma vez que as características geomecânicas do solo e do tráfego variam também. Pode ser modelado em função da localização do tipo de solo utilizado dentro da área de estudo como em Vázquez-Méndez et al. (2018), ou simplificada em função do comprimento da rodovia como em Jong e Schonfeld (2003).

Custo de obras de arte especiais (OAE) Segundo Kang, Jha e Schonfeld (2012), estruturas especiais podem ser incluídas na construção de rodovias. Essas estruturas incluem pontes para cruzar rios ou vales, túneis e cruzamentos com outras rodovias existentes. Especialmente em terrenos montanhosos e áreas fluviais, a construção de túneis e pontes representam um significativo custo construtivo. De forma simples, para planejamento, o custo de construção das OAEs pode ser calculado em função do comprimento e seção transversal da OAE.

Kim et al. (2007) citam que é difícil predeterminar as diferenças de elevação críticas entre o terreno e a cota do greide da rodovia para que a construção de OAEs se torne preferível às plataformas de corte e aterro. Isso ocorre, uma vez que as diferenças críticas de elevação são funções dos volumes de terraplenagem associados (custo de terraplenagem), bem como os comprimentos de pontes e túneis.

Em nível de planejamento, uma possibilidade para a preferência por construção de OAEs é determinar um valor crítico de altura de corte e aterro. Segundo Schiess e Whitaker (1986), de modo geral, quanto maior a profundidade do corte ou altura do talude de aterro, mais importante se torna a investigação geotécnica dos solos da região. Os autores apresentam recomendações de investigação geotécnica necessárias com relação à altura do talude ou à profundidade do aterro:

- 0 a 15 metros: investigação mínima, engloba observações de encostas próximas para classificação indireta do solo e avaliação da estabilidade;

- 15 a 30 metros: necessária uma investigação mais extensa, abrange perfuração do solo para identificar os horizontes e a profundidade de lençóis freáticos intermitentes ou sazonais;
- maior que 30 metros: necessário projeto específico coordenado por um engenheiro geotécnico.

Assim, acima de 30 metros as estruturas de contenções se tornam mais complexas, sendo um possível valor de referência para uso de pontes ou túneis.

Custos de instalações de segurança Custos de itens relacionados à segurança do tráfego. Se referem à sinalização horizontal e vertical, separadores físicos entre as faixas, defesa metálica, iluminação, entre outros. Estes itens podem depender de fatores como o desenho geométrico da rodovia, o tipo da rodovia e as condições geográficas da região de estudo (JONG; SCHONFELD, 1999).

2.2.2 Custos de manutenção

A rodovia deteriora-se sob o efeito combinado do tráfego e do clima. A carga exercida pelos eixos dos veículos provocam tensões e deformações que, aplicadas de forma contínua, causam fissuras. O intemperismo faz com que os materiais betuminosos se tornem quebradiços e, portanto, mais suscetíveis ao trincamento e desintegração. Trincas na superfície e sistemas de drenagem com baixa manutenção permitem a entrada de excesso de água no pavimento, o que acelera o processo de desintegração, reduz a resistência e aumenta taxa de deformação sob as tensões induzidas pelo tráfego (WATANATADA, 1988).

A condição funcional de um pavimento relaciona-se ao estado da superfície da camada de revestimento. Os defeitos ou irregularidades nessa superfície são notados pelos usuários da rodovia, uma vez que afetam seu conforto ao rolamento e segurança. Conforme DNIT (2005), as consequências do mau estado de conservação se traduzem em reflexos econômicos negativos, a saber:

- a. Efeito inibidor ao desenvolvimento de atividades econômicas;
- b. Acréscimo no consumo de combustíveis – até 58 %;
- c. Acréscimo no custo operacional dos veículos – até 40 %;
- d. Elevação do índice de acidentes – até 50 %;
- e. Acréscimo no tempo de viagem – até 100 %;
- f. Acréscimo, como consequência, no custo dos fretes e das passagens rodoviárias.

Para a incorporação do custo de manutenção em modelo de otimização de traçados rodoviários (Seção 2.5), alguns autores assumem um custo médio de manutenção unitário multiplicado pelo comprimento da rodovia para chegar ao custo total de manutenção em um determinado horizonte

de tempo (KANG; JHA; SCHONFELD, 2012). Outra formulação mais complexa, apresentada por Jha, Ogallo e Owolabi (2014), considera que diferentes segmentos da rodovia se deterioram de maneiras diferentes, devido principalmente aos diferentes volumes, tipos de tráfego e às condições meteorológicas. Os autores também consideram o ciclo de vida do pavimento por meio de uma função parabólica para a deterioração do pavimento.

2.2.3 Custos dos usuários

Segundo Jong e Schonfeld (1999), os principais componentes dos custos do usuário são o custo operacional dos veículos que trafegam pela rodovia, o valor do tempo de viagem e o custo com acidentes. Para Klein (2005), de modo geral, os custos dos usuários dependem dos tipos de veículos, do volume de tráfego, da geometria, da condição do pavimento e do comportamento do motorista. Conforme Tao (2005), o cálculo dos custos dos usuários é menos direto do que custos de construção e manutenção. Geralmente os modelos são desenvolvidos a partir de métodos estatísticos com dados históricos. Assim, dados históricos diferentes, em diferentes países ou regiões, levarão a resultados diferentes.

Custo operacional dos veículos Para Chew, Goh e Fwa (1989), o custo operacional dos veículos incluem os custos com combustível, pneus, óleo e manutenção. Conforme Klein (2005), o aumento da aceleração devido a alta inclinação das rampas gera um maior consumo de combustível. Além da alta inclinação, outra característica geométrica que afeta o consumo de combustível é o alinhamento horizontal (curvatura). As variações de velocidade de projeto ao longo de um trecho da via também tendem a aumentar a taxa de consumo de combustível .

Conforme Nunes (2012), os custos operacionais também estão relacionados com a condição do pavimento, mais especificamente a irregularidade longitudinal, apresenta uma alta correlação em rodovias onde a velocidade operacional geralmente é alta e pouco variável. Segundo DNIT (2011), a irregularidade longitudinal é o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico, que afeta a dinâmica dos veículos, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem superficial da via. O parâmetro utilizado para medida da irregularidade é designado IRI – International Roughness Index (Índice de Irregularidade Internacional), um índice estático, expresso em m/km, que quantifica os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto.

Para incorporar esses itens de custo no modelo de otimização, o custo operacional pode ser expresso em função da velocidade, comprimento da rodovia, mudanças de velocidade (em cruzamentos, por exemplo), tipos de veículos que trafegam pela rodovia e desgaste do pavimento.

Custo do tempo de viagem Conforme Klein (2005), o custo de horas de viagem é calculado em função da velocidade de operação para cada tipo de veículo (horas-veículo). Possui custos unitários

diferentes para viagens em serviço ou a lazer. Para Jong e Schonfeld (1999), o custo do tempo de viagem pode ser obtido pela multiplicação do total de horas-veículo por um custo unitário do tempo.

Custo com acidentes De acordo Jong e Schonfeld (1999), é difícil identificar a relação exata entre taxas de acidentes e o traçado geométrico da rodovia. Por esse motivo, e devido à falta de dados, o custo com acidentes geralmente é excluído da avaliação de novas rodovias. Conforme Taylor, Baruya e Kennedy (2002), estudos estatísticos indicam que a velocidade aumenta a taxa de acidentes. Em velocidades mais altas, os motoristas possuem menos tempo para reação, o veículo se torna menos estável e a gravidade das colisões aumenta.

2.2.4 Custos socioambientais

Conforme Kang, Jha e Schonfeld (2012), a construção de rodovias influencia os padrões de uso do solo e causa impactos ambientais como ruído, poluição do ar e da água nas áreas próximas. Em algumas situações, as questões ambientais podem ser fatores críticos na fase de escolha de traçado.

Custo de áreas sensíveis Deve-se identificar todas as áreas que devem ser preservadas segundo a legislação ambiental. Segundo Lopes (2015), estão enquadradas nessa categoria, conforme legislação brasileira:

- Unidades de Conservação de Proteção Integral;
- Cavernas Naturais Subterrâneas (Cavernas);
- Terras indígenas;
- Terras Quilombolas;
- Unidades de Conservação de Uso Sustentável;
- Zona de Amortecimento de Unidades de Conservação;
- Áreas de Preservação Permanente;
- Áreas Prioritárias para Conservação; e
- Assentamentos Rurais.

O custo de uso dessas áreas pode ser calculado pelo produto do custo unitário da área utilizada pela faixa de domínio da rodovia. Para áreas estritamente proibidas, pode-se atribuir um elevado custo unitário.

Custo de desapropriação de terras Para Lourenço da Silva et al. (2014), o processo de desapropriação de terras é lento e socialmente sensível. Desta forma, a adoção de estratégias para mitigar os problemas de desapropriação é essencial para evitar problemas futuros. Durante a fase de

planejamento deve-se procurar desviar de pontos sensíveis e conflitantes, tais como áreas urbanas, sedes de fazendas, prédios públicos e institucionais, indústrias dentre outros. O estudo prévio das remoções contribui para melhorar o desempenho socioambiental do empreendimento e para evitar eventuais atrasos ou acréscimos de valores da obra em função da desobstrução da faixa de domínio.

Assim como para o custo de áreas sensíveis, o custo de desapropriação de terra pode ser calculado pelo produto do custo unitário da área utilizada pela faixa de domínio da rodovia. O custo unitário pode variar ao longo da extensão da rodovia proposta, o que depende da característica de uso do solo da área afetada (CHEW; GOH; FWA, 1989).

Custo por poluição A crescente preocupação ambiental com o uso de combustíveis fósseis faz com que, no processo de investigação de novas rodovias, sejam incluídos estudos para se reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, a poluição atmosférica. Influenciam no volume de poluição emitida fatores relacionados aos veículos (motor e consumo de combustível) e fatores relacionados às características de projeto da rodovia como a velocidade e a inclinação do greide (SAJJAD, 2016).

Além da poluição devido à queima de combustível, rodovias geram poluição sonora emitida pelos veículos que a utilizam. A emissão sonora varia de acordo com o número e as condições dos veículos. A amplitude e a direção do som variam de acordo com projeto da rodovia, assim podem-se considerar no estudo do traçado formas de diminuir o impacto do ruído nas pessoas que vivem ou trabalham nas proximidades da rodovia (ANDERSON, 1972).

2.2.5 Outras classificações de custos

Para uso em modelos de otimização e com o objetivo de permitir o cálculo do custo por meio de SIGs, Jong e Schonfeld (1999) e Jha e Schonfeld (2000) classificam os custos nas seguintes categorias:

- Custo dependente da localização: Os autores sugerem que as informações de custo dependentes da localização sejam armazenadas em arquivos *raster* compatíveis com SIG. Exemplos de camadas de custos que poderiam ser utilizadas nessa categoria são elevação, valor de desapropriação de propriedades privadas, condição geotécnica, entre outros.
- Custo dependente do comprimento: nesta categoria, classificam-se aqueles custos em que o cálculo pode ser feito de maneira direta, onde o custo unitário é multiplicado pelo comprimento da rodovia. Se enquadram nessa classificação, por exemplo, custos relativos à sinalização, instalação de defesa metálica, separação física entre as faixas de rolamento, entre outros.
- Custo dependente da área: custos em que seu valor unitário está definido em relação à área, como por exemplo, o custo da pavimentação. Geralmente custos dependentes de área podem

ser convertidos em dependentes de comprimento, como, por exemplo, atribuir uma largura constante para a faixa de rolamento no caso da pavimentação;

- Custo dependente de volume: custos unitários definidos em relação ao volume, como por exemplo, custos de terraplenagem, que são geralmente definidos conforme o volume de terra movimentada.

A Tabela 2, adaptada de Booto et al. (2019), apresenta o resumo dos custos utilizados na literatura para a otimização de traçado rodoviário e suas categorizações.

Tabela 2: Custos considerados na otimização de traçado rodoviário

Tipo	Custos	Categoria
Administrativos	Estudos preliminares	-
	Planejamento	-
	Projeto e outros	-
Construção	Movimentação de terra	(a), (c)
	Pavimentação	(b), (e)
	Desapropriações	(c), (e)
	Obras de arte especiais	(b), (d), (e)
Manutenção	Reparo, reforço e reabilitação	(b), (e)
	Combustível, pneus, componentes, depreciação	(b), (f)
Usuário	Tempo de viagem	(b), (f)
	Acidentes	(f)
Ambiental e socioeconômico	Áreas ambientalmente sensíveis	(c), (e)
	Áreas históricas e culturais	(c), (e)
	Uso do solo	(c), (e)
	Poluição sonora e atmosférica	(c)

Onde: (a): custos dependentes do volume, (b): custos dependentes do comprimento, (c): custos dependentes da localização, (d): custos unitários por estrutura, (e): custos dependentes da área, (f): custos dependentes da velocidade.

Fonte: Adaptado de BOOTO et al. (2019)

Por fim, a Tabela 3, apresenta os custos considerados na avaliação de alternativas de traçados em diversos trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 3: Custos considerados na avaliação de alternativas de traçado

Autor	Custos considerados
Chew, Goh e Fwa (1989)	Movimentação de terra (corte e aterro); pavimentação.

Continua.

Autor	Custos considerados
Gipps (1992); Gipps (1994); Gipps et al. (2001)	Movimentação de terra (corte e aterro, considera propriedades do solo); túneis; viadutos/pontes; áreas ambientalmente sensíveis.
Jong e Schonfeld (1999); Jha e Schonfeld (2000); Jong, Jha e Schonfeld (2000); Jha, McCall e Schonfeld (2001); Jong e Schonfeld (2003)	Movimentação de terra (corte e aterro); desapropriação de terras; pavimentação; áreas ambientalmente sensíveis; consumo de combustível; tempo de viagem; acidentes.
Jha e Schonfeld (2000)	Modelo detalhado para desapropriação de terras, leva em consideração, por exemplo, o possível fracionamento de áreas a serem desapropriadas.
Jha (2001)	Desapropriações; Obras de arte especiais (pontes, elevados e túneis); intersecções em nível.
Kim e Schonfeld (2001)	Movimentação de terra (corte e aterro).
Tat e Tao (2003); Tao (2005)	Movimentação de terra (corte e aterro); desapropriação de terras; pavimentação; consumo de combustível; tempo de viagem; acidentes.
Jha (2003)	Movimentação de terra (corte e aterro); áreas ambientalmente sensíveis
Jha e Schonfeld (2004)	Desapropriação de terras; pavimentação; intersecções com rios e rodovias (em nível, elevados e pontes); consumo de combustível, tempo de viagem; acidentes
Goktepe e Lav (2004); Goktepe, Lav e Altun (2009)	Movimentação de terra (corte e aterro, considera propriedades do solo)
Aruga et al. (2005)	Movimentação de terra (corte e aterro); limpeza do terreno; drenagem; abastecimento de água; regularização da base e subleito; semeadura para rampa de cortes; manutenção (limpeza, regularização da sedimentação); consumo de combustível e pneus
Kim et al. (2007)	Pontes e túneis

Continua.

Autor	Custos considerados
Easa e Mehmood (2007); Easa e Mehmood (2008)	Segurança (inconsistências no traçado; previsão de colisões).
Davis e Jha (2011)	Socioeconômicos e demográficos.
Wang (2011)	Influência da largura da faixa de rolamento nos custos .
Kang, Jha e Schonfeld (2012)	Pavimentação; desapropriações; diversificados tipos de intersecções; obras de arte especial; manutenção da rodovia; tempo de viagem; acidentes; penalidades ambientais. Os custos levam em consideração a projeção da frota de veículos que utilizara a rodovia e dados de ocupação dos veículo.
Bosurgi, Pellegrino e Sollazzo (2013)	Riscos ambientais: sísmico; deslizamentos de terra; inundações.
Jha, Ogallo e Owolabi (2014)	Custo de manutenção detalhado, que considera a deteriorização do pavimento e manutenção cíclica
Sajjad (2016)	Poluição do ar
Costa, Sousa e Einstein (2018)	Túneis (leva em consideração dados geológicos e tempo de construção).
Vázquez-Méndez et al. (2018)	Movimentação de terra (corte e aterro, considera a possibilidade de diferentes materiais, com diferentes custos); desapropriação; pavimentação; manutenção
Babapour et al. (2018)	Movimentação de terra (corte e aterro); drenagem; desapropriação de áreas
Li, Ding e Zhong (2019)	Acidentes, onde consideram diversos fatores que aumentam o risco ocorrência

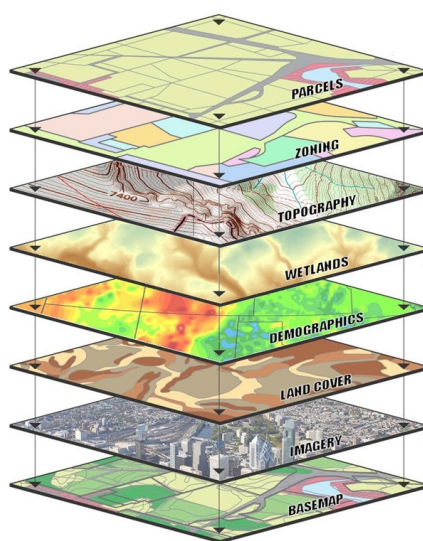
2.3 Dados geográficos

O termo dados geográficos ou dados geo-referenciados denota dados que descrevem fatos, objetos e fenômenos do globo terrestre associados à sua localização sobre a superfície terrestre, em um certo

instante ou período de tempo. A modelagem de dados geográficos difere da tradicional não apenas devido às características espaciais, mas também por envolver a questão da representação, que varia conforme a perspectiva do usuário ou aplicação, ou segundo fatores meramente técnicos. Em geral, utiliza-se dois tipos de dados para representar graficamente dados geográficos, *raster* e vetorial (CÂMARA et al., 1996).

O termo *raster* designa células retangulares, mas na maioria das vezes é usado como termo genérico para a representação matricial. Células retangulares são também chamadas de *pixels*. Operações típicas neste tipo de representação são a sobreposição de matrizes, que combinam os valores das células por meio de funções matemáticas. Por sua vez, um objeto geográfico é tipicamente representado no formato vetorial, ou seja, sua geometria é descrita por meio de pontos, linhas e polígonos. Linhas são formadas por sequências de pontos; e polígonos (abertos ou fechados), por sequências de linhas. Operações comuns neste tipo de representação são operações métricas (distância, área) (CÂMARA et al., 1996).

Figura 13: Camadas geográficas



Fonte: USGS (2016)

Segundo Câmara et al. (1996), Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são sistemas usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos. A maior característica de um SIG é a capacidade de armazenar, além dos atributos descritivos dos dados geográficos, suas geometrias.

O mesmo autor cita que outra importante característica do SIG é inserir e integrar numa mesma base de dados várias informações espaciais de diferentes fontes. Essas informações podem ser de várias áreas do conhecimento, o que permite combiná-las para a obtenção de análises multidisciplinares. Portanto, a utilização de SIGs facilita a integração de dados coletados de fontes heterogêneas, de forma transparente ao usuário final. Diferentes tipos de camadas de dados geográficos podem ser integrados em um SIG (Figura 13), o que proporciona um melhor entendimento da área de estudo

e as interações entre os dados.

Dados geográficos são amplamente utilizados em transportes. No caso do planejamento de obras lineares de transporte, informações importantes da região onde a obra será construída, como por exemplo a topografia do terreno, áreas ambientais, obras já existentes, hidrografia, podem ser representadas como dados geográficos (JHA; SCHONFELD, 2000).

2.4 Problemas de otimização

Pode-se considerar os problemas de otimização como aqueles resolvidos pela Pesquisa Operacional, que consiste na utilização de um método científico (modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais) para a tomada de decisões (BELFIORE; FAVERO, 2012).

Segundo Ravindran, Ragsdell e Reklaitis (2006), métodos da otimização são métodos matemáticos para encontrar e identificar a melhor solução em uma coleção de alternativas sem precisar enumerar e avaliar explicitamente todas elas.

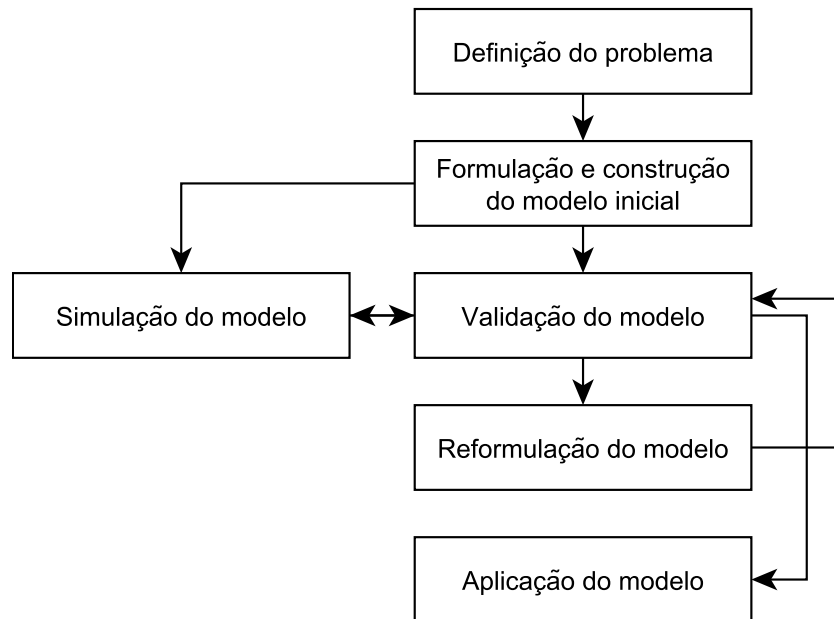
Para Ravindran, Ragsdell e Reklaitis (2006) há quatro requisitos que devem ser avaliados quando da formulação do problema de otimização:

1. Definir claramente o que está sob investigação e buscar restringir o espaço de busca.
2. Definir o critério de avaliação (exemplos: custo, lucro, retorno, área afetada, entre outros).
3. Definir as variáveis, se são ou não impactadas por fatores externos e definir o nível de detalhe e complexidade das mesmas.
4. Definir o modelo que descreve como as variáveis estão relacionadas e a maneira como o critério de avaliação é influenciado por essas variáveis.

Na prática, a maioria dos estudos de otimização é realizada por meio de uma representação matemática do sistema real, chamada de modelo. Os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada. Consiste em um conjunto de equações (função objetivo e restrições de igualdade) e inequações (restrições de desigualdade) que tem como objetivo otimizar a eficiência do sistema e oferecer subsídios para que o tomador de decisão identifique as limitações deste (GOLDBARG; LUNA, 2005; BELFIORE; FAVERO, 2012).

Goldbarg e Luna (2005) apresentam uma completa e didática revisão sobre modelagem de problemas de otimização. O fluxograma da Figura 14 resume o processo de construção de modelos.

Figura 14: O processo de construção de modelos

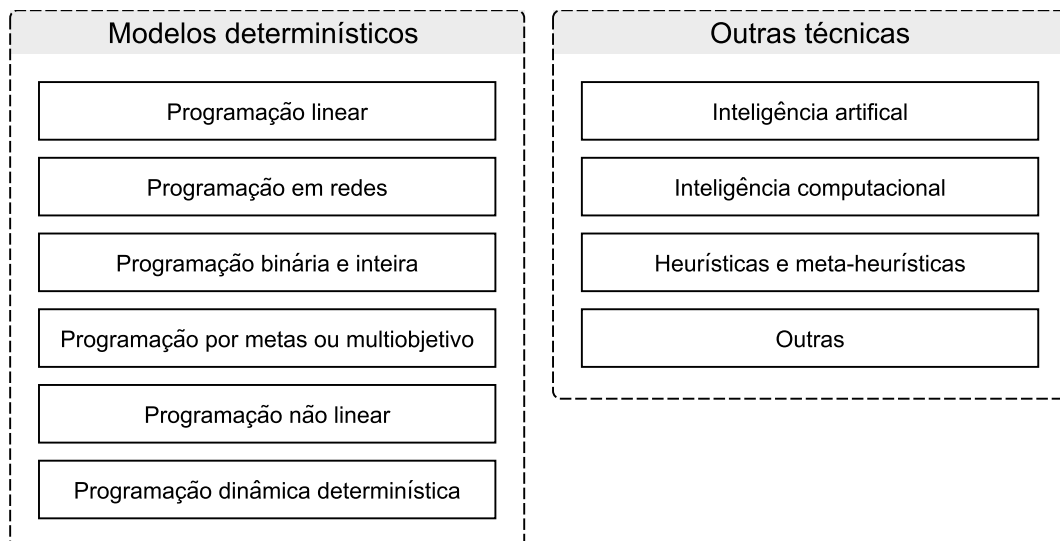


Fonte: GOLDBARG; LUNA (2005)

2.4.1 Técnicas e modelos de resolução

Existem diversas técnicas e modelos para a resolução de problemas de Pesquisa Operacional, entre eles, problemas de otimização (Figura 15).

Figura 15: Técnicas e modelos de resolução da Pesquisa Operacional



Fonte: BELFIORE; FAVERO (2012)

A descrição de cada uma das técnicas apresentadas na Figura 15 é feita em Belfiore e Favero (2012). No entanto, devido às técnicas utilizadas nesse estudo, é necessário destacar as heurísticas e meta-heurísticas.

Conforme Belfiore e Favero (2012), heurísticas e meta-heurísticas são campos da Pesquisa Operacional, da inteligência artificial e computacional que surgiram como alternativas aos métodos exatos para resolução de problemas de otimização de alta complexidade computacional. A heurística pode ser definida como um procedimento de busca guiada pela intuição, por regras e ideias. A meta-heurística representa uma combinação de procedimentos de busca com estratégias de mais alto nível. Engloba, por exemplo, a intensificação e diversificação com o objetivo de escapar de ótimos locais e de encontrar soluções muito próximas do ótimo global, porém sem a garantia da otimalidade.

Como exemplos de meta-heurística, podemos citar o *simulated annealing* (têmpera ou recozimento simulado), a busca tabu, os algoritmos genéticos, a colônia de formigas, enxame de partículas entre outros (TALBI, 2009).

A Tabela 4 apresenta uma lista de algoritmos encontrados na literatura para otimização do traçado de rodovias e ferrovias.

Tabela 4: Algoritmos utilizados para otimização do traçado de rodovias e ferrovias

Autores	Método de otimização
Jong e Schonfeld (1999); Jha e Schonfeld (2000); Jong, Jha e Schonfeld (2000); Jha e Schonfeld (2000); Jha, McCall e Schonfeld (2001); Jha (2001); Jong e Schonfeld (2003); Jha (2003); Jha e Schonfeld (2004); Kang, Schonfeld e Yang (2009); Wang (2011); Davis e Jha (2011); Kang, Jha e Schonfeld (2012); Jha, Ogallo e Owolabi (2014)	Algoritmo Genético (GA)
Tat e Tao (2003); Tao (2005)	Algoritmo Genético em dois níveis (Bi-level GA)
Goktepe e Lav (2004); Goktepe, Lav e Altun (2009)	Fuzzy GA
Aruga et al. (2005)	Busca tabu (TS)
Jha e Maji (2007); Maji e Jha (2009); Hirpa et al. (2016)	GA multi-objetivo

Continua...

Autores	Método de otimização
Bosurgi, Pellegrino e Sollazzo (2013); Costa, Sousa e Einstein (2018)	Enxame de partículas (PSO)
Li et al. (2016):	Distance transform (DT)
Hasany e Shafahi (2017)	Colônia de formigas (ACO)
Li et al. (2017)	Bidirecional DT e GA
Casal, Santamarina e Vazquez-Mendez (2017)	Sequential quadratic programming (SQP)
Mohammadi e Poorzahedy (2018)	Electromagnetism-likealgorithm
Vázquez-Méndez et al. (2018)	Two-stage algorithm (Global + gradient-type algorithm - SQP)
Babapour et al. (2018)	GA e PSO
Li, Ding e Zhong (2019)	NSGA-II

É possível notar que GA é a técnica mais utilizada, tanto isoladamente quanto de forma híbrida, em combinações com outros algoritmos.

2.4.2 Algoritmo genético

Algoritmo genético (*Genetic Algorithm* - GA) é uma meta-heurística particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva. Combina a sobrevivência do mais forte (melhor resultado) para formar um algoritmo de busca. Em cada nova geração, um novo conjunto de indivíduos (soluções) artificiais é criado a partir das informações de indivíduos da geração anterior (GOLDBERG, 1989). O método foi apresentado pela primeira vez por Holland (1975) e é aplicado em diversos problemas de busca e otimização.

GA diferem dos algoritmos tradicionais de otimização em basicamente quatro aspectos (GOLDBERG, 1989):

1. Baseiam-se em uma codificação do conjunto das soluções possíveis, e não nos parâmetros da otimização em si.

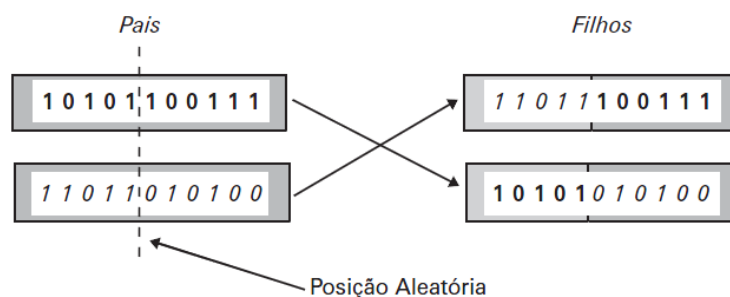
2. Os resultados são apresentados como uma população de soluções e não como uma solução única.
3. Não necessitam de nenhum conhecimento derivado do problema, apenas de uma forma de avaliação do resultado.
4. Usam transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Os termos que se seguem são usados por esses algoritmos (GOLDBARG; LUNA, 2005):

- População: conjunto de indivíduos (conjunto de soluções do problema).
- Cromossomo: representa um indivíduo na população (uma solução).
- *Fitness*: medida de aptidão de um indivíduo (normalmente associada ao valor da função objetivo para uma dada solução).
- Gene: representa uma componente do cromossomo (uma variável do problema).
- Alelo: descreve os possíveis estados de um atributo do indivíduo (os possíveis valores de uma variável do problema).
- *Locus*: representa a posição do atributo no cromossomo (isto é, a posição da componente no vetor de componentes).
- Operadores genéticos: são as regras que permitem a manipulação dos cromossomos que, basicamente, são de:

- *crossover* (cruzamento), ou o operador que permite a obtenção de indivíduos filhas a partir da combinação (cruzamento) dos cromossomos dos pais (Figura 16).

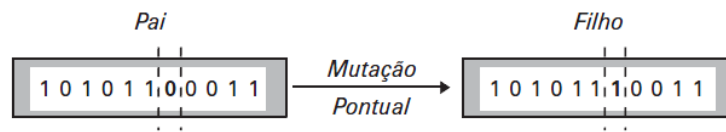
Figura 16: Cruzamento simples de posição aleatória



Fonte: GOLDBARG; LUNA (2005)

- mutação ou o operador que permite a produção de um novo indivíduo por alterações diretas no cromossomo pai (Figura 17).

Figura 17: Exemplo de um mecanismo de mutação



Fonte: GOLDBARG; LUNA (2005)

- Fenótipo: cromossomo decodificado, ou seja, um possível resultado em sua forma original.

Um exemplo de estrutura do GA pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Pseudocódigo - Algoritmo genético (GA)

Pseudocódigo - Algoritmo genético (GA)	
1:	INICIO
2:	Gerar uma população inicial
3:	Avaliar a fitness dos indivíduos da população
4:	Enquanto condição de parada não for satisfeita faça :
5:	Selecionar um conjunto de pais na população
6:	Cruzar os pais de modo que se reproduzam
7:	Avaliar a fitness dos filhos gerados
8:	Substituir os filhos julgados inadequados
9:	FIM

Fonte: Adaptado de GOLDBARG; LUNA (2005)

Goldberg e Luna (2005) classificam os GA como algoritmos de busca probabilística inteligente. Os indivíduos são representados por cromossomos e competem por recursos e possibilidade de reprodução. Aqueles que tiverem mais sucesso (maior valor de *fitness*) nas competições terão maior probabilidade de reprodução do que aqueles de menor performance. Assim, os genes dos indivíduos avaliados como bons se propagam através das populações, de modo que possam ser aperfeiçoados e gerar proles cada vez mais adequadas. Os autores concluem que, a própria concepção do modelo genético do GA o fez flexível e abstrato. O significado das cadeias de cromossomos é completamente livre. O que está em foco no modelo é uma concepção generalista de um processo adaptativo, por isso cabe a denominação de meta-heurística. A cada situação cabe ao modelador concretizar o processo adaptativo e de seleção natural preconizado na estratégia.

2.4.3 Busca tabu

Desenvolvido por Glover (1989), a meta-heurística Busca Tabu (*Tabu Search* - TS) utiliza estratégias baseadas em memória. Essa memória é gerenciada por meio de listas (conhecidas como Listas Tabu). Nessas listas são armazenados os atributos (variáveis em si, ou movimentos de busca) das soluções visitadas recentemente, esses atributos podem ser usados tanto para escapar dos mínimos

locais, quanto para explorar o espaço de busca e evitar a visita cíclica ao mesmo espaço. Pode-se fazer uso de diversos tipos de Listas Tabu, cada lista com funções diferentes para cada tipo problema a ser resolvido (BLUM et al., 2008).

A Figura 19 apresenta um pseudo-código para o algoritmo TS.

Figura 19: Pseudocódigo - Busca Tabu

Pseudocódigo - Busca Tabu (TS)	
1:	INICIO
2:	$S \leftarrow$ Gerar solução inicial
3:	Iniciar as Listas Tabu (LT_s)
4:	Enquanto condição de parada não for satisfeita faça :
5:	$N \leftarrow$ soluções vizinhas a S que não violam as condições tabu ou que satisfaçam os critérios de aspiração
6:	$S' \leftarrow$ melhor solução em N
7:	Atualizar LT_s
8:	$S \leftarrow S'$
9:	FIM

Fonte: Adaptado BLUM et al. (2008)

Parte-se de uma solução inicial (S) qualquer. Inicia-se as Listas Tabu (LT), vazias na primeira iteração. A partir da solução inicial (S) explora-se as soluções vizinhas (N). Os atributos das melhores soluções encontradas em N são armazenadas nas LT_s . Nas próximas iterações, as soluções encontradas devem respeitar as condições armazenadas nas LT_s (conhecidas como soluções ou condições tabu), em caso negativo elas são descartadas. Para prevenir que boas soluções sejam sempre descartadas, são utilizados critérios de aspiração que permitem visitar novamente o espaço de busca dessas boas soluções, apesar de violar alguma condição tabu. A cada iteração, a melhor solução (S) que respeite as condições tabu é escolhida como a nova solução atual. O algoritmo retorna o melhor valor quando uma condição de parada é atendida. Essa condição de parada pode ser um número específico de iterações ou número de iterações sem melhora na melhor solução.

Com relação especificamente às LT_s , seu principal objetivo é impedir o retorno às soluções visitadas recentemente e forçar o processo de busca a realizar movimentos aparentemente não propícios. Caso as listas tenham atingido o tamanho máximo permitido, as informações das soluções mais antigas são excluídas da LT . O tamanho das LT_s (usualmente referenciado como *tabu tenure*), controla a memória do processo de pesquisa. Com um pequeno *tabu tenure*, a pesquisa tende a se concentrar em pequenas áreas do espaço de busca. Com um grande *tabu tenure* o processo de busca tende a explorar regiões mais distantes, pois proíbe revisitar um número maior de soluções (BLUM et al., 2008). Conforme Kurahashi e Terano (2000), podem ser utilizadas várias LT_s com características diferentes. O autor cita como exemplo a utilização de listas com valores menores de *tabu tenure* (memória curta), responsáveis por armazenar as melhores soluções por um número

pequeno de iterações e listas com maior *tabu tenure* (memória longa), responsáveis por armazenar um número maior de informações. Por meio destes tipos de memória pode-se utilizar técnicas para direcionar o espaço de busca a ser explorado.

2.4.4 Algoritmos híbridos

Segundo Almeida et al. (2006), algoritmos híbridos são aqueles que não seguem puramente os conceitos de um único algoritmo tradicional, mas combinam vários algoritmos. Para Glover, Kelly e Laguna (1995), o desenvolvimento de algoritmos híbridos concentra-se em aprimorar os pontos fortes e compensar os pontos fracos de duas ferramentas de resolução. O objetivo é combinar os elementos-chave de algoritmos existentes para criar um algoritmo melhor.

Conforme Blum et al. (2008), a falta de uma definição precisa do termo meta-heurística híbrida gera críticas. No entanto, os autores acreditam que essa definição relativamente aberta é útil, pois não gera limites rígidos e restritivos que geralmente bloqueiam a pesquisa criativa. Blum et al. (2008) complementam que ficou evidente que a concentração em uma única meta-heurística é bastante restritiva para o avanço do estado da arte em problemas de otimização acadêmica e prática. Trabalhos recentes mostraram que a combinação de meta-heurísticas, inclusive com conceitos originários de outros tipos de algoritmos para otimização, pode levar a uma maior flexibilidade e a melhores soluções.

Especificamente sobre a combinação entre GA e TS, Glover, Kelly e Laguna (1995) apresentam de forma conceitual diversas possibilidades. Dentre elas encontra-se o uso da memória (por meio das Listas Tabu) do TS no controle dos alelos do GA. Segundo os autores, os alelos do GA correspondem aos valores das variáveis e podem ser comparados aos atributos do TS. Introduzir o conceito de memória no GA, para armazenar o histórico de alelos, é uma maneira imediata de criar um híbrido entre GA e TS.

Essa estratégia foi utilizada por Kurahashi e Terano (2000). Segundo os autores o uso das Listas Tabu no GA permite que se armazene as melhores soluções de cada geração, o que impede a seleção contínua dos cromossomos mais bem avaliados (melhor *Fitness*). As listas tabu diminuem a possibilidade de convergência local nos estágios iniciais das iterações do GA. Isso permite que sejam explorados novos espaços de solução para melhorar ou criar várias soluções.

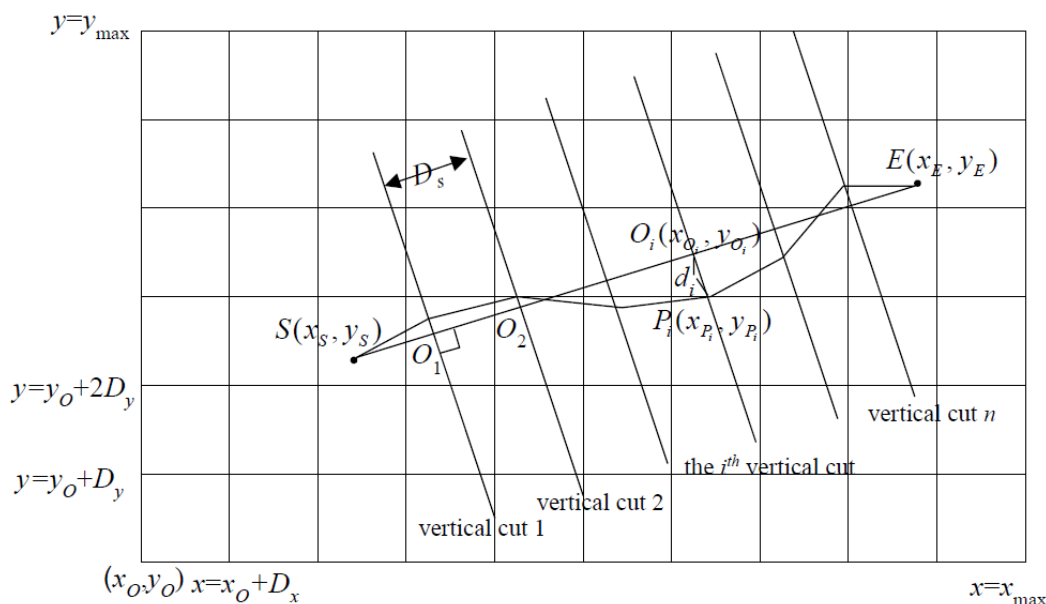
2.5 Otimização do traçado de obras rodoviárias com o uso de algoritmos meta-heurísticos

Nesta seção são apresentados os trabalhos estudados, bem como seus avanços com relação à otimização de obras lineares.

Especificamente para o uso de GA, as primeiras pesquisas do uso em otimização de obras lineares tiveram sua origem em um grupo de pesquisadores da Universidade de Maryland (USA). Jong, Jha e Schonfeld (2000) apresentaram o primeiro modelo de representação do alinhamento horizontal com número fixo de PIs e curvas circulares. No modelo de Jong, Jha e Schonfeld (2000), o problema de otimização de traçado consiste em encontrar os pontos de interseção (PI) para alinhamentos horizontais. Os PI's, que são representados como genes no modelo, são criados com operadores genéticos e projetados para se situarem nos planos ortogonais de corte, de modo que cada PI tenha coordenadas x, y exclusivas.

A Figura 20 representa as variáveis do modelo de Jong, Jha e Schonfeld (2000). Os pontos S (origem) e E (destino) do traçado são ligados por uma reta. Essa reta é seccionada em distâncias iguais por retas perpendiculares conforme o número de genes adotados para o problema (λ_i). O ponto de cruzamento entre as retas é o ponto de origem (O_i) do valor utilizado nos genes.

Figura 20: Variáveis do modelo de Jong, Jha e Schonfeld (2000)



Fonte: JHA et al. (2006) ¹

¹Em 2006 os autores M.K. Jha, P. Schonfeld, J.-C. Jong e E. Kim reuniram em um livro (JHA et al., 2006) os trabalhos de Jong, Jha e Schonfeld (2000), Jha e Schonfeld (2000), Jha, McCall e Schonfeld (2001), Jong e Schonfeld (2003), Jha e Schonfeld (2004), Kim et al. (2004) e Kim, Jha e Son (2005). Optou-se por utilizar as imagens mais recentes, contidas em JHA et al. (2006), para os exemplos utilizados nesta revisão bibliográfica.

O indivíduo (Equação 19) é caracterizado por um número pré-definido de genes (λ), nota-se que o número de genes do indivíduo também limita o número máximo de curvas que o traçado pode ter. Para criar o traçado horizontal, os PIs são primeiramente conectados com linhas retas (tangentes) e as curvas circulares são então ajustadas para se conectarem às tangentes. Na função custo o autor os separou em dependentes da localização (rios, áreas inundáveis, desapropriações etc), dependentes do comprimento (pavimentação) e custos dos usuários (consumo de combustível, tempo de deslocamento etc).

$$\text{Indivíduo} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] = [d_1, d_2, \dots, d_n] \quad (19)$$

onde:

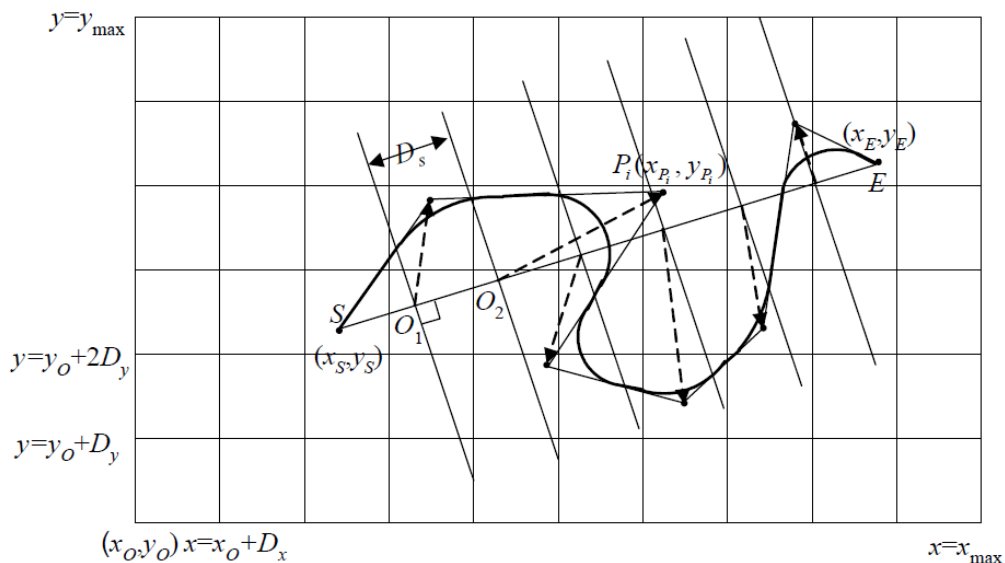
λ_{i-n} = genes do indivíduo;

d_{i-n} = distância entre O_i e P_i .

Jha e Schonfeld (2000) complementaram o estudo anterior com uma melhor formulação dos custos de desapropriações. Posteriormente, Jha, McCall e Schonfeld (2001) incluíram no modelo custos de obras de arte especiais como pontes, túneis, intersecções e viadutos. Conforme o autor, com a utilização de um SIG foi possível localizar rios, lagos (que podem exigir a construção de pontes ou túneis) e rodovias (que podem exigir a construção nas intersecções como de uma passagem subterrânea, viaduto e passagens em nível).

Finalmente, Jong e Schonfeld (2003) apresentaram um modelo tridimensional (Figura 21), que otimiza tanto o traçado horizontal quanto o vertical da rodovia.

Figura 21: Variáveis do modelo de Jong e Schonfeld (2003)



Fonte: JHA et al. (2006)

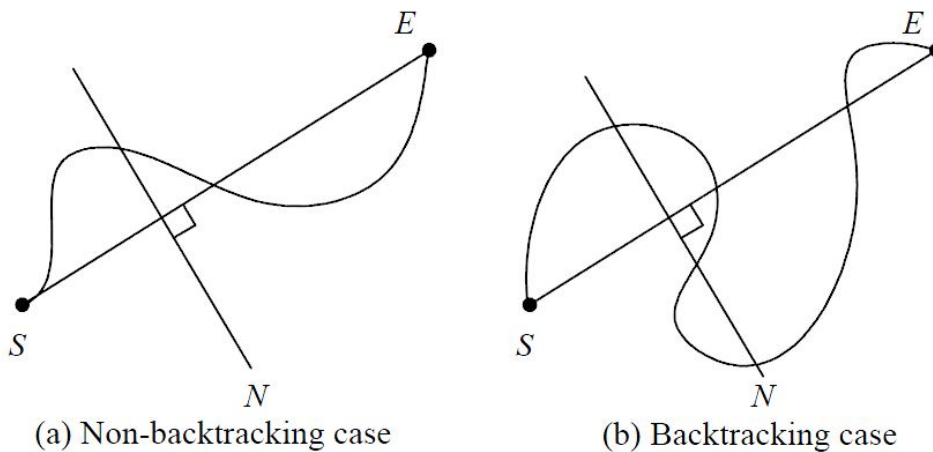
A principal diferença para o modelo de Jong, Jha e Schonfeld (2000) é que os genes carregam as coordenadas x , y e z dos PIs e podem ser gerados livremente, conforme Equação 20. O alinhamento vertical correspondente também é determinado pela montagem de curvas parabólicas em cada PI. Nota-se que, pela formulação dada nos genes (λ), o número de PIs e dos pontos de intersecção de curvas verticais (PIVs) precisa ser o mesmo e devem estar na mesma estaca, o que não necessariamente precisa acontecer em um traçado real.

$$\text{Indivíduo} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] = [x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n] \quad (20)$$

Após a definição simultânea dos traçados horizontal e vertical, o modelo calcula os custos resultantes. Os autores ainda adicionaram restrições de greide máximo, raio mínimo e comprimento mínimo da curva vertical.

O modelo também considera, pela primeira vez, a possibilidade do "retorno" (do inglês *backtracking*) do traçado. A Figura 22 apresenta a diferença entre traçados *backtracking* e *non-backtracking*. Os pontos S e E, representam, respectivamente, a origem e o destino do traçado. O corte N, no caso *non-backtracking*, corta o traçado apenas uma vez, enquanto que, no caso *backtracking* pode cortar o traçado mais de uma vez.

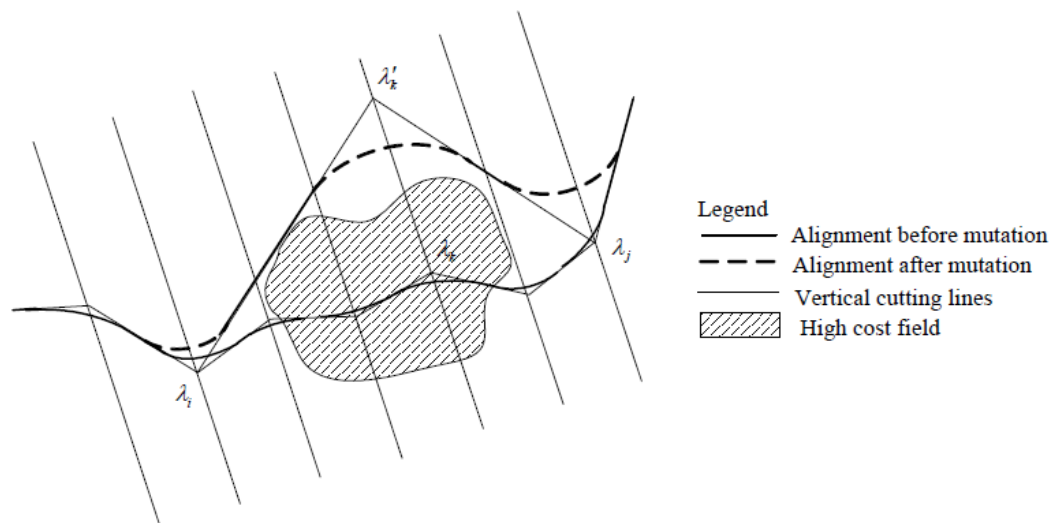
Figura 22: Diferença entre traçados backtracking e non-backtracking



Fonte: JHA et al. (2006)

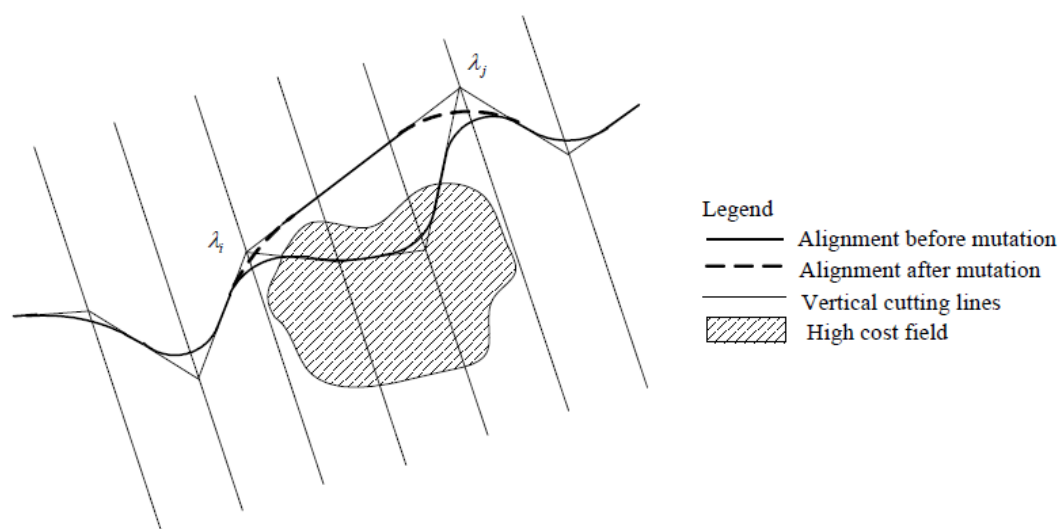
Jong e Schonfeld (2003) também detalharam os operadores genéticos utilizados. Na mutação simples (Figura 23) sorteia-se um dos genes do cromossomo, alterando-o aleatoriamente. Enquanto que na mutação por eliminação de curva (Figura 24), sorteia-se um dos genes do cromossomo, elimina-se o gene sorteado, fazendo com que os genes adjacentes se unam por uma tangente (JONG; SCHONFELD, 2003; JHA et al., 2006).

Figura 23: Mutação - Simples



JHA et al. (2006)

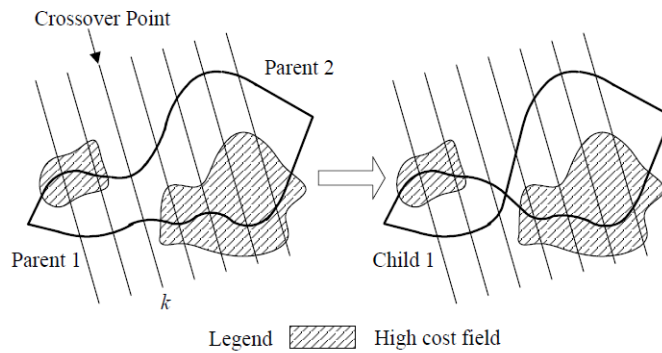
Figura 24: Mutação - Eliminação de curva



JHA et al. (2006)

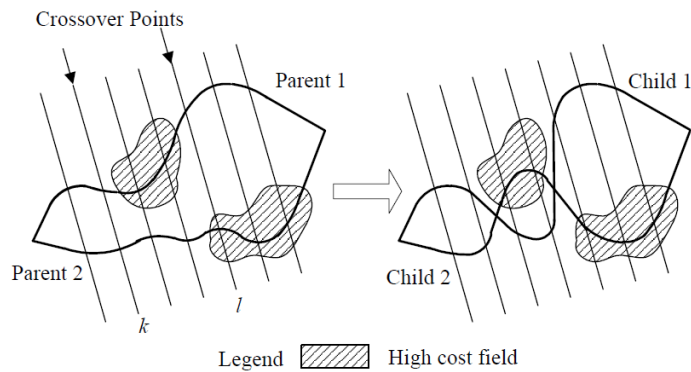
Por sua vez, a reprodução resulta em um novo indivíduo a partir das informações do cromossomo de dois indivíduos distintos (pais), ou seja, os filhos contém genes dos pais. Na reprodução simples (Figura 25), apenas um ponto de corte do cromossomo é selecionado. A reprodução de dois pontos (Figura 26) seleciona dois pontos de corte no cromossomo. Ambos tipos de reprodução geram dois indivíduos filhos (JONG; SCHONFELD, 2003; JHA et al., 2006).

Figura 25: Reprodução - Simples



JHA et al. (2006)

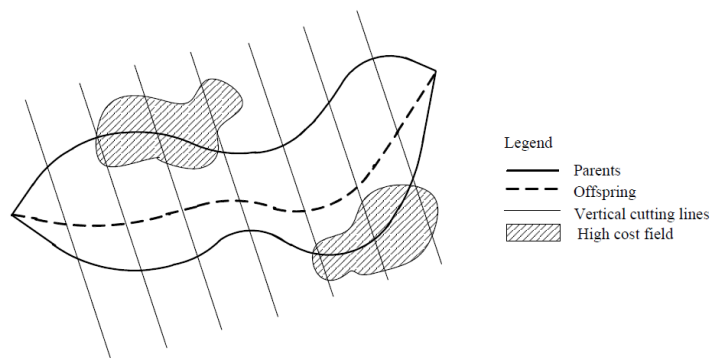
Figura 26: Reprodução - Dois pontos



JHA et al. (2006)

A reprodução média gera apenas um indivíduo filho, conforme mostrado na Figura 27. Neste operador de reprodução é feita uma média da soma do valor de cada gene do cromossomo (JONG; SCHONFELD, 2003; JHA et al., 2006).

Figura 27: Reprodução - Média

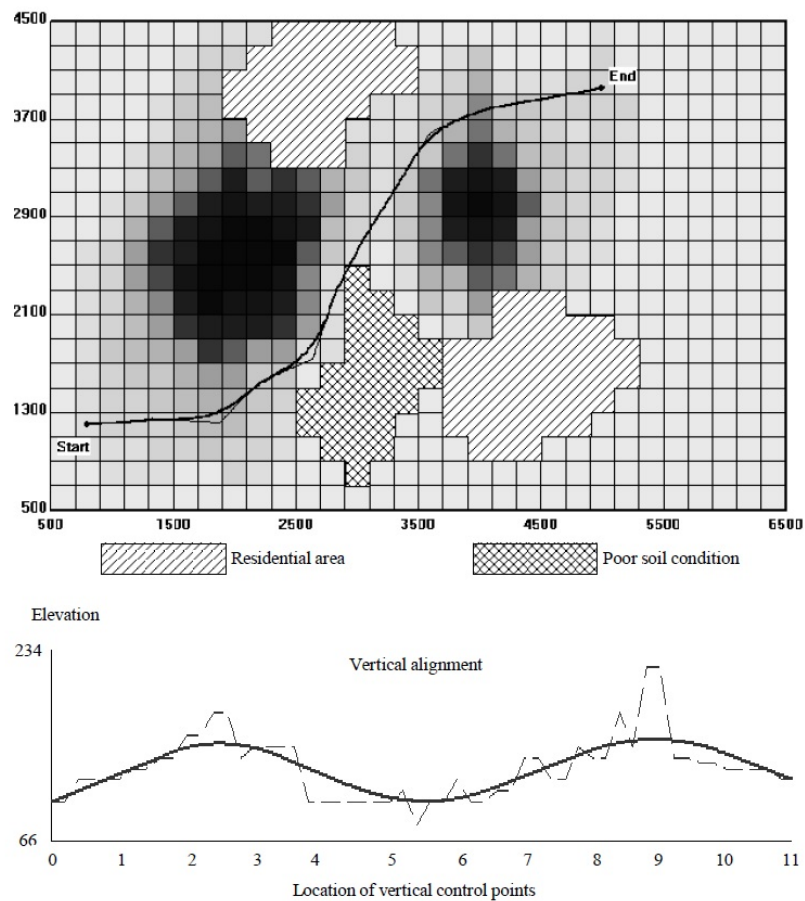


JHA et al. (2006)

Assim como a reprodução média, a reprodução heurística gera apenas um indivíduo filho. A diferença dessa reprodução é que ela leva em consideração o *fitness* de cada indivíduo envolvido. O indivíduo com maior *fitness* possui um peso maior na média (JONG; SCHONFELD, 2003; JHA et al., 2006).

A Figura 28 apresenta um resultado da aplicação do modelo de Jong e Schonfeld (2003). A área de estudo utilizada contém dados quanto à localização de áreas residenciais e tipo de solo. A cor das células indicam a elevação do terreno, quanto mais escuro, mais elevado. Foram utilizados 10 pontos de intersecção (número de genes do indivíduo) e uma população com 100 indivíduos.

Figura 28: Resultado da aplicação do modelo de Jong e Schonfeld (2003)



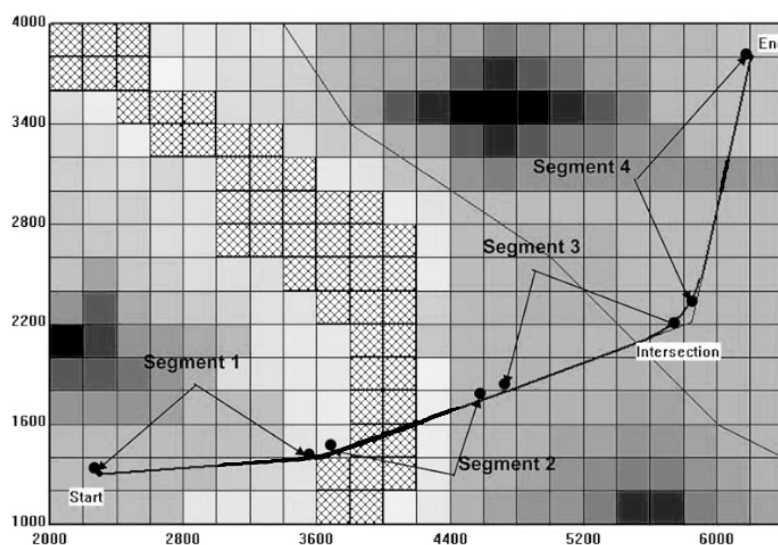
Fonte: JHA et al. (2006)

As pesquisas do grupo de Maryland continuaram com Jha e Schonfeld (2004). Os autores propuseram que após algumas gerações de busca, limita-se a área e conseqüentemente o espaço de busca do GA, a fim de buscar melhoras locais. Eles também analisaram a participação de cada tipo de custo utilizado, e indicaram que o custo operacional do tempo de viagem, que muitas vezes é negligenciado na análise da seleção dos traçados, afeta significativamente a otimização do alinhamento.

Já Kim et al. (2004) focaram na otimização dos cruzamentos das novas vias com as vias existentes. Os autores desenvolveram uma otimização para ser usada localmente nas intersecções dentro do contexto de otimização do alinhamento da rodovia, conforme o modelo de Jong e Schonfeld (2003).

Kim, Jha e Son (2005) apresentaram uma abordagem composta pela segmentação da área de estudo em partes menores, o que também resultou em diferentes tamanhos de população e, consequentemente, diminuiu o tempo computacional necessário para resolver o problema. A Figura 29 mostra um exemplo da aplicação da segmentação do traçado. Neste caso, após um número determinado de gerações, o traçado foi segmentado em quatro trechos, após isso a busca foi reiniciada nos trechos menores.

Figura 29: Exemplo da aplicação da segmentação do traçado



Fonte: KIM; JHA; SON (2005)

Tao (2005) propôs um algoritmo genético em dois níveis, o primeiro nível busca a otimização do traçado horizontal e o segundo nível busca a otimização do traçado vertical para cada traçado horizontal definido. O autor cita que a utilização da busca em dois níveis possibilita que o número de pontos de interseção horizontais (PIs) e verticais (PIVs) sejam diferentes, o que melhora o custo do traçado final.

Jha e Kim (2006) adicionaram novos custos ao modelo de Jong e Schonfeld (2003). Foram adicionados o custo de acesso à rodovia (custo proporcional à distância da rodovia às áreas interessadas no uso da mesma) e o custo de proximidade (custo causado devido à proximidade da nova rodovia, que considera, por exemplo, os efeitos negativos da poluição e dos ruídos).

Com relação às restrições do traçado geométrico, o modelo de Jong e Schonfeld (2003) atribui penalidades ao custo se os traçados violarem as restrições correspondentes e, eventualmente, elimina

as soluções candidatas cujas violações de restrição estiverem acima de algum critério estabelecido. Entretanto, encontrar as soluções possíveis que satisfazem as restrições definidas pelo usuário é dispendioso em termos computacionais, já que o modelo avalia todas as soluções geradas. Para evitar isso, Kang, Schonfeld e Jong (2007) desenvolveram um método chamado *feasible gate* (FG). Segundo os autores, o método destina-se a evitar que se gere soluções inviáveis e, assim, concentrar a computação no cálculo de soluções viáveis. O modelo limita os locais de geração dos PIs, tanto horizontalmente quanto verticalmente. Considera, por exemplo, limitações devido às áreas proibidas (ambientais, etc.) para alinhamentos horizontais, e limitação de inclinação do greide para alinhamentos verticais. Ao evitar a geração e avaliação de muitos alinhamentos inviáveis, a busca por soluções otimizadas é significativamente acelerada.

Com o mesmo objetivo de reduzir o tempo de computação, Kang, Schonfeld e Yang (2009) desenvolveram um método de pré-seleção e reparo. Após gerar os PIs, avalia-se se há violações de restrições de projeto, em caso negativo, o resultado é avaliado detalhadamente com todos os procedimentos de cálculo de custo do indivíduo. Caso existam violações, procede-se com a checagem do grau da violação (conforme critério previamente estabelecido). Se a violação da restrição for pequena, roda-se o processo de reparo, com a realocação dos PIs. Caso o grau da violação esteja acima do determinado, o indivíduo é excluído da população.

Aruga et al. (2005) desenvolveram um modelo para a escolha de traçado de uma rodovia florestal. O método busca simultaneamente o alinhamento horizontal e vertical. O algoritmo de otimização utilizado foi o Busca Tabu. Após a definição de PIs iniciais, a cada iteração o modelo gera novos traçados, por meio da busca por soluções vizinhas. Esse processo é feito por meio da modificação dos locais dos PIs, dos raios das curvas horizontais e dos PIVs. A cada iteração a lista tabu é atualizada.

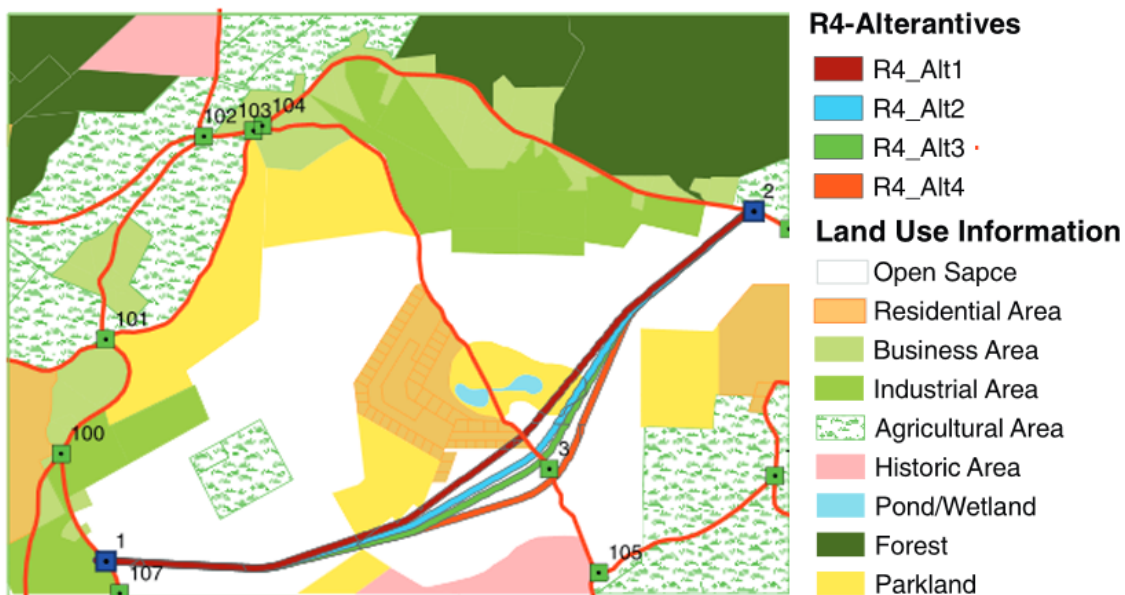
Segundo Maji e Jha (2009), minimizar o custo do tempo de viagem, o custo de operação do veículo e o custo dos acidentes faz com que o alinhamento obtido seja mais retilíneo. Por outro lado, a minimização dos custos de aquisição de terrenos e terraplanagem tende a formar um traçado curvilíneo. Nos problemas de otimização de traçado geralmente existe um *trade-off* entre os diversos custos envolvidos. Por conta disso, Jha e Maji (2007) apresentaram a possibilidade de usar um GA multiobjetivo para minimizar mais de uma função objetivo, por meio da busca de ótimos de Pareto. Nesse caso, os autores utilizaram como funções objetivo a minimização do custo total da implantação da rodovia e da área de impacto em plantações. Maji e Jha (2009) apresentaram também o mesmo GA multiobjetivo que minimiza o custo do usuário e de construção simultaneamente. Mais recentemente Yang et al. (2014) classificaram quatro objetivos de otimização que podem ser considerados na implantação de uma rodovia:

- a. Minimizar o custo de construção, que abrange os gastos com terraplanagem, desapropriações, pavimentação, obras de arte especiais, manutenção e outras despesas diretas.

- b. Maximizar o benefício ao usuário, que é medido pela economia monetária resultante da redução no tempo de viagem, custo operacional do veículo e taxa de acidentes.
- c. Minimizar o impacto ambiental, que é medido como a área total das regiões afetadas ambientalmente sensíveis, como áreas de preservação ambiental, florestas e parques.
- d. Minimizar os impactos socioeconômicos, que são medidos como a área total das regiões afetadas com significado socioeconômico, como regiões históricas, residenciais, comerciais, industriais e agrícolas.

A Figura 30 mostra o resultado apresentado por Yang et al. (2014) em uma otimização multi-objetivo, com quatro alternativas de traçados obtidos de quatro objetivos de otimização diferentes.

Figura 30: Resultado de uma otimização multiobjetivo com quatro alternativas



Fonte: YANG et al. (2014)

Bosurgi, Pellegrino e Sollazzo (2013) utilizaram um algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) híbrido combinado com os operadores derivados do GA do modelo de Jong e Schonfeld (1999). De modo geral o PSO é baseado na posição das partículas, em que cada partícula é uma solução possível. As partículas se movem no espaço de busca e compartilham informações de movimentos passados com outras partículas.

Hasany e Shafahi (2017) utilizaram como método de busca do melhor traçado de uma ferrovia a meta-heurística *Ant Colony Optimisation* (ACO). O modelo geométrico utilizado por eles segue a linha de Jong e Schonfeld (2003).

Recentemente, Mohammadi e Poorzahedy (2018) utilizaram um algoritmo de busca que se baseia nas leis de Coloumb do eletromagnetismo para a otimização tridimensional do projeto geométrico de

rodovias. Além disso, os autores inseriram um procedimento chamado pontos de quebra (*breaking points*), que implementa uma busca local capaz de evitar obstáculos geográficos ou áreas indesejadas e adiciona tantos pontos de quebra quantos forem necessários para evitar essas áreas.

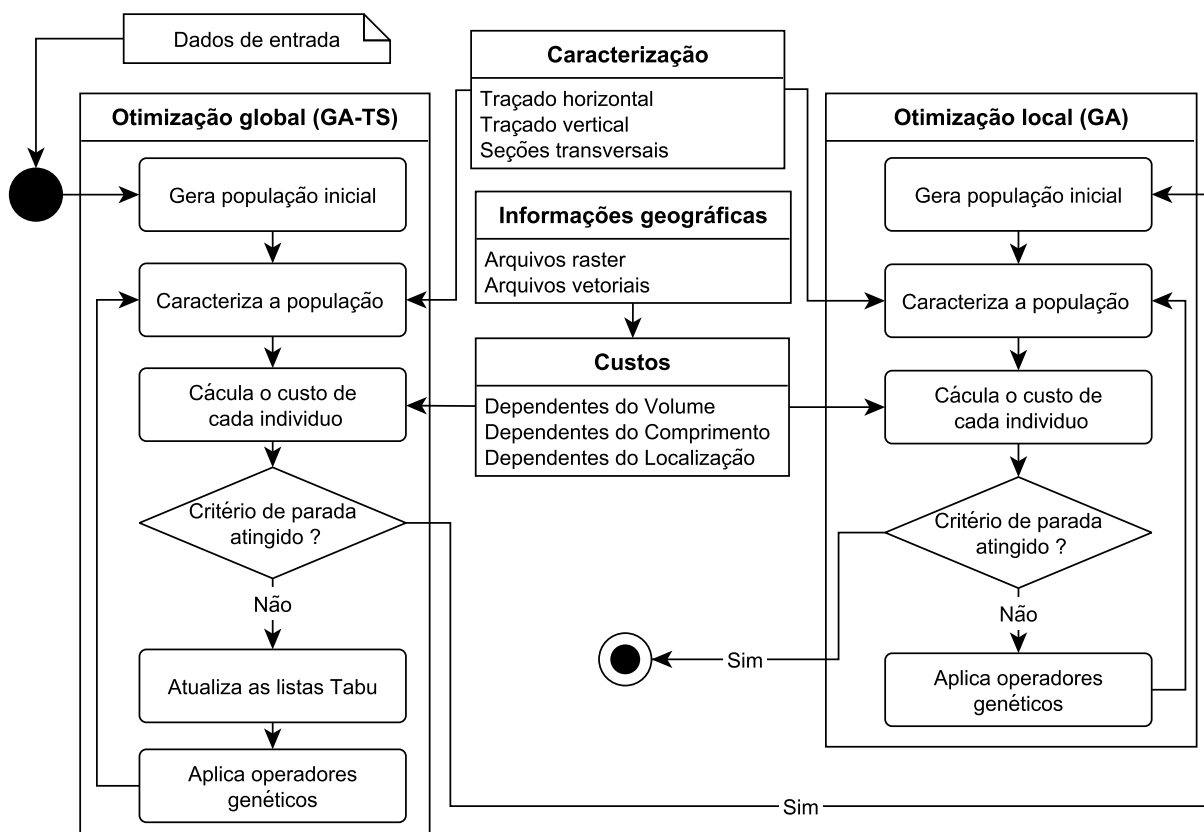
Vázquez-Méndez et al. (2018) apresentaram um modelo matemático da rodovia que contém, além das curvas circulares, curvas de transição no alinhamento horizontal; superelevação na seção transversal; ângulos do talude de corte e aterro que variam conforme tipo de solo; pavimentação da rodovia e curvas parabólicas no alinhamento vertical. Para o cálculo do custo da terraplanagem o modelo abrange a possibilidade de diferentes camadas de materiais, com diferentes preços de escavação. Como restrições foram consideradas as geométricas nos elementos de alinhamentos horizontais e verticais. Para a resolução do problema os autores utilizaram técnicas de GA, enxame de partículas e programação quadrática sequencial. Os autores apontaram dificuldades em gerar indivíduos válidos (os que não respeitavam as restrições eram descartados) para a população inicial, devido à geração randômica da população e o grande número de restrições utilizadas.

3 Materiais e método

Este capítulo apresenta em detalhes o modelo de otimização de traçado geométrico implementado neste trabalho. O capítulo abrange a caracterização geométrica da via, o cálculo dos custos e detalhes do algoritmo de otimização.

O macroprocesso do método de otimização é apresentado na Figura 31.

Figura 31: Macroprocesso do método de otimização

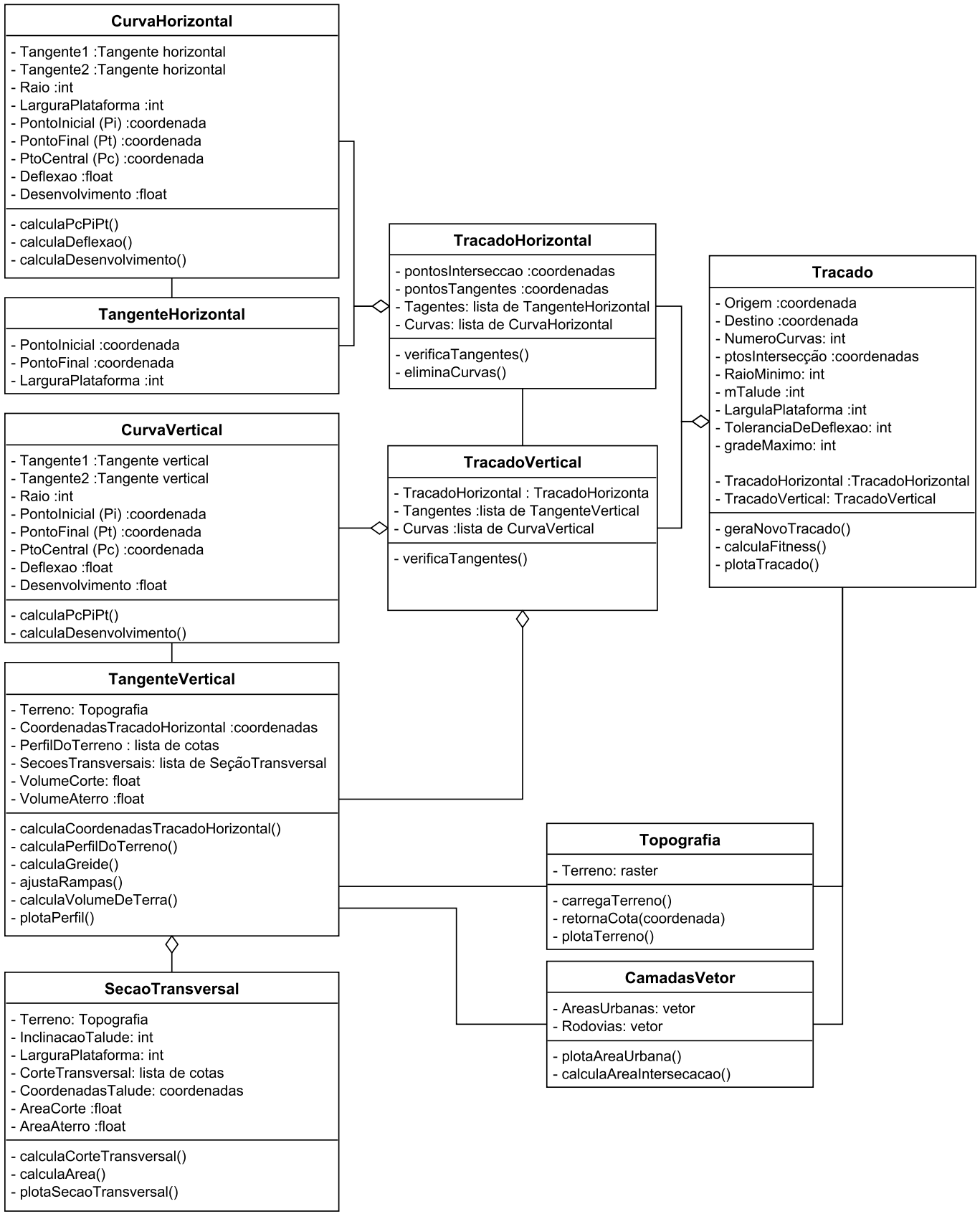


A caracterização geométrica é feita em todos os indivíduos da população inicial e a cada nova geração de indivíduos. Para a otimização foi utilizado um algoritmo genético híbrido, com a inserção da lista tabu, originalmente utilizado no algoritmo de Busca Tabu. O processo é dividido em dois níveis, o nível global é o responsável por explorar a área de estudo, já o nível local tem como objetivo atribuir os raios das curvas circulares no traçado horizontal.

3.1 Caracterização geométrica do indivíduo

A Figura 32 apresenta o diagrama de classes dos objetos implementados e suas relações para a caracterização do traçado rodoviário.

Figura 32: Diagrama de classes - Caracterização geométrica da rodovia



O objeto Traçado contém todas as informações necessárias para caracterizar a rodovia. É composto pelos objetos Traçado Horizontal e Traçado Vertical. O Traçado Horizontal contém as Tangentes Horizontais e Curvas Horizontais. Por sua vez, o Traçado Vertical é formado pelas Curvas Verticais e Tangentes Verticais, que contêm as Seções Transversais da rodovia.

Os objetos Topografia e Camadas Vetoriais contém as operações a serem feitas nos dados geográficos utilizadas no cálculo dos custos da rodovia, não influenciam diretamente a caracterização da rodovia.

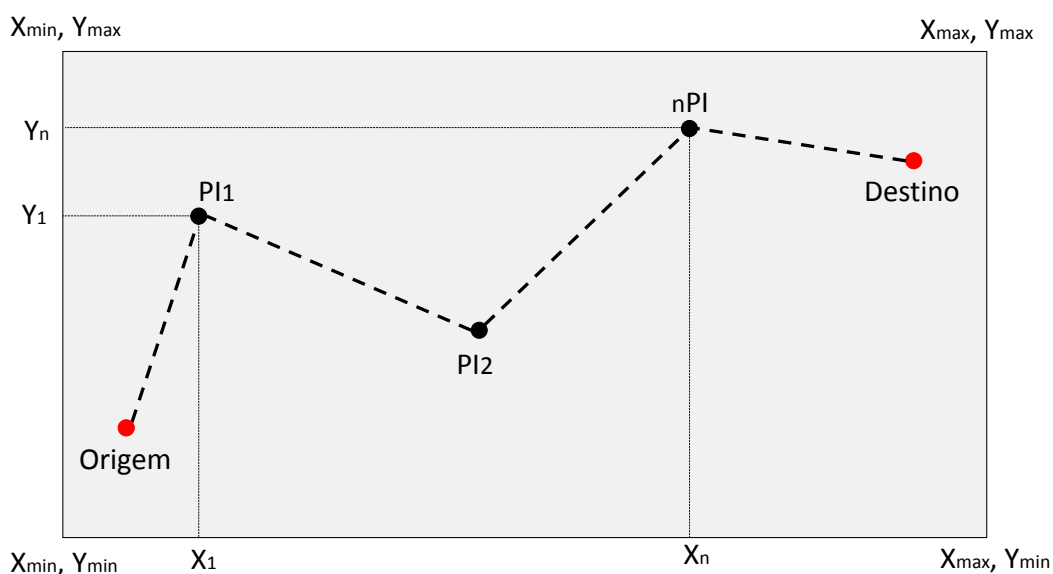
3.1.1 Traçado geométrico horizontal

O traçado horizontal é caracterizado por um número pré-definido de Pontos de Intersecção (PIs). O número de PIs do traçado também limita o número máximo de curvas. Cada PI possui informações de coordenadas X (Longitude) e Y (Latitude). Para caracterizar um novo traçado horizontal são necessários os seguintes dados de entrada:

- Pontos de origem e destino;
- Coordenadas dos Pontos de Intersecção (PIs); e
- Raio mínimo;

A Figura 33 apresenta um exemplo genérico de tangentes formadas a partir das coordenadas dos PIs apresentadas na Equação 21.

Figura 33: Caracterização da geometria horizontal



$$PIs = [PI_1, PI_2, \dots, PI_n] = [x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]$$

Sujeito a: (21)

$$X_{min} \leq x_i \leq X_{max}; Y_{min} \leq y_i \leq Y_{max} \quad \forall i \text{ em } nPI$$

Para atender a recomendação de DNER (1999) quanto ao ângulo de deflexão (Equação 22), o ângulo de deflexão entre todas as tangentes deve ser maior que 10 graus. Caso o ângulo de deflexão seja menor que a tolerância de deflexão, elimina-se o PI correspondente.

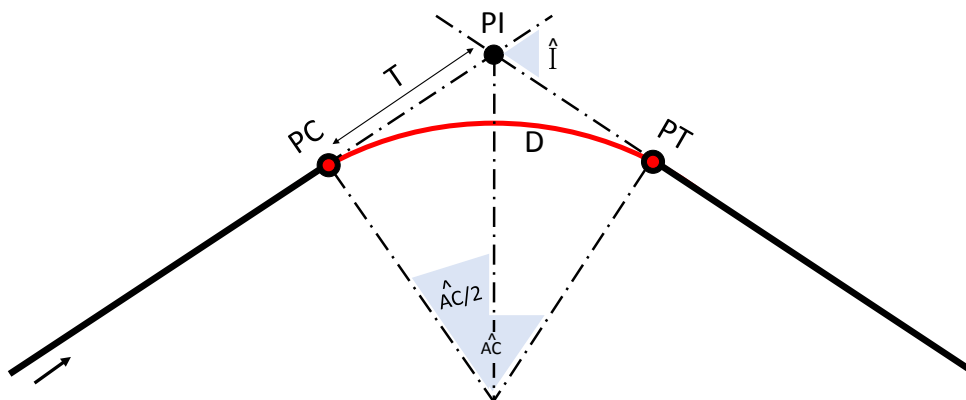
$$10^\circ \leq \hat{I} \leq 35^\circ \quad (22)$$

Após a verificação do ângulo de deflexão, parte-se para a verificação das concordâncias com curva. Dois tipos de curvas podem ser utilizadas para a concordância entre duas tangentes, a curva circular e a curva de transição. Conforme Lee (2017), as concordâncias com curvas circulares resultam em um traçado fluente e contínuo do ponto de vista geométrico, no entanto produz efeitos adversos devido ao surgimento de forças laterais que atuam sobre os veículos. Para minimizar esse choque dinâmico são utilizadas as curvas de transição, de forma a permitir uma passagem suave entre o trecho em tangente e o trecho em curva circular.

Embora o uso das curvas de transição seja o mais indicado, segundo Worrall e Nebot (2007), elas são uma proporção relativamente pequena da curva horizontal. A opção pelo uso das curvas circulares no modelo se justifica, portanto, pela facilidade de implementação sem perdas significativas no modelo.

Para efetuar a concordância com curva circular (Figura 34) calcula-se as tangentes externas (T) de todas as curvas, conforme apresentado na Equação 23.

Figura 34: Concordância com curva circular simples



$$T = R_{min}.tg\left(\frac{\hat{AC}}{2}\right) \quad (23)$$

onde:

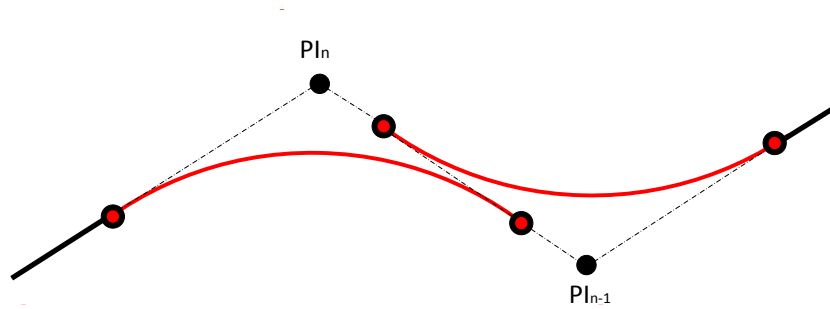
T = tangente externa (m);

R_{min} = raio mínimo (m);

$\hat{AC} = \hat{I}$ = ângulo central, numericamente igual à deflexão (radianos)

Após calcular as tangentes externas verifica-se se a soma das tangentes externas das curvas não é maior que a distância entre os PIs das curvas (Equação 24). Caso essa condição não seja atendida (como apresentado na Figura 35), o traçado é descartado. Se a condição for aprovada, criam-se as curvas circulares e tangentes horizontais que compõem o traçado horizontal.

Figura 35: Exemplo de não concordância entre curvas



$$T_n + T_{n-1} \leq \|PI_n - PI_{n-1}\| \quad (24)$$

onde:

T = tangente externa da curva (m); e

PI = ponto de intersecção da curva (x, y);

$\|PI_n - PI_{n-1}\|$ = distância entre PI_n e PI_{n-1}

Com relação ao raio utilizado nas curvas circulares, na otimização global (Subseção 3.3.1) utilizou-se raio constante para todas as curvas. Já na otimização local (Subseção 3.3.2), os raios são variados a partir dos PIs fixados na otimização global, ou seja, não se limita a um raio constante.

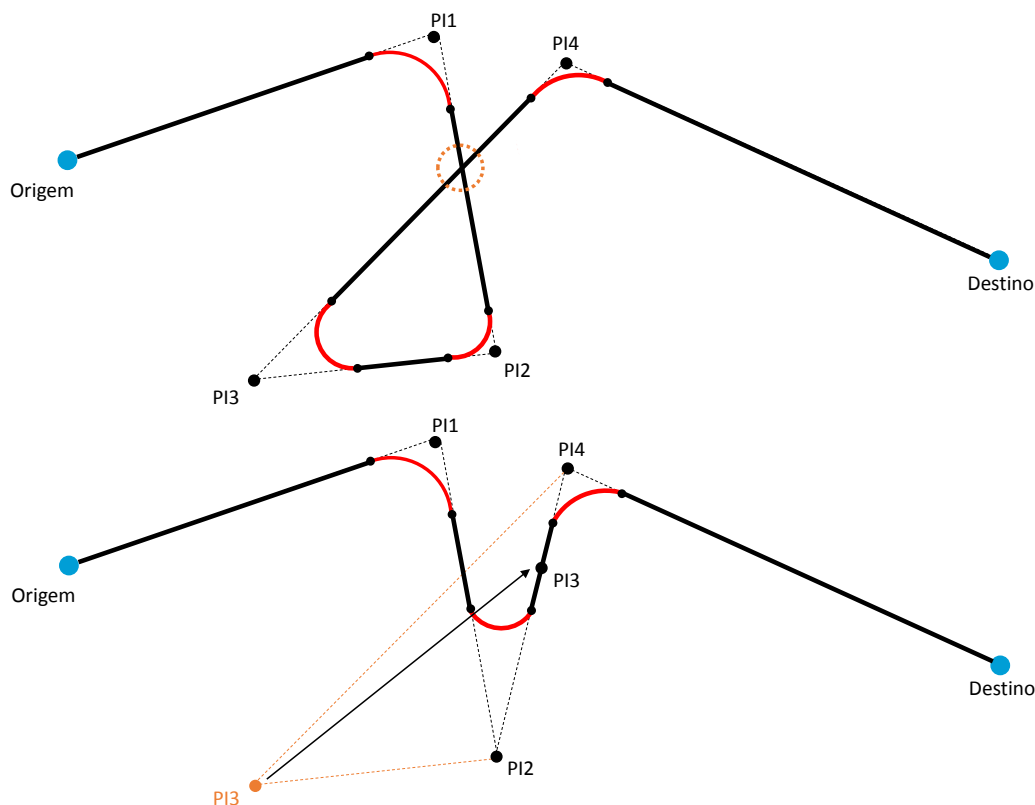
Por fim, o traçado horizontal passa pelo procedimento de eliminação de curvas desnecessárias. São identificados os pontos de cruzamento e recalculadas as coordenadas dos PIs que causam o efeito indesejado. A Figura 36 traz um exemplo de caracterização horizontal após o procedimento de eliminação de curvas. Inicia-se com a verificação sucessiva das tangentes. No exemplo, $\|Origem - PI_1\|$ formam a primeira tangente, ela não se cruza com nenhuma outra. Logo depois, verifica-

se a segunda tangente, $\|PI_1 - PI_2\|$ que, até o momento, também não se cruza com nenhuma outra tangente. A terceira tangente, $\|PI_2 - PI_3\|$, também não cruza outra tangente. A próxima, $\|PI_3 - PI_4\|$ cruza com a $\|PI_1 - PI_2\|$, que já tinha sido verificada. Devido a isso, modifica-se a coordenada PI_3 , conforme Equação 26. Após cada eliminação de PI, reinicia-se o processo até nenhum cruzamento ser encontrado.

$$\text{Formação anterior dos PIs} = [PI_1, PI_2, PI_3, PI_4] \quad (25)$$

$$\text{Formação após ajuste dos PIs} = [PI_1, PI_2, \frac{PI_2 + PI_4}{2}, PI_4] \quad (26)$$

Figura 36: Exemplo de eliminação de curvas



Verificou-se a necessidade do procedimento de eliminação de curvas devido à natureza aleatória da criação de novos traçados para a aplicação do algoritmo genético. O modelo implementado permite a alocação dos PIs de forma aleatória na área de estudo para a criação da população inicial (mais detalhes são abordados na Seção 3.3). Após testes, verificou-se que em torno de 80% dos traçados gerados apresentavam curvas desnecessárias e davam voltas em torno do mesmo ponto, uma característica indesejável.

Após a caracterização, identificam-se as estacas por meio de pontos. Nas tangentes são atribuí-

das estacas a cada 20 metros, nas curvas a cada 10 metros. As estacas serão utilizadas posteriormente para definir as Seções Transversais.

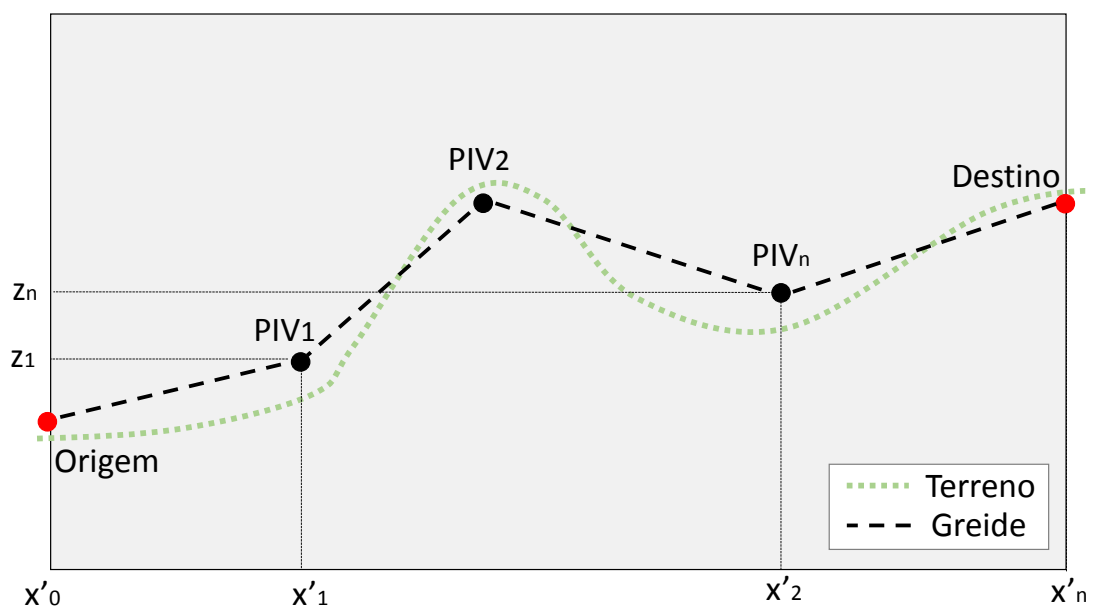
3.1.2 Traçado geométrico vertical

Definido o traçado horizontal, parte-se para a definição do greide da rodovia no eixo vertical. O traçado vertical é composto de trechos retos e curvas verticais. Ao contrário do traçado horizontal, o modelo implementado não limita o número máximo de PIs (no traçado vertical, Ponto de Intersecção Vertical - PIV) que formam o traçado. Para caracterizar o traçado vertical são necessários os seguintes dados de entrada:

- Arquivo *raster* do modelo digital do terreno da área de estudo;
- Traçado horizontal;
- Valor K_{min} para curvas convexas;
- Valor K_{min} para curvas côncavas;
- Rampa máxima; e
- Grau da regressão polinomial

A Figura 37 apresenta um exemplo genérico de tangentes verticais formadas a partir das coordenadas dos PIVs, conforme definido na Equação 27.

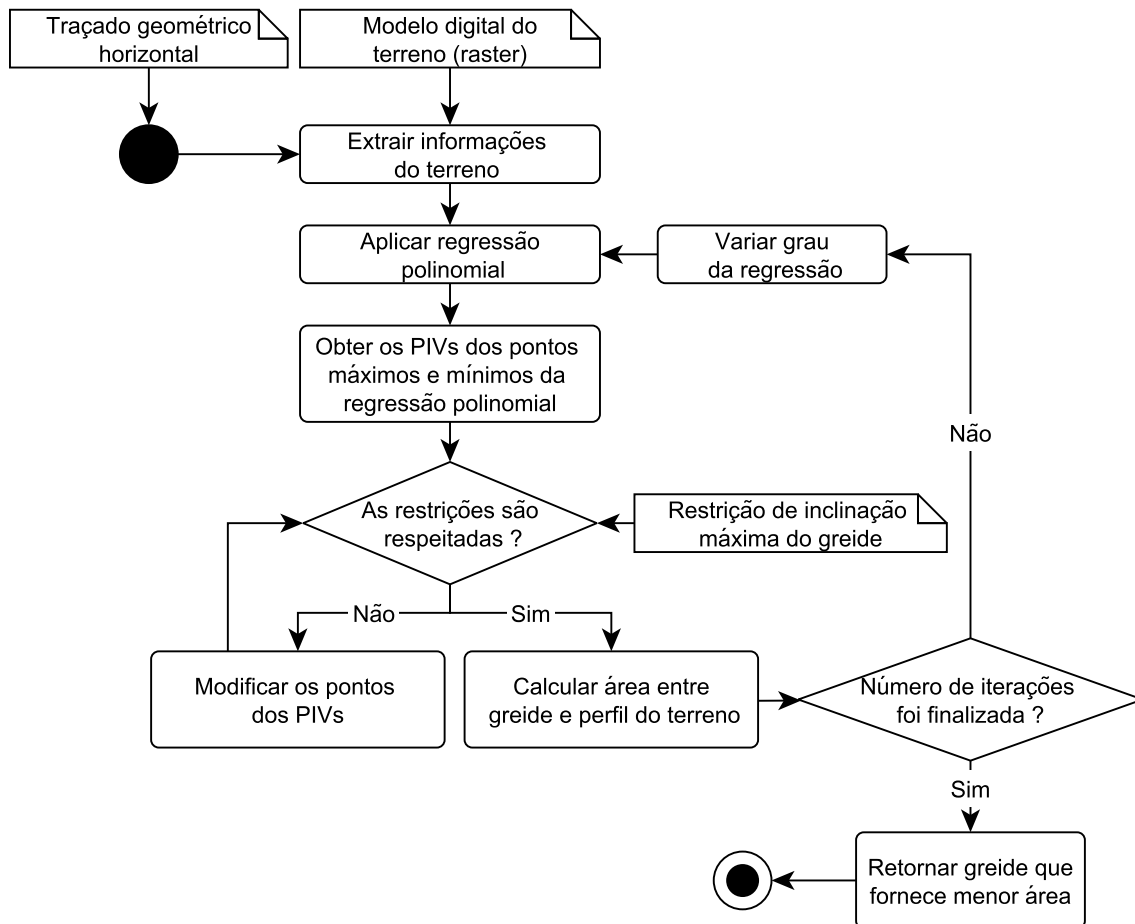
Figura 37: Caracterização da geometria vertical



$$PIVs = [PIV_1, PIV_2, \dots, PIV_n] = [x'_1, z_1, x'_2, z_2, \dots, x'_n, z_n] \quad (27)$$

Para a obtenção da geometria vertical, utilizou-se o modelo de regressão polinomial de Mil e Piantanakulchai (2013), detalhado no fluxograma da Figura 38.

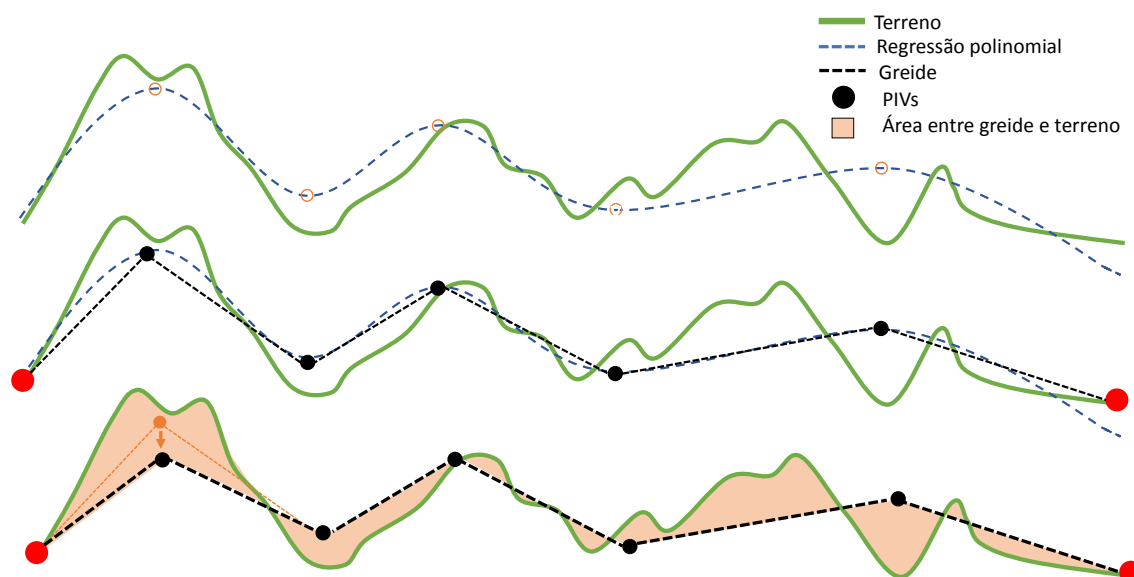
Figura 38: Fluxograma do processo de obtenção do traçado geométrico vertical



Fonte: Adaptado de MIL; PIANTANAKULCHAI (2013)

A Figura 39 apresenta um exemplo de aplicação do processo de obtenção do traçado geométrico vertical implementado. A partir das coordenadas das estacas do traçado geométrico horizontal obteve-se os valores de cota do modelo digital de elevação do terreno. Após isso, é aplicada a regressão polinomial. Procede-se com a identificação dos pontos de máximo e mínimos locais (futuros PIVs) e liga-se esses pontos com tangentes. Verifica-se se a restrição de inclinação máxima do greide é respeitada, caso não, ajusta-se os pontos (PIVs) para que as tangentes respeitem a restrição de rampa máxima.

Figura 39: Exemplo de obtenção do traçado geométrico vertical



Após os ajustes das rampas, parte-se para a verificação das concordâncias com curva parabólica, conforme os critérios apresentados na Seção 2.1.3. Verifica-se o comprimento das curvas verticais e compara-se com a distância entre os PIVs que formam as tangentes verticais, de modo similar ao procedimento realizado no traçado horizontal, conforme Equação 28. Caso esse requisito não seja respeitado, o traçado é descartado.

$$\frac{L'_n}{2} + \frac{L'_{n-1}}{2} \leq ||PIV_n - PIV_{n-1}|| \quad (28)$$

onde:

L' = comprimento da curva vertical (m); e

PIV = ponto de intersecção da curva vertical (x, y);

$||PIV_n - PIV_{n-1}||$ = distância horizontal entre PIV_n e PIV_{n-1}

Com relação ao grau da regressão polinomial, foi utilizado um processo iterativo, que varia do grau 1 ao grau 20 e retorna o traçado vertical que apresenta a menor área entre o greide e o perfil do terreno. Para efetuar a regressão utilizou-se o método *numpy.polyfit*².

3.1.3 Seção transversal

Com a caracterização do traçado geométrico horizontal e vertical, é possível gerar as seções transversais. Para isso são necessários os seguintes dados de entrada:

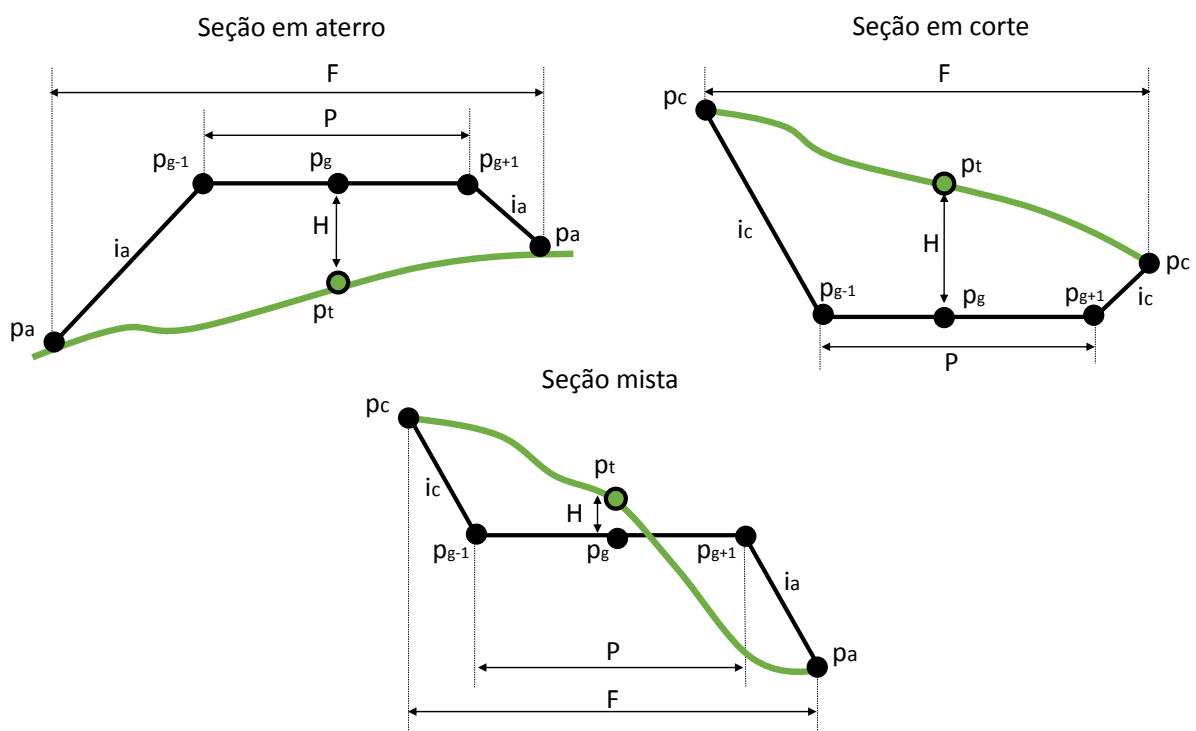
- Traçado horizontal;

²<https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/generated/numpy.polyfit.html>

- Traçado vertical;
- Arquivo *raster* do modelo digital do terreno da área de estudo;
- Inclinação do talude de corte e aterro; e
- Largura da plataforma de terraplenagem.

A Figura 40 mostra caracterização das seções transversais de corte, aterro e mista.

Figura 40: Caracterização das seções transversais



onde:

- P = largura da plataforma de terraplenagem;
- p_g = ponto de cota do greide;
- p_{g-1} e p_{g+1} = extremidades da plataforma de terraplenagem ;
- p_t = ponto de cota do terreno;
- i_a e i_c = inclinação do talude de corte e aterro;
- H = diferença de cota entre o ponto de greide e do terreno ;
- p_a = off-set de aterro ;
- p_c = off-set de corte ;
- F = distância horizontal entre off-set de corte e aterro.

As seções transversais são caracterizadas para todas as estacas definidas no traçado horizontal. O ponto p_g é obtido do greide do traçado geométrico vertical (Figura 37) para cada estaca. A partir do p_g é possível obter os pontos p_{g-1} e p_{g+1} , conforme Equação 29.

$$\begin{aligned} p_{g-1} &= p_g - \frac{P}{2} \\ p_{g+1} &= p_g + \frac{P}{2} \end{aligned} \quad (29)$$

O terreno transversal (em verde na Figura 40) é obtido do arquivo *raster* do modelo digital do terreno. A partir do terreno transversal obtêm-se o ponto de cota do terreno p_t do traçado geométrico vertical.

Compara-se as cotas dos pontos p_{g-1} e p_{g+1} com as cotas do terreno transversal para identificar se a seção é em corte, aterro ou mista. Com a inclinação dos taludes de corte (i_c) e aterro (i_a) determina-se o ponto de intersecção do talude com o terreno da seção transversal, são definidos assim os *off-sets* de corte (p_c) e aterro (p_a).

O modelo implementado não diferencia entre seções transversais em curvas ou em tangentes. A superlargura e as diferentes declividades transversais utilizadas para o abaulamento da pista não foram consideradas. As inclinações dos taludes de corte (i_c) e aterro (i_a) também possuem um valor único.

A partir da caracterização da seção transversal é possível identificar trechos que necessitam pontes ou túneis. Utilizou-se neste modelo o critério de diferença de cota entre o ponto de greide e do terreno (H).

Assim utilizou-se como limites:

- Para pontes:

$$p_g - p_t \geq 30 \text{ metros}$$

- Para túneis:

$$p_t - p_g \geq 30 \text{ metros}$$

3.2 Cálculo do custo

O cálculo do custo é uma etapa essencial do processo. A partir dele pode-se avaliar a aptidão de cada alternativa de traçado caracterizada. O custo é um dos componentes (pode ser também o único, caso não for utilizado componentes de penalidade) do *Fitness* de cada indivíduo gerado no processo de otimização por GA. Sua formulação influencia diretamente o resultado do procedimento de otimização.

O cálculo do custo é efetuado após a caracterização geométrica da rodovia. Os dados de entrada necessários para o cálculo são:

- Traçado horizontal;
- Traçado vertical;
- Seções transversais;
- Arquivos geográficos (*raster* ou *vetor*) para os custos geograficamente sensíveis; e
- Custos unitários de cada componente a ser calculado.

Os componentes de custos utilizados neste trabalho, conforme classificação de Jong e Schonfeld (1999) e Jha e Schonfeld (2000), são:

- Custos dependentes do volume: terraplenagem (corte, aterro, empréstimo e bota fora);
- Custos dependentes do comprimento: pavimentação, OAE (pontes e túneis).
- Custos dependentes da localização: intersecção com obras existentes; desapropriação de terras, áreas ambientais e socioeconômicas.

Assim, a formulação final do custo é definida pela Equação 30.

$$CT = C_{ter} + C_{pav} + C_{oea} + C_{int} + C_{des} + C_{amb} \quad (30)$$

Onde:

- C_{ter} : Custo de terraplanagem;
- C_{pav} : Custo de pavimentação;
- C_{oea} : Custo de obras de arte especiais;
- C_{int} : Custo por intersecções;
- C_{des} : Custo de desapropriação de terras; e
- C_{amb} : Custo ambiental e socioeconômico.

3.2.1 Custo de terraplenagem

O custo de terraplenagem (Equação 31) é uma função direta do volume de material do corte, aterro, empréstimo e bota-fora. Os volumes de bota-fora ou empréstimo são obtidos da diferença entre os volumes de corte e aterro (Equação 32). Se houve mais volume de corte que o volume necessário de aterro é preciso transportar o material excedente até o local disponibilizado para bota-fora. O contrário acontece no caso da falta de material para aterro, o material faltante deve ser retirado da área de empréstimo.

$$C_{ter} = V_c \cdot c_c + V_a \cdot c_a + V_e \cdot c_e + V_b \cdot c_b \quad (31)$$

$$V_e \text{ ou } V_b = V_c - V_a \quad (32)$$

Onde:

- C_{ter} : Custo de terraplanagem;
- V_c : Volume de material do corte (m^3);
- V_a : Volume de material do aterro (m^3);
- V_e : Volume de material de empréstimo de jazidas (m^3);
- V_b : Volume de material descartado em bota-fora (m^3);
- c_c : Custo unitário do corte ($R\$/m^3$);
- c_a : Custo unitário do aterro ($R\$/m^3$);
- c_e : Custo unitário do empréstimo ($R\$/m^3$);
- c_b : Custo unitário do bota-fora ($R\$/m^3$).

O cálculo do volume de terraplanagem procede-se pelo método das médias das áreas das seções transversais sucessivas, conforme detalhado na Seção 2.2. As seções transversais estão definidas na Seção 3.1.3.

3.2.2 Custo de pavimentação

O custo de pavimentação (Equação 33) é definido como uma função direta do comprimento da rodovia, obtido simplificadamente por meio do traçado horizontal (Seção 3.1.1).

$$C_{pav} = L_{rod} \cdot c_{pav} \quad (33)$$

Onde:

- C_{pav} : Custo de pavimentação ($R\%$);
- L_{rod} : Comprimento horizontal da rodovia (km);
- c_{pav} : Custo unitário de pavimentação ($R\$/km$);

3.2.3 Custo de obras de arte especiais

Assim como o custo de pavimentação, o custo das OAE (Equação 34) é função direta dos comprimentos dos túneis e das pontes.

$$C_{oea} = \sum_{i=1}^n L_{ponte} \cdot c_{ponte} + \sum_{i=1}^n L_{tunel} \cdot c_{tunel} \quad (34)$$

Onde:

- C_{oea} : Custo de obras de arte especiais ($R\%$);
- L_{ponte} : Comprimento horizontal da ponte (km);

c_{ponte} : Custo unitário da ponte ($R\$/km$);
 L_{tunnel} : Comprimento horizontal do túnel (km);
 c_{tunnel} : Custo unitário do túnel ($R\$/km$);

3.2.4 Custo por intersecções com obras existentes

O custo por intersecções (Equação 35) é obtido pela quantidade de intersecções entre o traçado horizontal e obras rodoviárias existentes na área de estudo (Figura 41). É um custo geograficamente sensível, pois depende da localização do traçado planejado e das obras existentes na área de estudo.

$$C_{int} = n_{int} \cdot c_{int} \quad (35)$$

Onde:

C_{int} : Custo por intersecções ($R\%$);
 n_{int} : Número de intersecções;
 c_{int} : Custo unitário por intersecção ($R\%$).

Figura 41: Exemplo de ocorrência de intersecções com rodovias existentes



3.2.5 Custo de desapropriação

O custo de desapropriação é obtido pela multiplicação da área a ser desapropriada pelo seu custo unitário (Equação 36). A área a ser desapropriada é definida pela área de intersecção entre a faixa de domínio da rodovia (definida pelos pontos de off-set de corte e aterro mais distância regulamentar) e áreas de propriedade privada (Figura 42). Com o objetivo de simplificar o cálculo, utilizou-se no

modelo apenas áreas urbanas com um único custo unitário, no entanto é possível adicionar áreas específicas com custo diferentes.

$$C_{des} = a_{des} \cdot c_{des} \quad (36)$$

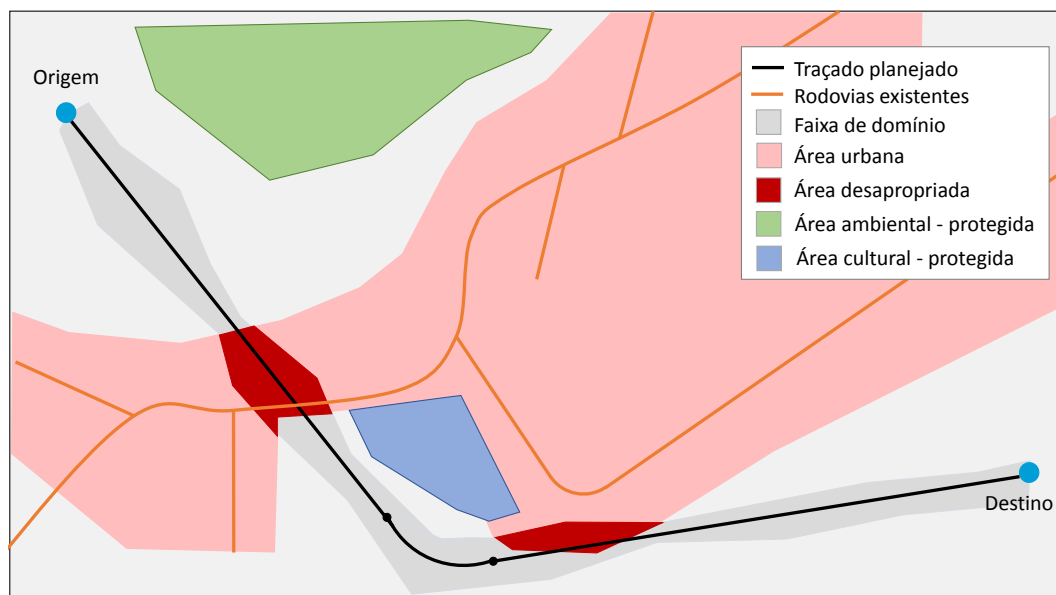
Onde:

- C_{des} : Custo de desapropriação (R\$);
- a_{des} : área total a ser desapropriada (m^2);
- c_{des} : custo unitário da área (R\$/ m^2).

3.2.6 Custo ambiental e socioeconômico

Semelhante ao custo de desapropriação, o custo ambiental e socioeconômico é obtido pela multiplicação da áreas ambientalmente sensível pelo seu custo unitário (Equação 37). Geralmente por conta de regulamentações específicas, áreas ambientais e de interesse cultural não podem ser invadidas pela faixa de domínio da rodovia, por conta disto recomenda-se a atribuição de um custo unitário elevado para essas áreas.

Figura 42: Exemplo de ocorrência de áreas a serem desapropriadas



$$C_{amb} = a_{amb} \cdot c_{amb} \quad (37)$$

Onde:

- C_{amb} : Custo ambiental e socioeconômico (R\$);
- a_{amb} : área total invadida pela faixa de domínio (m^2);
- c_{amb} : custo unitário da área (R\$/ m^2).

3.3 Processo de otimização

O objetivo do processo de otimização é buscar uma solução que minimize a função objetivo ao mesmo tempo que satisfaz as restrições de projeto e restrições geográficas (dependentes da área de estudo). Sendo PI_n o número de genes (ou número de pontos de intersecção horizontal), formula-se o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar}_{x_1, y_1, \dots, x_n, y_n} CT = C_{ter} + C_{pav} + C_{oea} + C_{int} + C_{des} + C_{amb} \\
 &\text{Sujeito a: } X_{min} \leq x_i \leq X_{max}; Y_{min} \leq y_i \leq Y_{max} \quad \forall i \text{ em } PI_n, \quad (38.a) \\
 &\quad \hat{I}_i > 10^\circ \quad \forall i \text{ em } PI_n, \quad (38.b) \\
 &\quad R_i \geq R_{min} \quad \forall i \text{ em } PI_n, \quad (38.c) \\
 &\quad T_i + T_{i-1} \leq ||PI_i - PI_{i-1}|| \quad \forall i \text{ em } PI_n, \quad (38.d) \quad (38) \\
 &\quad \frac{L'_j}{2} + \frac{L'_{j-1}}{2} \leq ||PIV_j - PIV_{j-1}|| \quad \forall j \text{ em } PIV_n, \quad (38.e) \\
 &\quad Dg_j \leq Dg_{max} \quad \forall j \text{ em } PIV_n, \quad (38.f) \\
 &\quad P_k = P_{max} \quad \forall k \text{ em } ST_n, \quad (38.g) \\
 &\quad ic_k = ia_k = iAC_{max} \quad \forall k \text{ em } ST_n. \quad (38.h)
 \end{aligned}$$

Onde: CT = Custo total, conforme definido na Seção 3.2,

PI_n = número máximo de pontos de intersecções horizontais,

$PI_i = (x_i, y_i)$ = i-ésimo ponto de intersecção,

x_i = i-ésima coordenada de longitude,

y_i = i-ésima coordenada de latitude,

X_{min} = coordenada mínima de longitude no plano horizontal,

Y_{min} = coordenada mínima de latitude no plano horizontal,

X_{max} = coordenada máxima de longitude no plano horizontal,

Y_{max} = coordenada máxima de latitude no plano horizontal,

\hat{I}_i = deflexão horizontal, definido por:

$$= 180^\circ - \angle(\overrightarrow{PI_{i-1} - P\hat{I}_i}, \overrightarrow{PI_{i+1} - P\hat{I}_i}),$$

R_i = raio da i-ésima curva circular horizontal,

R_{min} = raio mínimo da curva circular,

T_i = tangente externa da curva horizontal, definida por:,
 $= R_i \cdot tg(\frac{\hat{I}_i}{2})$,
 $||PI_i-PI_{i-1}||$ = distância entre PI_i e PI_{i-1} ,
 PIV_n = número de pontos de intersecções verticais (Seção 3.1.2),
 $PIV_j = (x'_j, z_j)$ = j-ésimo ponto de intersecção vertical,
 x'_j = j-ésima coordenada de extensão da rodovia,
 z_j = j-ésima cota do greide,
 L'_j = comprimento da j-ésima curva vertical (Seção 2.1.3),
 $||PIV_j-PIV_{j-1}||$ = distância horizontal entre PIV_j e PIV_{j-1} ,
 Dg_{max} = Declividade máxima do greide,
 Dg_j = Declividade do greide nos trechos entre PIV_j e PIV_{j-1} ,
 ST_n = Número de seções transversais da rodovia (Seção 3.1.3),
 ST_k = k-ésima seção transversal,
 P_k = Largura da plataforma de terraplenagem da k-ésima seção transversal,
 P_{max} = Largura máxima da plataforma de terraplenagem,
 iC_k = Inclinação do talude de corte da k-ésima seção transversal,
 iA_k = Inclinação do talude de aterro da k-ésima seção transversal
 iAC_{max} = Inclinação máxima do talude de corte ou aterro..

A função objetivo a ser minimizada é a função Custo Total (CT) com seis componentes de custo, detalhados na Seção 3.2. Busca-se com essa função reduzir os custos construtivos de terraplenagem, pavimentação e obras de artes especiais; reduzir os custos com desapropriação, que colabora para minimizar possíveis conflitos sociais e questões judiciais; e reduzir os impactos sociais e ambientais da obra.

A restrição (38.a) limita a área de busca, define um polígono com longitudes (x_i) e latitudes (y_i) mínimas e máximas. A (38.b) restringe as deflexões horizontais (\hat{I}_i) a no mínimo 10° . A (38.c) restringe os raios das curvas horizontais (R_i) a um raio mínimo definido (R_{min}). A restrição (38.d) se refere à concordância das curvas horizontais, detalhada na Subseção 3.1.1, assim como a (38.e) dita a concordância das curvas verticais (Subseção 3.1.2). A (38.f) limita a inclinação da tangente vertical. As restrições (38.g) e (38.h) se referem ao tamanho da plataforma de terraplenagem e inclinação do talude de corte e aterro, ambas fazem parte das restrições das Seções Transversais

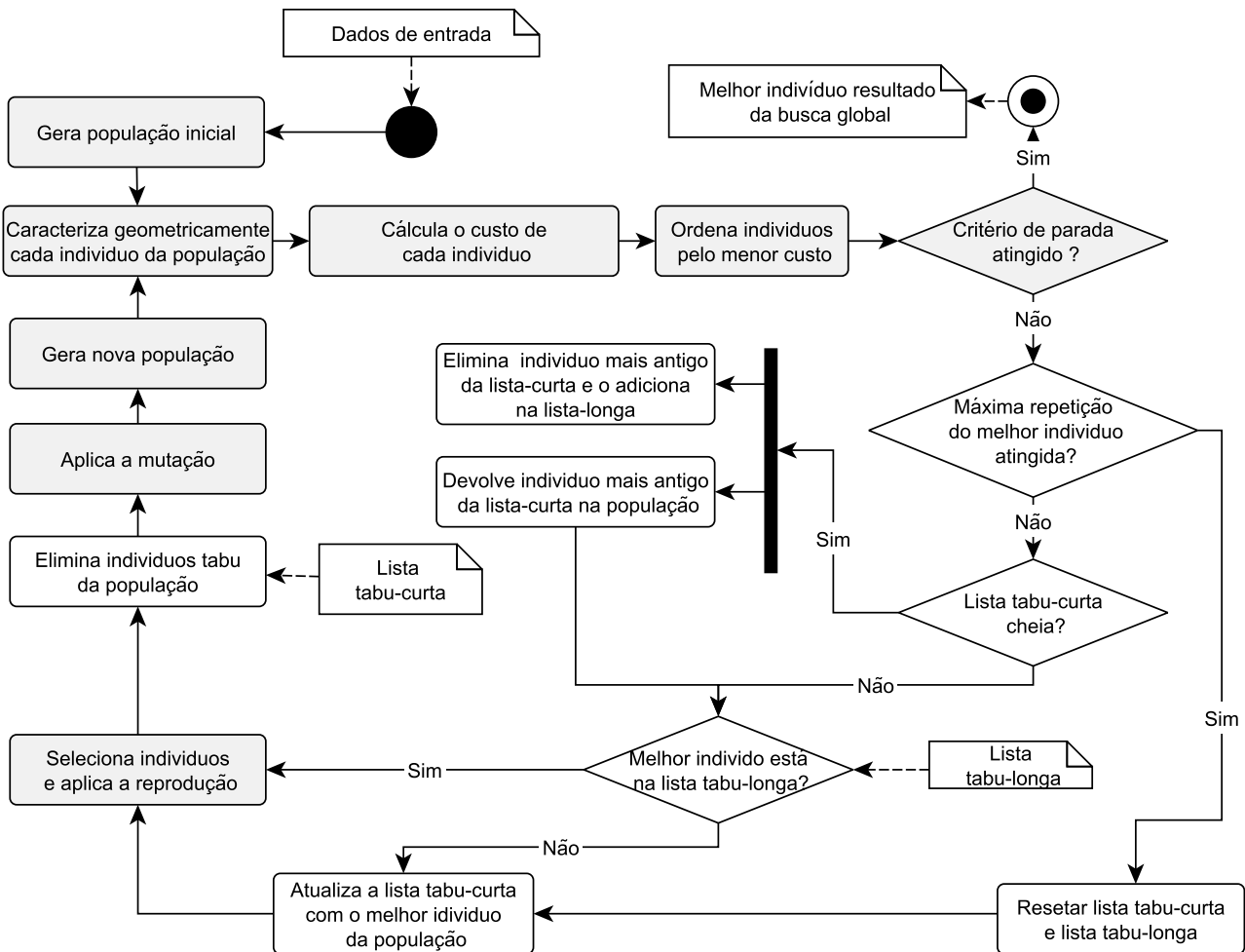
(Subseção 3.1.3).

Para resolver o problema de otimização definido pelo modelo da Equação 38, utilizou-se um algoritmo em dois níveis, global e local. A otimização global é a responsável por explorar a área de busca, nesta etapa utiliza-se um algoritmo genético híbrido, com a inserção da lista tabu. A otimização local tem como objetivo refinar o resultado encontrado em nível global, ela calcula os raios das curvas circulares no traçado horizontal.

3.3.1 Otimização global

A Figura 43 apresenta o fluxograma da etapa da otimização global.

Figura 43: Fluxograma geral das etapas da otimização global por meio de algoritmo híbrido GA-TS



A partir dos dados de entrada gera-se a população inicial. Todos os indivíduos da população inicial e de cada iteração são caracterizados geometricamente (traçado geométrico horizontal, traçado geométrico vertical e seções transversais, conforme detalhado na Seção 3.1). Calcula-se o custo de cada indivíduo a partir dos custos unitários e geograficamente sensíveis (detalhado na Seção 3.2). Posteriormente ao cálculo do custo, ordena-se os indivíduos pelo menor custo. Após isso seleciona-se

os indivíduos mais aptos e procede-se com a aplicação dos operadores genéticos de reprodução e mutação para gerar a nova população. O processo é contínuo até que o critério de parada seja atingido, momento em que se retorna o indivíduo com o menor custo.

O processo descrito no parágrafo anterior diz respeito às etapas do GA. Além das etapas do GA, foram adicionadas etapas referentes ao algoritmo de Busca Tabu, mais especificamente a lista tabu. A cada geração adiciona-se o indivíduo mais apto na lista tabu-curta (memória curta). Após a aplicação do operador de reprodução compara-se cada indivíduo filho com os indivíduos da lista-curta, em caso de semelhança os indivíduos são eliminados da população. Para permitir que um indivíduo bom passe seus genes para as próximas gerações, criou-se uma segunda lista, chamada de lista tabu-longa (memória longa). Após um número determinado de gerações na lista-curta, os indivíduos dessa lista são adicionados na lista-longa. Os indivíduos semelhantes aos presentes na lista-longa não podem ser eliminados da população.

A adição das listas tabu no GA permite que o algoritmo explore mais regiões no espaço de busca. A lista curta busca manter a diversidade da população e inibir a convergência para mínimos locais. A lista longa armazena os melhores indivíduos das gerações anteriores e devolve-os à população para intensificar a busca naquele local.

Para iniciar o procedimento de otimização global são necessários os seguintes dados de entrada:

- **Com relação ao algoritmo de otimização:**

- Tamanho da população: quantidade de indivíduos gerados na população inicial e mantidos durante as gerações;
- Número de genes: quantidade de pontos de intersecção horizontal (PIs);
- Taxa de reprodução: porcentagem de indivíduos que transmitirão seus genes para as próximas gerações;
- Taxa de mutação: porcentagem de indivíduos que sofrerão mutação;
- Critério de parada: critério no qual o procedimento irá terminar e retornar a melhor solução encontrada;
- *Tabu tenure* (tamanho) da lista-curta: número de indivíduos armazenados na lista-curta;
- *Tabu tenure* (tamanho) da lista-longa: número de indivíduos armazenados na lista-longa;
- Critério de semelhança: critério utilizado para comparar a semelhança entre indivíduos, utilizado para a aplicação das listas tabu;
- Máxima repetição de melhor indivíduo: número de gerações com o mesmo melhor indivíduo, utilizado para *resetar* as listas tabu.

- **Com relação à área de estudo:**

- Pontos de origem e destino da rodovia;
- Limitações geométricas da rodovia: Conforme Seção 3.1;
- Custos unitários: Conforme Seção 3.2;
- Dados geográficos utilizados para o cálculo do custo: Conforme Seção 3.2.

A seguir são apresentados em detalhes cada etapa do algoritmo desenvolvido.

População inicial A população inicial é gerada aleatoriamente. Deve-se informar o tamanho da população e o número de genes (número de *PIs*) de cada cromossomo (Indivíduo). O cromossomo (Equação 39) é uma lista de genes que contém os dados que são utilizados para a caracterização geométrica de cada indivíduo.

$$\text{Cromossomo (indivíduo)} = [Gene_1, Gene_2, \dots, Gene_n] = [x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]$$

Sujeito a: (39)

$$X_{min} \leq x_i \leq X_{max}; Y_{min} \leq y_i \leq Y_{max} \text{ para todo } i \text{ em } nGene$$

Para cada gene do cromossomo é atribuído de forma aleatória um par de coordenadas, conforme o espaço de busca da área de estudo. Após gerar cada indivíduo, o mesmo é adicionado à lista da população inicial. Assim, a população inicial (Equação 40) é uma lista de cromossomos, com tamanho igual ao tamanho da população.

$$\begin{aligned} \text{população} = & [[\text{cromossomo 1}], \\ & [\text{cromossomo 2}], \\ & [\text{cromossomo 3}], \\ & [\text{cromossomo } n]] \end{aligned} \quad (40)$$

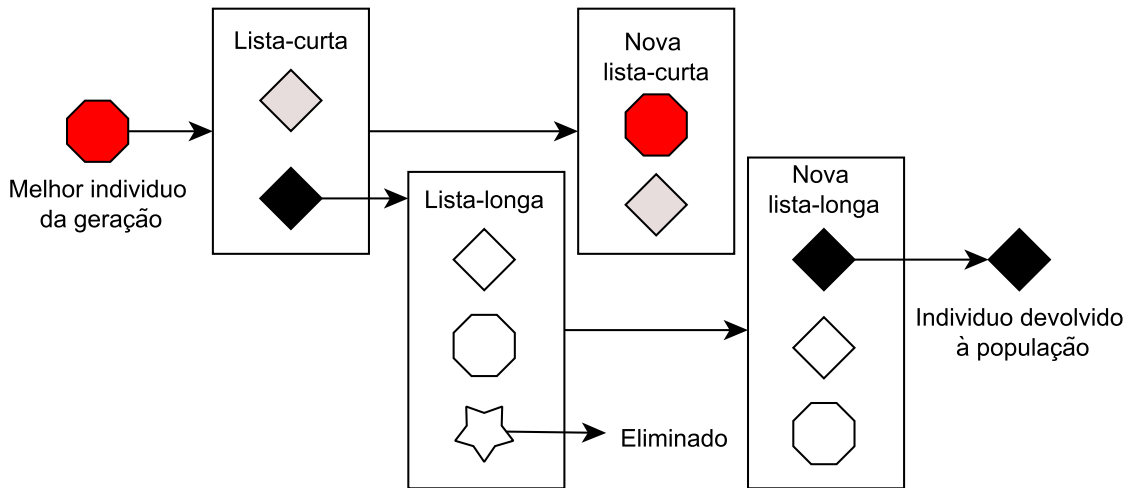
Caracterização geométrica A partir dos cromossomos presentes na população, caracteriza-se cada indivíduo de acordo com o detalhado na Seção 3.1.

Cálculo do custo O custo é calculado para cada indivíduo presente na população, conforme detalhado na Seção 3.2. Nesta etapa também verifica-se se o critério de parada foi atingido, em caso afirmativo o procedimento é parado e retorna-se a melhor solução.

Atualização das listas tabu Após o cálculo do custo, procede-se com a atualização das listas tabu (Figura 44). Faz-se a tentativa de adicionar o melhor indivíduo da geração corrente (aquele com menor custo) na lista-curta, verifica-se previamente se esta não está cheia ou se o melhor indivíduo já está na lista-longa. Se o melhor indivíduo da geração já estiver na lista-longa, nada é feito. Caso

a lista-curta estiver cheia, move-se o indivíduo mais antigo da lista-curta para lista-longa, além disso devolve-se o indivíduo na população. Por fim, adiciona-se o melhor indivíduo da população na lista curta.

Figura 44: Atualização das listas tabu



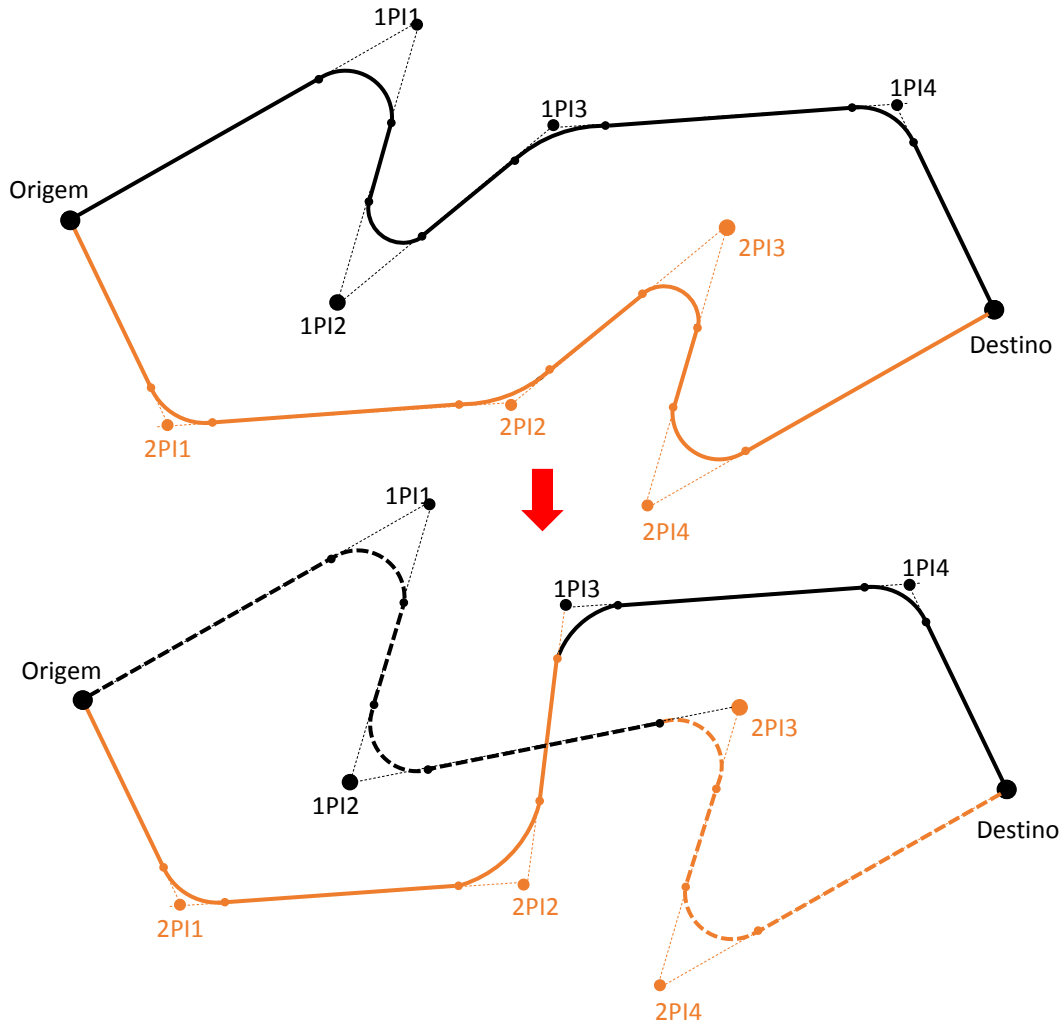
Aplicação dos operadores genéticos de reprodução Os operadores genéticos são as regras que permitem a manipulação dos cromossomos do indivíduo. A reprodução produz um novo indivíduo a partir das informações do cromossomo de dois indivíduos distintos. Para a seleção dos indivíduos pais da nova geração utilizou-se o método de torneio, em que são sorteados um número determinado de indivíduos da população, o melhor deles é selecionado. A quantidade de indivíduos selecionados em cada geração é definida pela taxa de reprodução. Foram implementados as reproduções simples, de dois pontos, média e heurística, conforme definido em Jha et al. (2006), todas possuem a mesma chance de acontecer:

- Na reprodução simples (Figura 45), apenas um ponto de corte no cromossomo é feito. Esse ponto é escolhido de forma aleatória. As Equações 41 representam os indivíduos pais. O ponto de corte está definido entre os pontos destacados e os não destacados. As Equações 42 apresentam os indivíduos filhos desse tipo de reprodução.

$$\begin{aligned} \text{pai 1} &= [1PI_1, 1PI_2, 1PI_3, 1PI_4] \\ \text{pai 2} &= [2PI_1, 2PI_2, 2PI_3, 2PI_4] \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \text{filho 1} &= [1PI_1, 1PI_2, 2PI_3, 2PI_4] \\ \text{filho 2} &= [2PI_1, 2PI_2, 1PI_3, 1PI_4] \end{aligned} \quad (42)$$

Figura 45: Reprodução simples

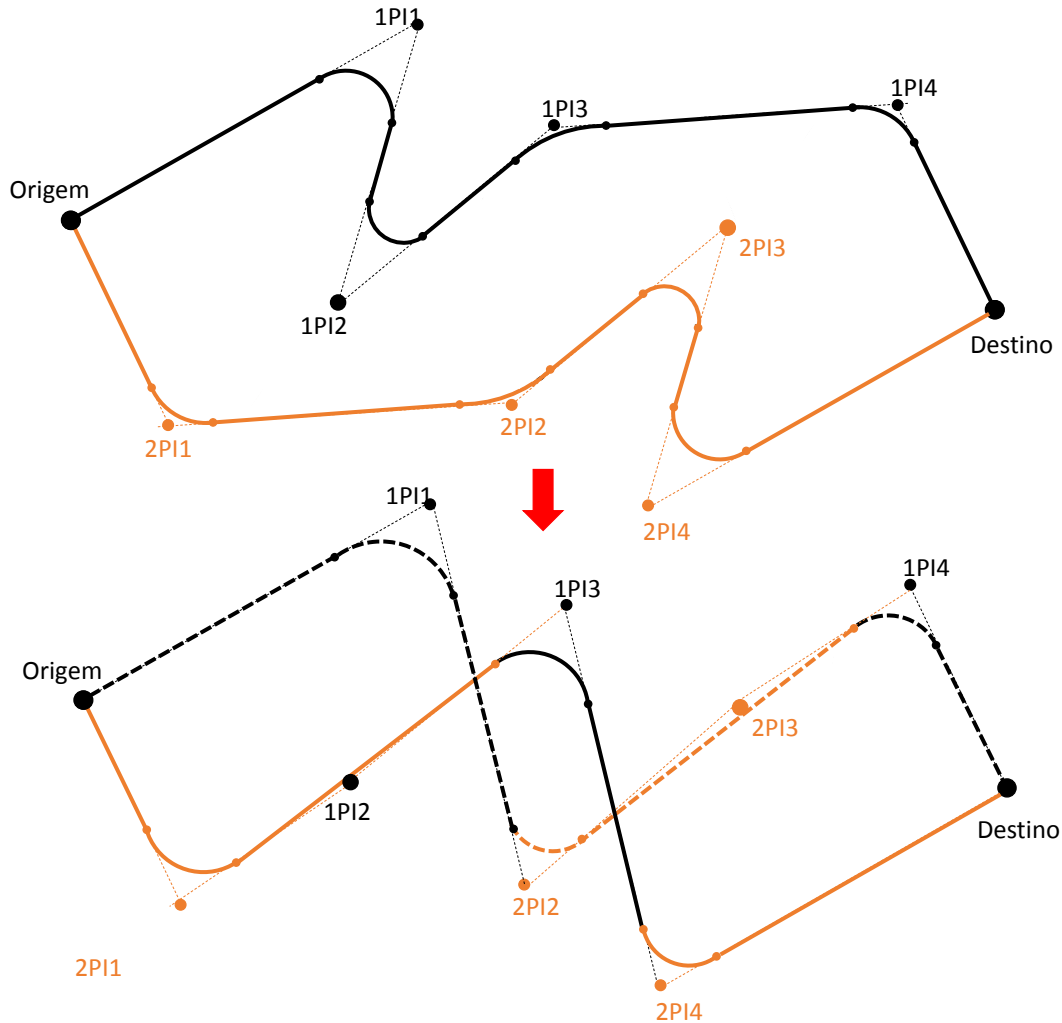


- Na reprodução dupla (Figura 46) há dois pontos de corte. As Equações 43 representam os indivíduos pais. Os pontos de corte estão definidos entre os pontos destacados e os não destacados. As Equações 44 apresentam os indivíduos filhos desse tipo de reprodução.

$$\begin{aligned} \text{pai 1} &= [1PI_1, \mathbf{1PI_2}, 1PI_3, 1PI_4] \\ \text{pai 2} &= [\mathbf{2PI_1}, 2PI_2, 2PI_3, \mathbf{2PI_4}] \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \text{filho 1} &= [1PI_1, 2PI_2, 2PI_3, 1PI_4] \\ \text{filho 2} &= [2PI_1, 1PI_2, 1PI_3, 2PI_4] \end{aligned} \quad (44)$$

Figura 46: Reprodução dupla

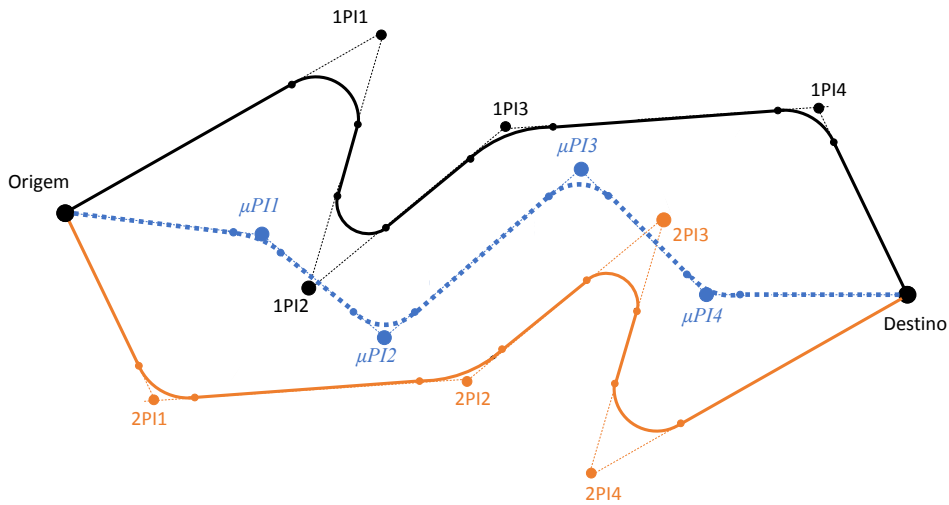


- A reprodução média (Figura 47) resulta em apenas um indivíduo, com os genes formados pela média dos dois indivíduos pais, conforme pode ser visto das Equações 45 a 46

$$\begin{aligned} \text{pai 1} &= [1PI_1, 1PI_2, 1PI_3, 1PI_4] \\ \text{pai 2} &= [2PI_1, 2PI_2, 2PI_3, 2PI_4] \end{aligned} \quad (45)$$

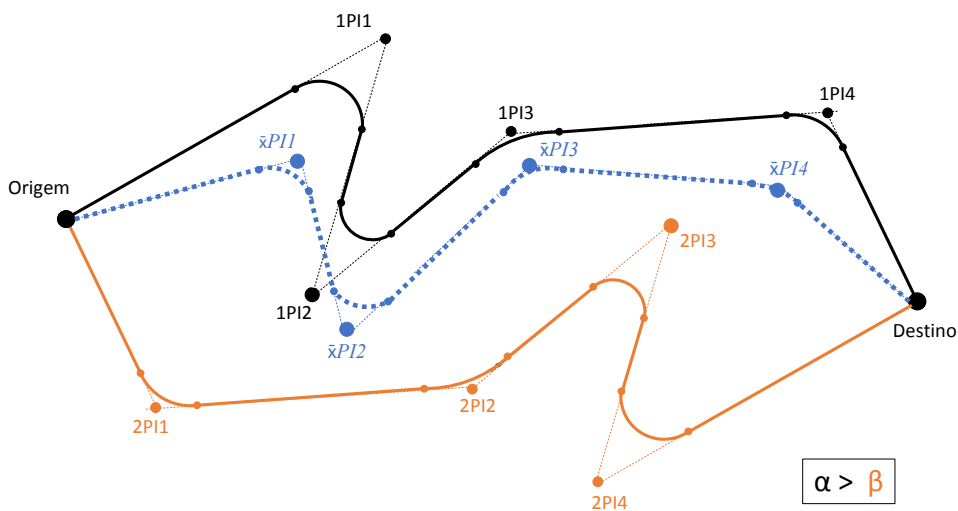
$$\text{filho} = \left[\frac{1PI_1 + 2PI_1}{2}, \frac{1PI_2 + 2PI_2}{2}, \frac{1PI_3 + 2PI_3}{2}, \frac{1PI_4 + 2PI_4}{2} \right] \quad (46)$$

Figura 47: Reprodução média



- A reprodução heurística (Figura 48) produz também apenas um indivíduo. Ela utiliza uma média ponderada entre os genes dos pais. Essa média leva em consideração o *fitness* de cada indivíduo pai. Na média ponderada o peso é maior para o indivíduo que possui melhor *fitness*, conforme as Equações 47 e 48.

Figura 48: Reprodução heurística

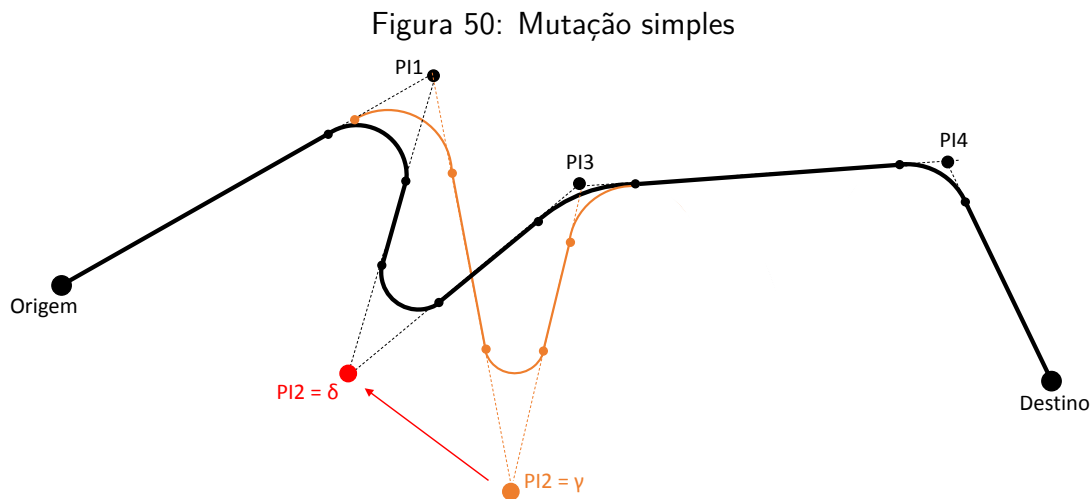


$$\begin{aligned}
 \text{pai 1} &= [1PI_1, 1PI_2, 1PI_3, 1PI_4], & \text{Fitness} &= \alpha \\
 \text{pai 2} &= [2PI_1, 2PI_2, 2PI_3, 2PI_4], & \text{Fitness} &= \beta
 \end{aligned}
 \tag{47}$$

de entrada), então o indivíduo é considerado semelhante. Um alto valor de critério de semelhança implica na facilidade de um indivíduo ser considerado semelhante a outro.

Aplicação dos operadores genéticos de mutação A mutação produz um novo cromossomo a partir da alteração direta no gene. Os cromossomos selecionados para mutação são selecionados randomicamente. A cada geração, percorre-se a lista dos indivíduos, para cada indivíduo sorteia-se um número, se esse número for menor que a taxa de mutação, o indivíduo sofre a mutação. Foram utilizadas a mutação simples e a eliminação de curva tal qual definido em Jha et al. (2006).

Na mutação simples, sorteia-se um gene para ser mutacionado (gene destacado na Equação 50). Após isso gera-se um novo valor para o gene.

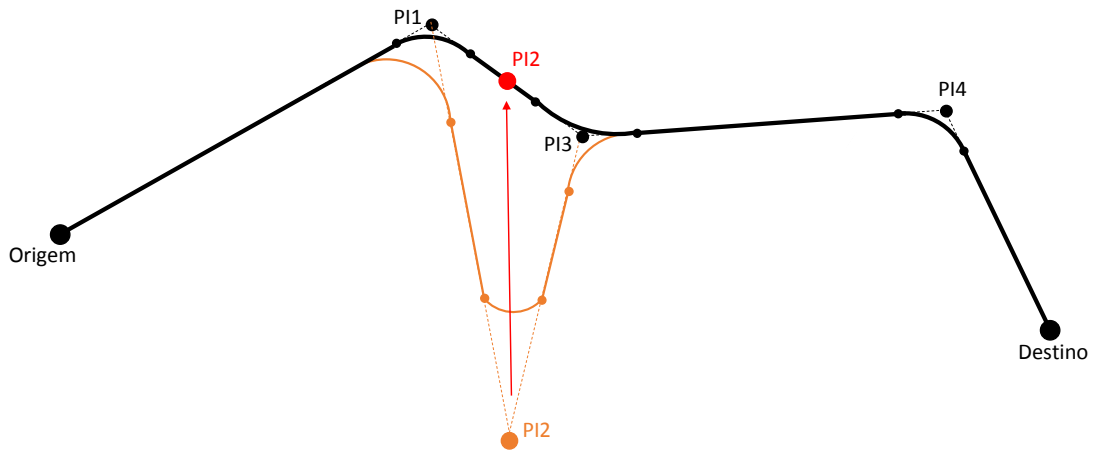


$$\begin{aligned} \text{pré-mutação} &= [PI_1, \mathbf{PI_2}, PI_3, PI_4], \quad PI_2 = \gamma \\ \text{pós-mutação} &= [PI_1, \mathbf{PI_2}, PI_3, PI_4], \quad PI_2 = \delta \end{aligned} \quad (50)$$

Assim como na mutação simples, na mutação com eliminação de curva, sorteia-se um gene para ser mutacionado. No entanto, o novo valor para o gene selecionado não é aleatório, este depende do valor dos genes adjacentes para que a curva seja eliminada. Ou seja, o novo gene deve fazer com o que o PI sorteado esteja em um ponto da tangente (ponto médio) entre os PIs adjacentes.

$$\begin{aligned} \text{pré-mutação} &= [PI_1, \mathbf{PI_2}, PI_3, PI_4] \\ \text{pós-mutação} &= [PI_1, \frac{PI_1 + PI_3}{2}, PI_3, PI_4] \end{aligned} \quad (51)$$

Figura 51: Mutação com elimina o de curva



3.3.2 Otimiza o local

O procedimento de otimiza o local inicia somente após o término da otimiza o global. Ele não   realizado para cada indivíduo da popula o, apenas no melhor indivíduo selecionado na otimiza o global.

A otimiza o local tem como objetivo atribuir os raios das curvas circulares no traçado horizontal. O procedimento utiliza apenas GA, onde os cromossomos que definem a popula o (Equa o 52) possuem informa o dos raios das curvas circulares horizontais.

$$\begin{aligned} \text{Cromossomo (indivíduo)} &= [\text{Genes}_{\text{raio}}] \\ &= [\text{raio}_1, \text{raio}_2, \dots, \text{raio}_n] \end{aligned} \quad (52)$$

A caracteriza o do traçado geométrico horizontal   similar ao apresentado na Se o 3.1.1, com exce o de que os raios das curvas são definidos pelos genes do cromossomo. Para as se o transversais e para o traçado geométrico vertical, o procedimento não muda, conforme definido nas se o 3.1.3 e 3.1.2. Com rela o ao cálculo dos custos, o procedimento   o mesmo definido na Se o 3.2. Para os operadores genéticos, foram utilizados os mesmos operadores de reprodu o (simples, dois pontos, média e heurística). Para muta o, utilizou-se apenas a muta o simples.

3.4 Implementa o

O processo de otimiza o (Se o 3.3), assim como o modelo de caracteriza o da geometria da rodovia (Se o 3.1) e de cálculo de custo (Se o 3.2) foram implementados em linguagem *Python*³. Além disso, esse trabalho cont m códigos dos seguintes softwares *open source*:

- *random*: para gerar números aleatórios;

³<https://www.python.org/>

- *math*: para operações matemáticas;
- *gdal*: para trabalhar com dados geográficos em formato raster;
- *fiona*: para leitura de dados geográficos em formato vetorial;
- *shapely*: para trabalhar com dados geográficos em formato vetorial;
- *pyproj*: para transformações de coordenadas entre projeções cartográficas;
- *concurrent.futures*: para aplicação de técnicas de *multithreading*;
- *numpy*: para realizar os cálculos matemáticos que envolvem listas, matrizes e ajuste polinomial; e
- *matplotlib*: para a apresentação dos resultado em imagens e mapas.

4 Aplicação em área de estudo

Este capítulo apresenta a aplicação do método em uma área de estudo. A área escolhida engloba as cidades de Guaramirim, Schroeder e Jaraguá do Sul, localizadas no norte do estado de Santa Catarina. O traçado analisado é um contorno rodoviário da BR-280.

4.1 Contextualização

A rodovia BR-280/SC interliga o Norte-Nordeste ao Extremo Norte de Santa Catarina, ela é responsável pelo escoamento das safras agrícolas e produtos industrializados, sobretudo, para o Porto de São Francisco do Sul. Segundo dados organizados pela Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina (FIESC), a região possui uma rica atividade econômica que congrega cerca de 33 mil estabelecimentos, os quais empregam 388,4 mil trabalhadores. Possui uma população de 1,2 milhão que, em 2018, contribuíram para uma corrente de comércio de US\$ 6,9 bilhões, cerca de 19,8% do PIB de Santa Catarina (SAPORITI, 2019).

As obras da adequação do trecho rodoviário entre São Francisco do Sul (km 0,70) e Jaraguá do Sul (km 74,58) foram divididas em três lotes. O trecho utilizado neste estudo se refere ao Lote 2.2 (Figura 52), que corresponde a 23,8 quilômetros (do km 50,7 ao km 74,6), entre Jaraguá do Sul e Guaramirim. O trecho é conhecido como Contorno Norte de Jaraguá do Sul (BEMQUERER, 2017).

Figura 52: Localização do Lote 2.2



Fonte: NSC (2017)⁴

⁴<https://www.nsctotal.com.br/noticias/apos-nove-anos-do-anuncio-duplicacao-da-br-280-entre-sao-francisco-e-jaragua-continua-em> - Acesso em: 20/10/2019

4.2 Dados de entrada

Os dados de entrada utilizados são apresentados separadamente em camadas geográficas, características técnicas de projeto da nova rodovia, custos e dados necessários para aplicação do algoritmo de otimização.

4.2.1 Camadas geográficas

A Tabela 5 apresenta a lista de camadas geográficas utilizadas e suas fontes.

Tabela 5: Camadas geográficas

Camada	Tipo	Fonte
Relevo	<i>raster</i>	Embrapa ⁵
Área urbana	vetor	IBGE ⁶
Vias	vetor	OSM ⁷
Rios	vetor	OSM
Socioambientais	vetor	OSM
Ambientais proibidas	vetor	MMA ⁸ , Funai ⁹ , INCRA ¹⁰ , Iphan ¹¹ , ICMBio ¹²

Os dados de relevo foram obtidos do projeto Brasil em Relevo, coordenado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A camada *raster* foi gerada a partir de dados de radar do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

A camada de área urbana foi obtida da Malha de Setores Censitários utilizada no Censo Demográfico de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

As camadas Vias, Rios e Sociambientais foram obtidas do *Open Street Map* (OSM). O OSM é um banco de dados geográficos aberto, desenvolvido e atualizado por uma comunidade voluntária.

Especificamente para a camada Vias, os dados foram filtrados dos classificados como *highway*¹³ e agrupados em três categorias:

- Primárias: Rodovias de maior importância, definidas no OSM com as *tags motorway, trunk* e *primary*.
- Secundárias: Vias importantes que ligam cidades, no entanto com bastante uso local. Servem como eixo de ligação entre vias primárias, são definidas no OSM com a *tag secondary*.

⁵<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/>

⁶<ftp://geoftp.ibge.gov.br>

⁷<https://www.openstreetmap.org/>

⁸<http://mapas.mma.gov.br>

⁹<http://www.funai.gov.br>

¹⁰<http://certificacao.incra.gov.br>

¹¹<http://portal.iphan.gov.br>

¹²<http://www.icmbio.gov.br>

¹³<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Pt:Key:highway>

- Terciárias: Vias que fazem a ligação entre bairros, definidas no OSM com a *tag tertiary*.
- Residenciais: Vias locais, de fluxo baixo, dentro de área residencial, que servem de acesso às residências. São definidas no OSM com a *tag residential*.

Os dados da camada Rios foram filtrados do OSM dos classificados como *waterway*¹⁴. *Waterway* é utilizado para marcar rios, riachos, lagoas e outros tipos de cursos de água.

A camada de dados Socioambientais é a junção de várias áreas de interesse social e equipamentos públicos. Foram filtrados do OSM feições que definem hospitais, prédios históricos, cemitérios, centros comunitários, escolas, áreas industriais, áreas recreativas, plantações, parques e museus.

Por fim, a camada de dados Ambientais de caráter proibitivo contém dados de áreas quilombolas, cavernas, assentamentos rurais, áreas indígenas, sítios arqueológicos, unidades de conservação federais, estaduais e municipais. Todos esses dados são obtidos dos órgãos governamentais que fazem a gestão dessas áreas, referenciados na Tabela 5.

As camadas são encontradas no Anexo C.

4.2.2 Características técnicas de projeto

As características técnicas de projeto foram retiradas da Tabela 18 do Anexo A, organizada por Lee (2017) e que possui como fonte primária de dados do DNER (1999). Adotou-se para este estudo de caso uma rodovia de classe *I* em terreno do tipo ondulado. Os dados utilizados se encontram na Tabela 6.

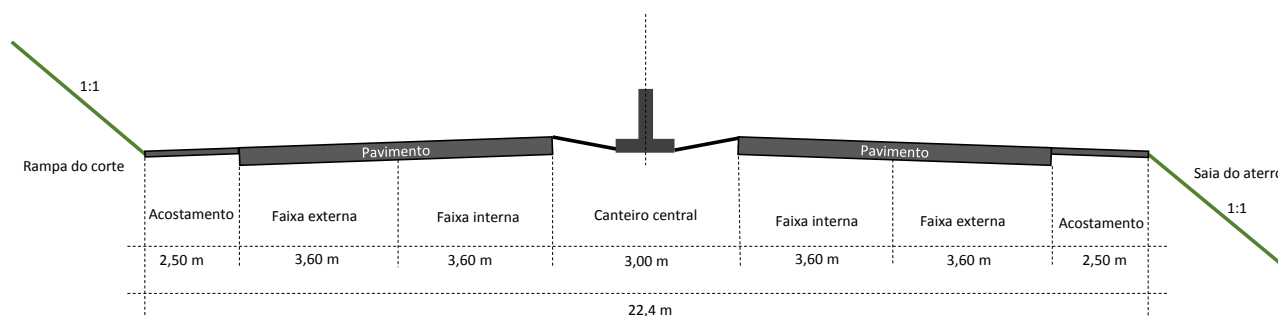
Tabela 6: Características técnicas adotadas

Classe da rodovia	<i>I</i>	
Tipo de terreno	Ondulado	
Velocidade diretriz	80	<i>km/h</i>
Raio mínimo	210	<i>m</i>
Largura plataforma de terraplenagem	22,4	<i>m</i>
Rampa máxima	4,5	%
Inclinação do talude transversal	1 : 1	
Distância de visibilidade de parada	110	<i>m</i>

Com relação à largura da plataforma de terraplenagem, ela totaliza 22,4 m. Foram adotadas quatro faixas de trânsito de 3,60 m, dois acostamentos de 2,50 m e canteiro central de 3 m. A Figura 53 apresenta a seção-tipo da rodovia.

¹⁴<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Pt:Key:waterway>

Figura 53: Seção-tipo da rodovia



4.2.3 Custos

A Tabela 7 contém os custos unitários utilizados no estudo de caso.

Tabela 7: Dados de entrada de custos

Terraplenagem - Corte	8,19	R\$/m ³
Terraplenagem - Aterro	2,71	R\$/m ³
Terraplenagem - Empréstimo	6,70	R\$/m ³
Terraplenagem - Bota fora	1,78	R\$/m ³
OAE - Túnel	166.355,00	R\$/m
OAE - Ponte	47.450,00	R\$/m
Pavimentação	3.159,00	R\$/m
Desapropriação - Área urbana	1000,00	R\$/m ²
Desapropriação - Área socioambiental	3000,00	R\$/m ²
Intersecção - Via primária	949.000,00	R\$
Intersecção - Via secundária	474.500,00	R\$
Intersecção - Via terciária	237.250,00	R\$
Intersecção - Via residencial	118.625,00	R\$
Intersecção - Rios	949.000,00	R\$

Os custos de terraplenagem (corte, aterro, empréstimo e bota fora) e de OAE (túnel e ponte) foram obtidos do relatório de custo de capital do estudo para o Trem de Alta Velocidade (TAV Brasil, 2009).

Na terraplenagem, estão incluídos os equipamentos e mão-de-obra requeridos para realizar as tarefas. Foi utilizada uma proporção para os materiais de 1º, 2º e 3º categorias em 25%, 65% e 10% respectivamente, além de Distância Média de Transporte (DMT) de 50 a 200 m (TAV Brasil, 2009).

Com relação ao custo unitário de túnel, foi adotada a técnica NATM (do inglês, New Austrian Tunneling Method). O NATM consiste na escavação sequencial do maciço, com a utilização de concreto projetado como suporte, associado a outros elementos como cambotas metálicas, chumbadores e fibras no concreto, em função da capacidade autoportante do maciço. No valor de custo

foram considerados a escavação e revestimento em solo com diâmetro de 16 metros de seção transversal. Também foram considerados drenos, ventilação forçada, cambotas, enfilagens, transporte de material cortado a 23km de distância e adicional para emboque, poços de ventilação e saídas de emergências (TAV Brasil, 2009).

Para pontes, o estudo adota 14,55 metros para a largura da seção transversal de tabuleiro. Foram considerados no custo unitário a terraplenagem necessária para a execução da ponte, estrutura de concreto, drenos, estacas, sapatas, lajes suspensas, muros, pilares e apoios, vigas e revestimento; elementos auxiliares de/para as estruturas de concreto: fôrmas, reforços (fundações, lajes, muros, pilares e vigas), juntas projetadas, acabamentos de superfície e revestimentos. O estudo utilizou planilhas de preços de 22 pontes e preços unitários do SICRO (TAV Brasil, 2009).

Apesar desses custos unitários terem sido retirados de um estudo de viabilidade ferroviária, a maioria dos valores foram baseados nos valores do SICRO, que fornece custos referenciais de obras rodoviárias. O relatório de custos do TAV afirma ainda que, os custos de obras rodoviárias de terraplenagem são semelhantes aos de obras ferroviárias por serem obras lineares (TAV Brasil, 2009).

O custo de pavimentação foi o obtido do relatório de Custo Médio Gerencial (DNIT, 2018a) que estabelece custos estimativos, para uso em nível de planejamento, de empreendimentos em infraestrutura de transportes.

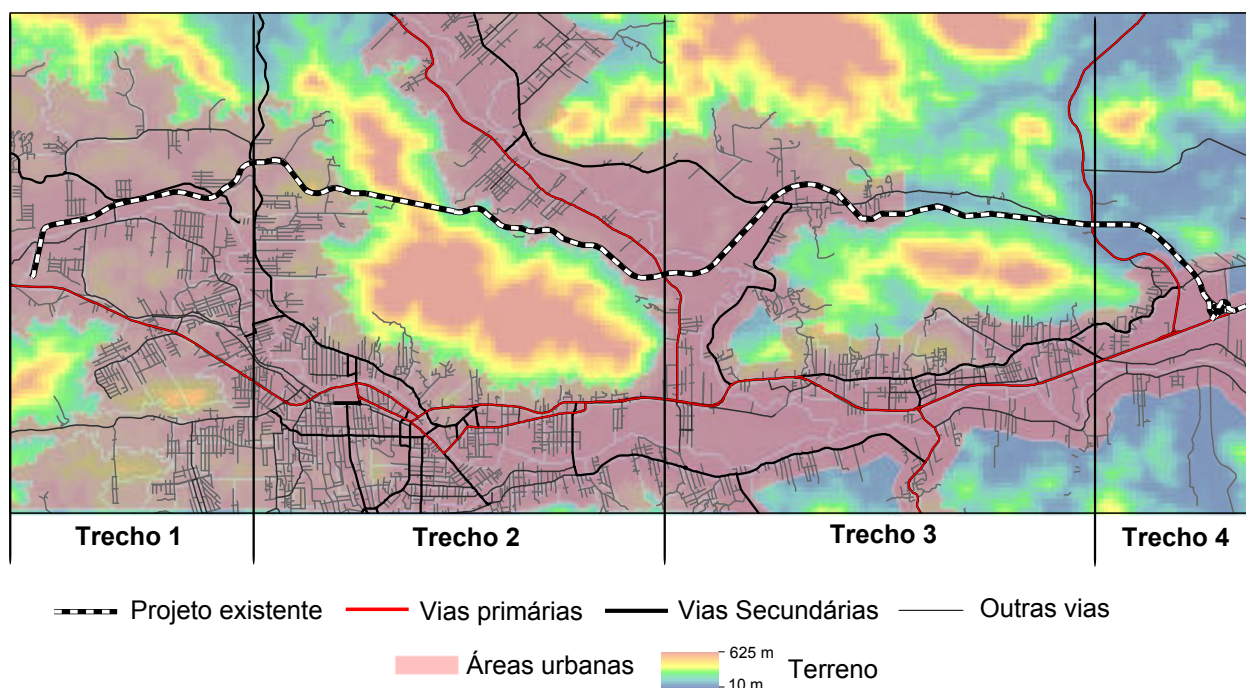
Para o custo de desapropriação em área urbana, fez-se uma pesquisa em sites de venda de imóveis da região urbana de Jaraguá do Sul. Após a coleta da amostra, adotou-se um valor médio aproximado para o m^2 invadido pela faixa de domínio da rodovia.

Para as intersecções com via primária, adotou-se o custo de um viaduto (considerado o mesmo custo unitário da ponte), com 20 metros de comprimento. O mesmo valor foi utilizado para intersecção com rios. Esse valor é diminuído pela metade conforme a hierarquia da via cruzada, busca-se com isso simular possíveis realocações dessas vias.

4.2.4 Algoritmo de otimização

Para a aplicação dividiu-se a área em quatro trechos, apresentados na Figura 54. Buscou-se dessa forma simular a escolha de pontos intermediários específicos para o cruzamento com vias estruturais da região. Além de permitir avaliar o comportamento do modelo implementado em trechos com características distintas de relevo e localização de áreas de alto custo. O procedimento também foi aplicado para o trecho completo, sem a delimitação de pontos intermediários.

Figura 54: Trechos de estudo



A Tabela 8 apresenta os dados necessários para o algoritmo de otimização e os valores utilizados para a aplicação do estudo de caso.

Tabela 8: Dados de entrada para o algoritmo de otimização

	Trecho I	Trecho II	Trecho III	Trecho IV	Completo
Número máximo de PIs	5	8	9	3	20
População	30	40	40	30	60
Taxa de reprodução	20%	20%	20%	20%	20%
Taxa de mutação	10%	10%	10%	10%	10%
Tamanho lista menor	5	5	5	5	5
Tamanho lista maior	10	10	10	10	10
Distância tabu	200 m	200 m	200 m	200 m	200 m

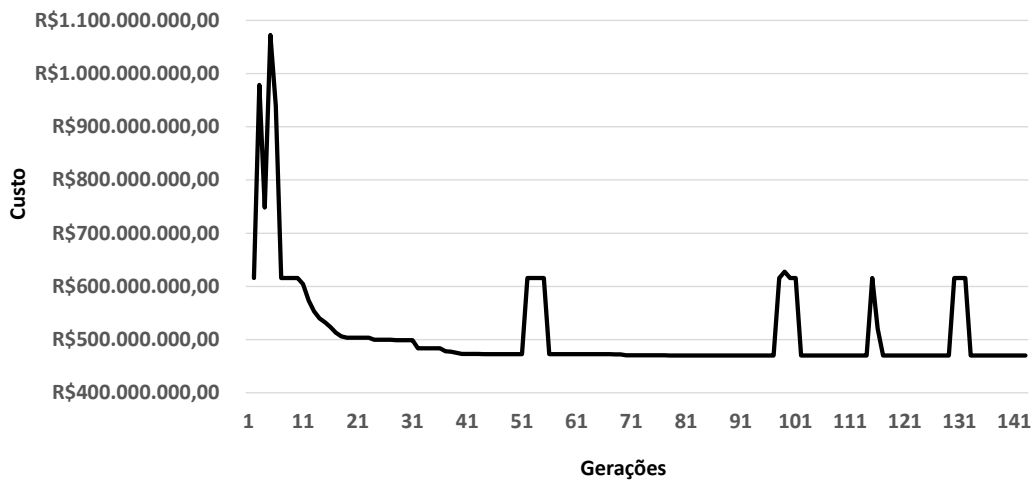
4.3 Resultados

Aplicou-se o procedimento para cada trecho definido na Tabela 8. Os resultados são apresentados separadamente para cada trecho e para o trecho completo.

4.3.1 Trecho I

A Figura 55, apresenta o gráfico de aptidão (*Fitness*) dos traçados encontrados durante o procedimento para o Trecho I.

Figura 55: Trecho I - *Fitness*



Houve uma significativa redução no custo até a geração 32, a partir da geração 80 não houve mudança. As elevações repentinas no custo em algumas gerações se referem à aplicação da Lista Tabu menor, que faz com que o procedimento procure outras soluções no espaço de busca. Essas elevações são frequentes também nos outros trechos.

A Figura 56 apresenta o traçado horizontal de menor custo encontrado para o Trecho I, enquanto que a Figura 57 apresenta o greide e o perfil do terreno.

Figura 56: Trecho I - Horizontal

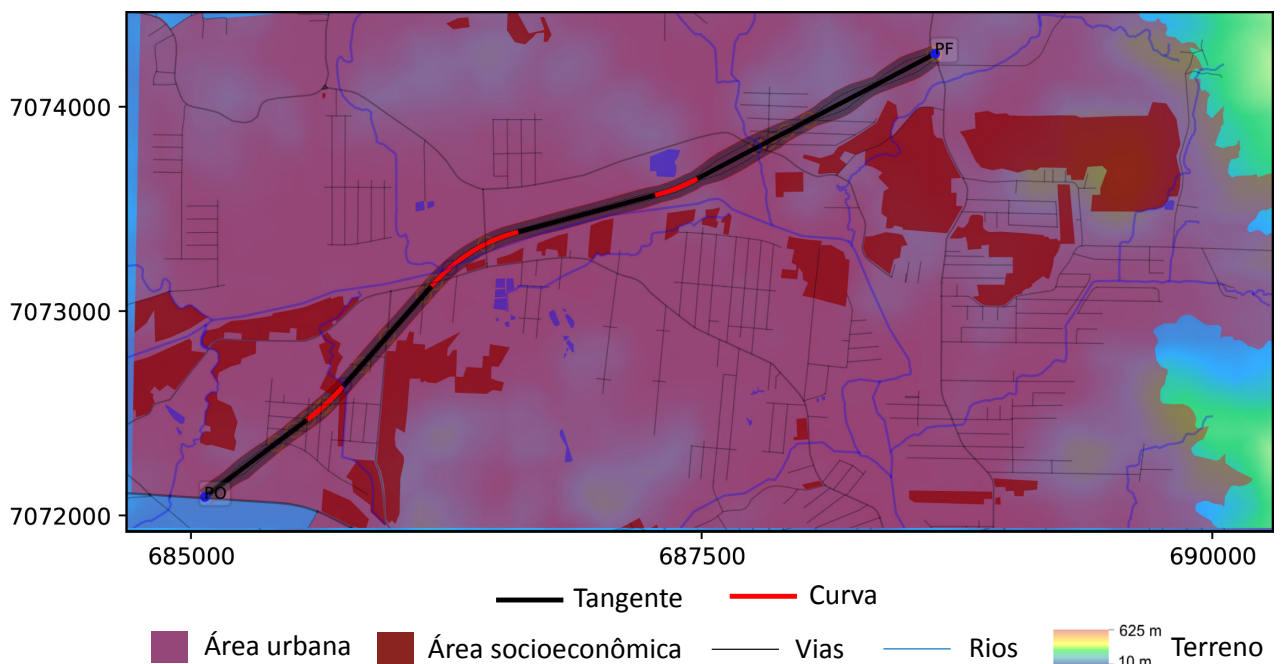
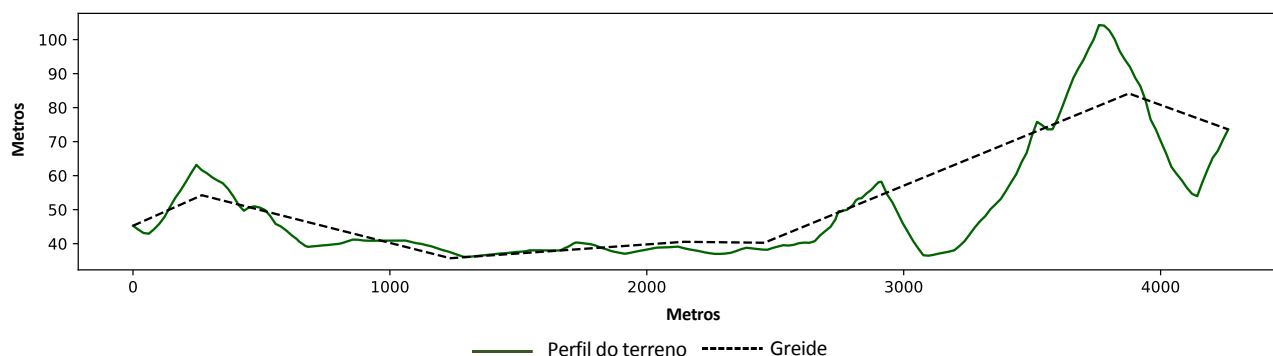


Figura 57: Trecho I - Greide e perfil do terreno



Conforme o resultado encontrado, não houve necessidade de construção de OAE. O traçado final do Trecho I possui 4,26 km e três curvas com raios de 1086 m, 840 m e 900 m respectivamente. Por ser uma área plana e completamente dentro da área urbana, é possível notar que o procedimento buscou o menor caminho desviando de áreas socioeconômicas de maior custo.

A Tabela 9 apresenta os custos resultantes do Trecho I.

Tabela 9: Trecho I - Custos

		Custo	%
Trecho I - Total	4,26 km	R\$ 470.131.783	100%
Terraplenagem - Corte	257.273 m ³	R\$ 2.107.062	0%
Terraplenagem - Aterro	1.345.331 m ³	R\$ 3.645.847	1%
Terraplenagem - Empréstimo	1.088.058 m ³	R\$ 7.289.991	2%
Terraplenagem - Bota fora	—	—	0%
OAE - Túnel	—	—	0%
OAE - Ponte	—	—	0%
Pavimentação	4,26 km	R\$ 13.467.478	3%
Desapropriação - Área urbana	408.584 m ²	R\$ 408.584.026	87%
Desapropriação - Área socioambiental	5.433 m ²	R\$ 16.300.479	3%
Intersecções com vias	—	R\$ 2.847.000	1%
Intersecções com rios	—	R\$ 2.847.000	1%

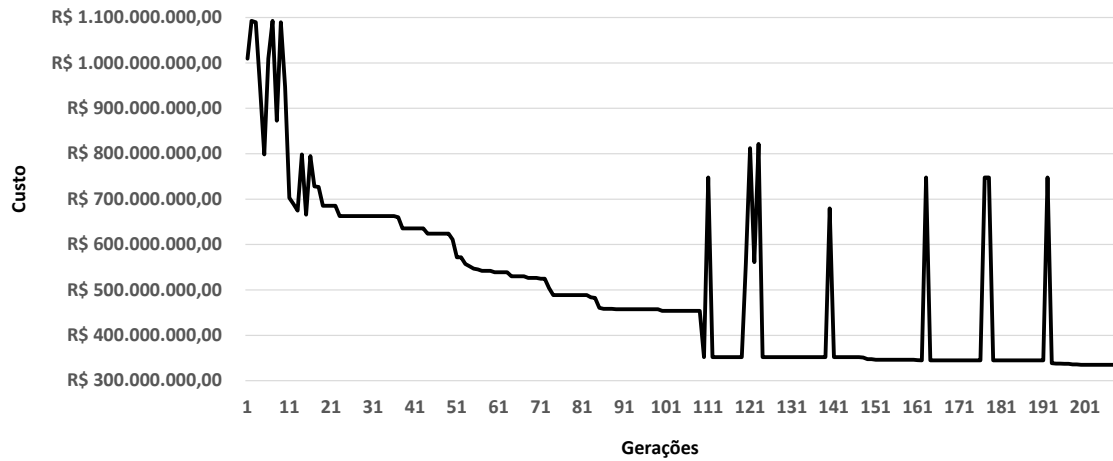
O custo final do traçado encontrado para o Trecho I é de pouco mais de R\$ 470 milhões. Conforme mencionado, o Trecho I fica completamente em área urbana, isso fez com que o custo de desapropriação por invadir a área urbana correspondesse a 87% do custo total. Se desconsiderado o custo de desapropriação, o total aproxima-se a R\$ 45,2 milhões. Nesse caso a terraplenagem corresponde a 28,7% e a pavimentação a 29,6%, do custo total.

4.3.2 Trecho II

A Figura 58, apresenta o gráfico de aptidão dos traçados encontrados durante o procedimento para o Trecho II. Houve expressiva melhora no custo até a geração 110 e melhoras marginais a partir

dessa geração.

Figura 58: Trecho II - *Fitness*



A Figura 59 apresenta o traçado horizontal enquanto que a Figura 60 apresenta o greide e o perfil do terreno do traçado de menor custo encontrado para o Trecho II.

Figura 59: Trecho II - Horizontal

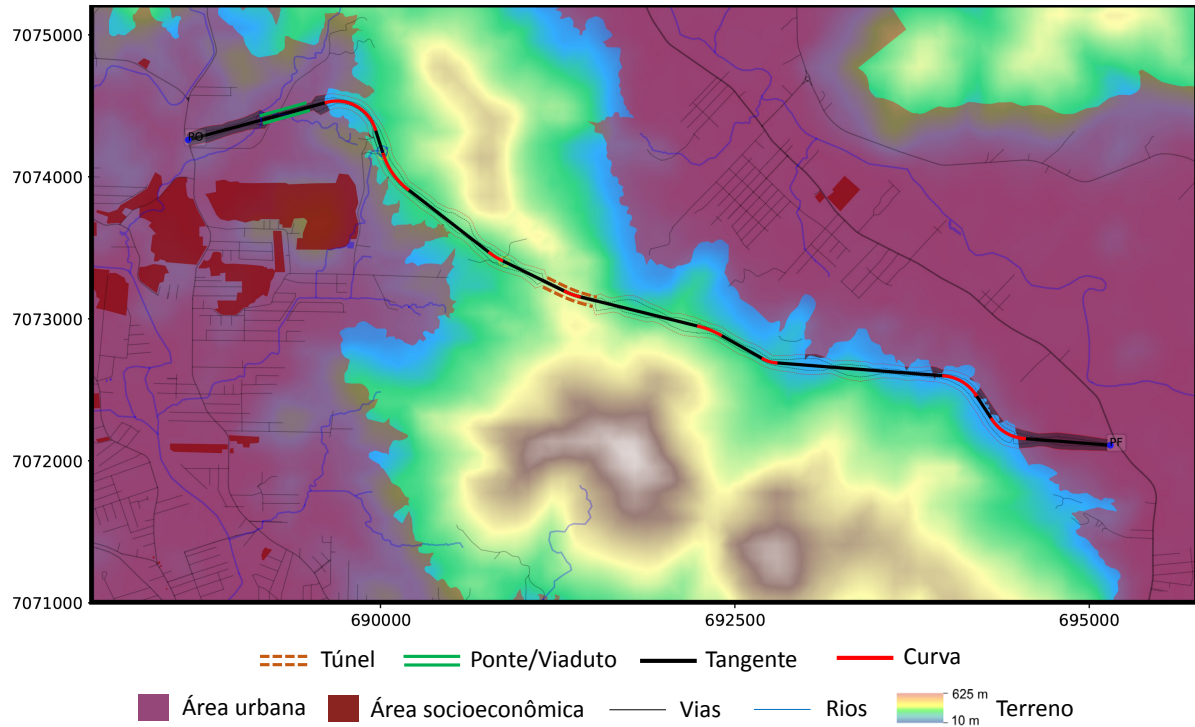
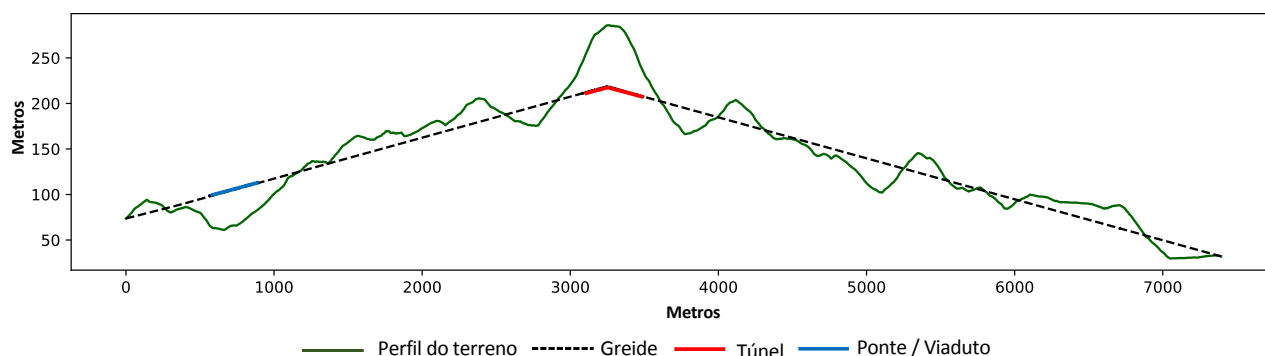


Figura 60: Trecho II - Greide e perfil do terreno



O traçado encontrado do Trecho II possui 7,4 km e oito curvas com raios de 285 m, 505 m, 481 m, 488 m, 617 m, 218 m, 298 m e 301 m respectivamente. Houve necessidade de construção de um túnel de 405 m e uma ponte de 323 m de extensão, indicados das Figuras 59 e 60.

O Tabela 10 apresenta os custos do Trecho II, com custo total próximo a R\$ 325 milhões.

Tabela 10: Trecho II - Custos

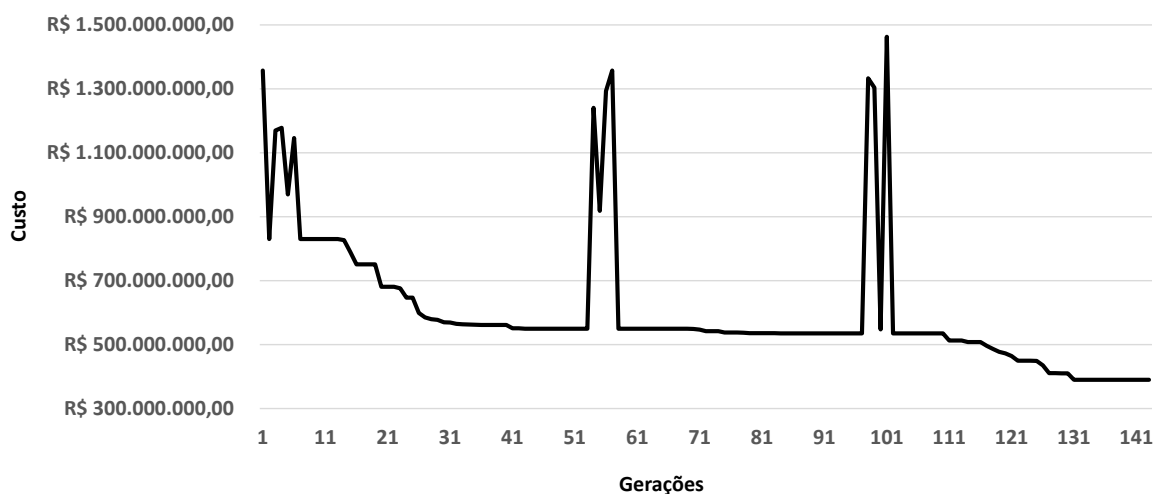
		Custo	%
Trecho II - Total	7,4 km	R\$ 324.943.385	100%
Terraplenagem - Corte	4.062.287 m ³	R\$ 33.270.133	10%
Terraplenagem - Aterro	2.878.828 m ³	R\$ 7.801.623	2%
Terraplenagem - Empréstimo	—	—	0%
Terraplenagem - Bota fora	1.183.460 m ³	R\$ 2.106.558	1%
OAE - Túnel	405 m	R\$ 67.435.758	21%
OAE - Ponte	323 m	R\$ 15.310.687	5%
Pavimentação	7,4 km	R\$ 23.358.696	7%
Desapropriação - Área urbana	172.457 m ²	R\$ 172.457.054	53%
Desapropriação - Área socioambiental	—	—	0%
Intersecções com vias	—	R\$ 355.875	0%
Intersecções com rios	—	R\$ 2.847.000	1%

Se comparado o Trecho II com o Trecho I, a participação do custo de terraplenagem é mais significativa devido ao terreno mais ondulado. O custo do túnel também se mostra relevante. Se desconsiderado o custo de desapropriação, o custo total se aproximaria a R\$ 152,4 milhões, com o custo do túnel correspondendo à 44% do total.

4.3.3 Trecho III

O gráfico de aptidão dos traçados encontrados para o Trecho III é apresentado na Figura 61.

Figura 61: Trecho III - *Fitness*



Houve melhora significativa no custo até a geração 51, a partir desta houve estabilidade, provavelmente com o traçado estacionado em um mínimo local da área de busca. A partir da geração 100 houve aplicação das listas tabu. Com o aumento da variabilidade na população, o procedimento conseguiu sair do mínimo local. Somente na geração 131 o custo se estabilizou.

A Figura 62 apresenta o traçado horizontal e a Figura 63 o greide da solução de menor custo encontrada para o Trecho III.

Figura 62: Trecho III - Horizontal

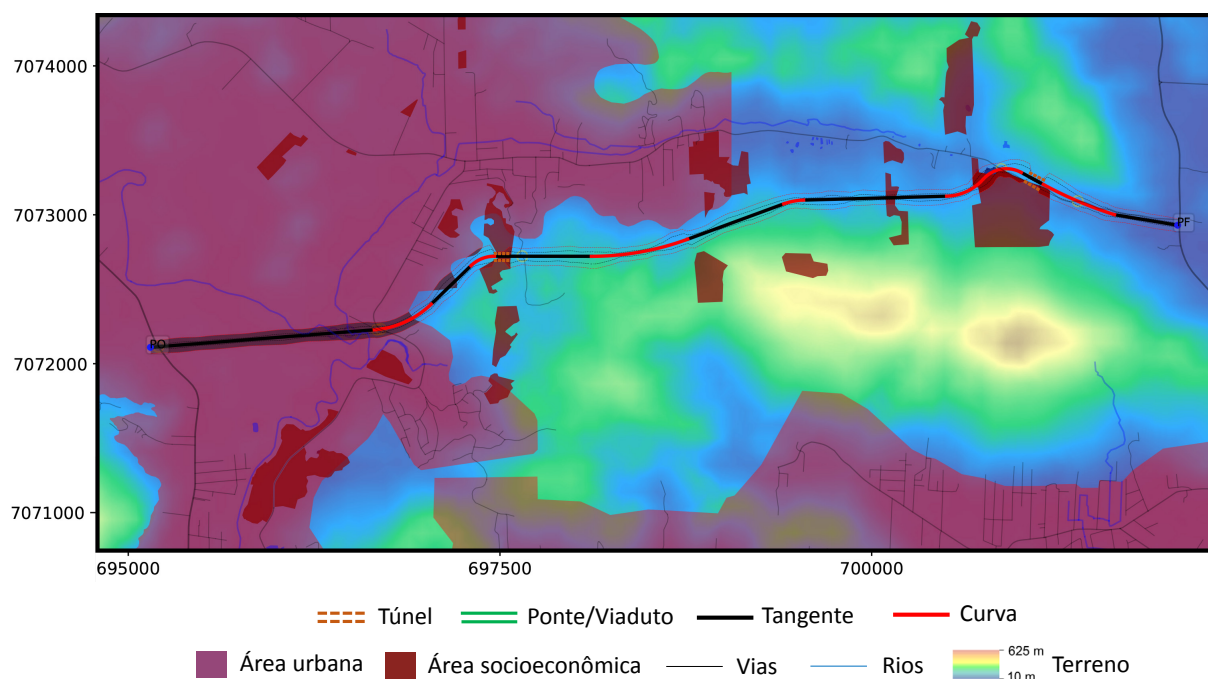
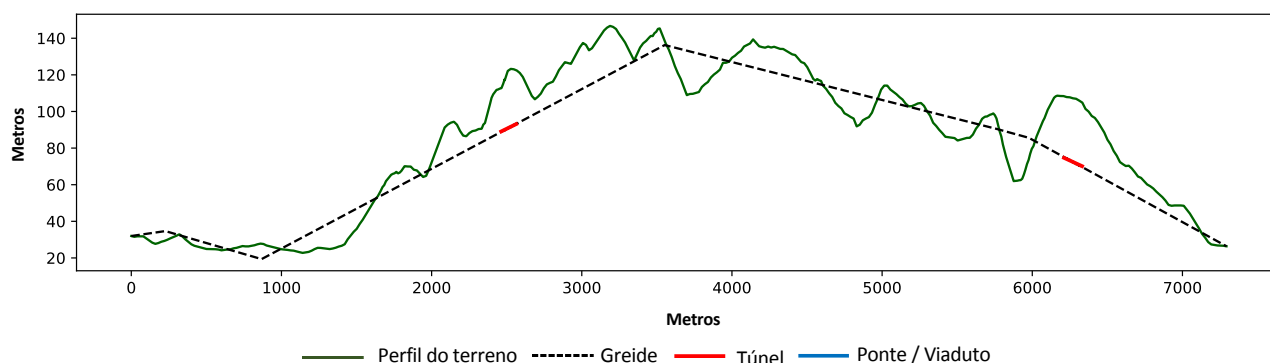


Figura 63: Trecho III - Greide e perfil do terreno



O Trecho III apresenta relevo ondulado e 19 áreas socioeconômicas de alto custo distribuídas na área de busca, além da área urbana de Schroeder. O traçado resultante possui 7,3 km e sete curvas com raios de 592 m, 355 m, 233 m, 700 m, 212 m, 255 m e 2170 m respectivamente. O resultado apresenta dois túneis que totalizam 164 m, acrescentados devido ao critério automático de uso de túneis quando a diferença da cota do greide e do perfil do terreno for maior que 30 m. Por conta da extensão seria recomendável uma avaliação da real necessidade de execução desses túneis.

A Tabela 10 apresenta os custos do Trecho III.

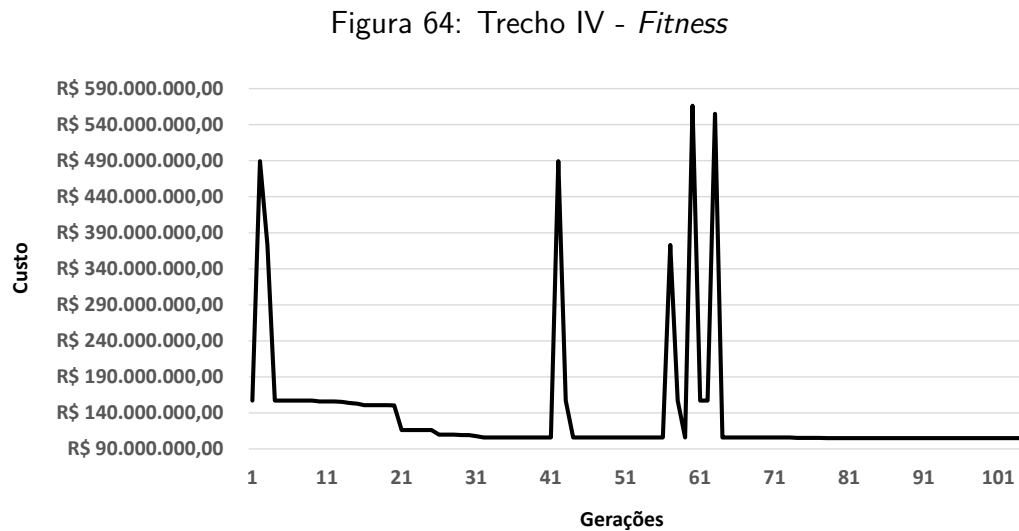
Tabela 11: Trecho III - Custos

		Custo	%
Trecho III - Total	7,3 km	R\$ 385.977.298	100%
Terraplenagem - Corte	2.242.538 m ³	R\$ 18.366.384	5%
Terraplenagem - Aterro	1.714.896 m ³	R\$ 4.647.367	1%
Terraplenagem - Empréstimo	—	—	0%
Terraplenagem - Bota fora	560.364 m ³	R\$ 997.448	0%
OAE - Túnel	164 m	R\$ 27.217.056	7%
OAE - Ponte	—	—	0%
Pavimentação	7,3 km	R\$ 23.040.192	6%
Desapropriação - Área urbana	184.275 m ²	R\$ 184.274.638	48%
Desapropriação - Área socioambiental	40.975 m ²	R\$ 122.926.463	32%
Intersecções com vias	—	R\$ 2.609.750	1%
Intersecções com rios	—	R\$ 1.898.000	0%

O custo total do Trecho III é de aproximadamente R\$ 386 milhões. Se comparado com os outros trechos já apresentados, a maior diferença é a representatividade da desapropriação de áreas socioambientais, que é aproximadamente um terço do custo total do traçado resultante. Eliminando-se o valor das desapropriações, o Trecho III custaria R\$ 78,7 milhões.

4.3.4 Trecho IV

A Figura 64 apresenta o gráfico de aptidão dos traçados encontrados durante o procedimento para o Trecho IV.



Por conta da menor área de busca, em comparação com os outros trechos, além do relevo plano, a convergência ocorreu próximo à geração 30. Ainda houve pequenas melhoras até a geração 80, com estabilidade a partir desta.

A Figura 65 apresenta o traçado horizontal de menor custo encontrado para o Trecho IV. A Figura 66 apresenta o greide e o perfil do terreno.

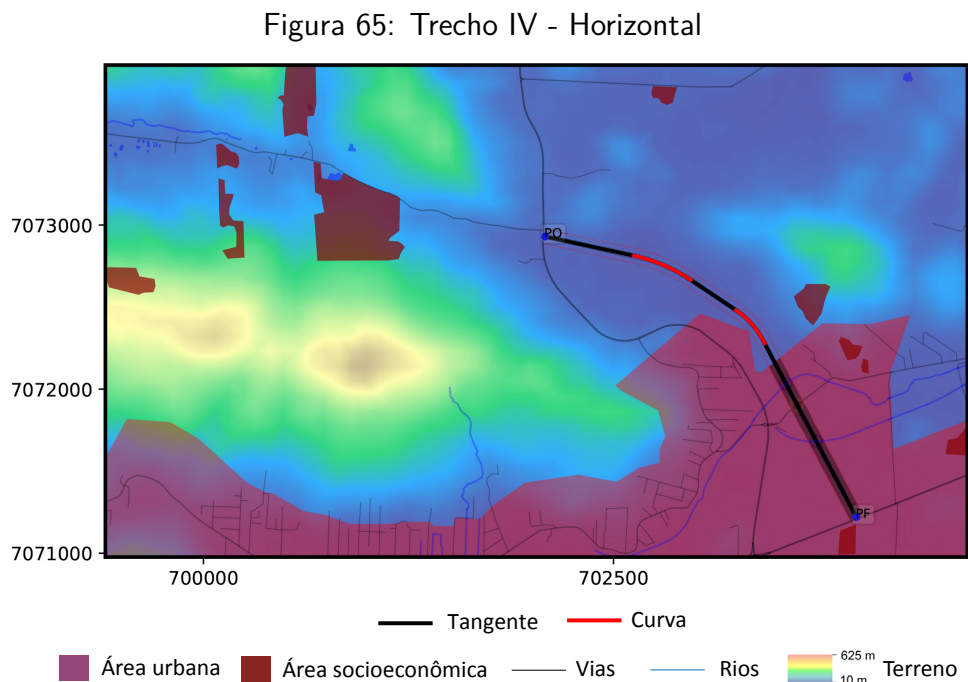
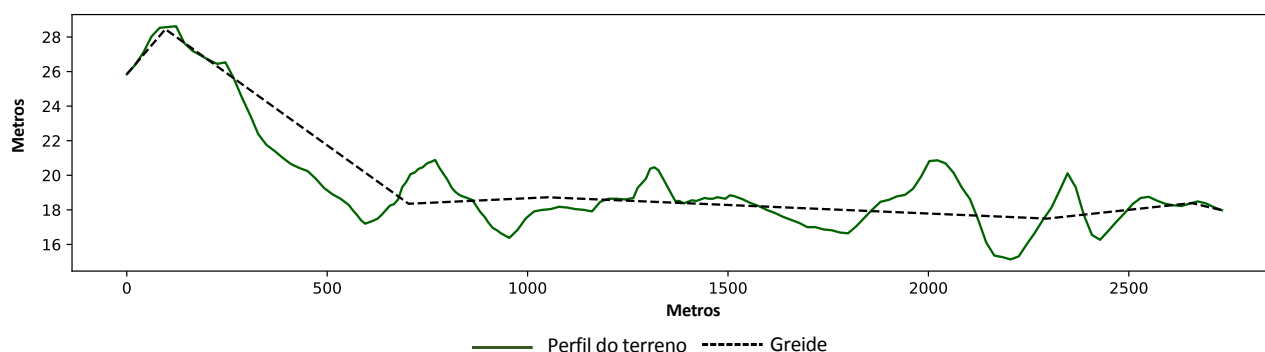


Figura 66: Trecho IV - Greide e perfil do terreno



O traçado resultante possui 2,7 km, com duas curvas de 1.010 m e 505 m. A Tabela 12 apresenta os custos do Trecho IV.

Tabela 12: Trecho IV - Custos

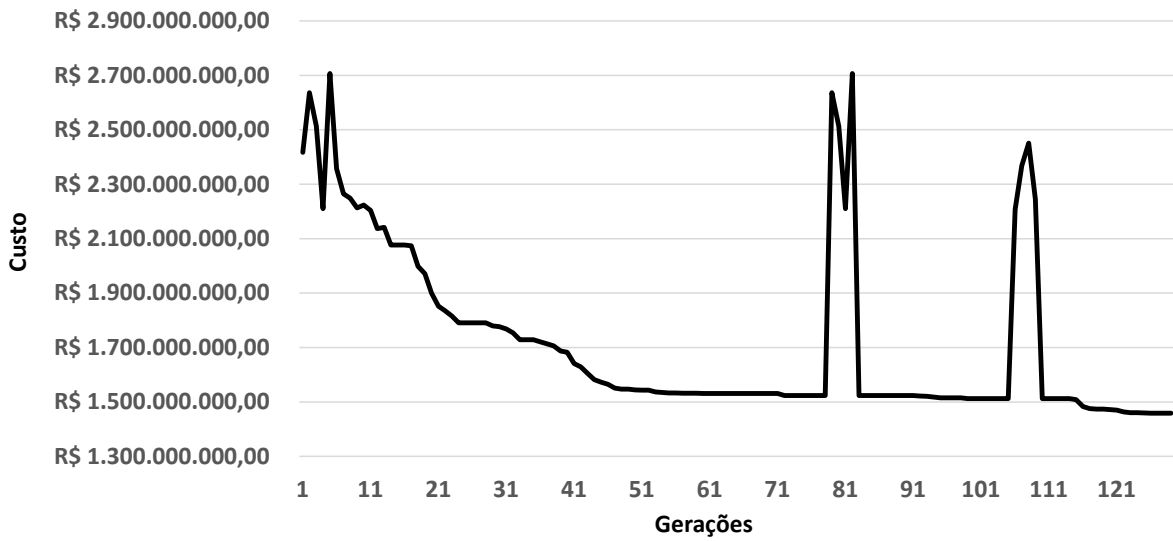
		Custo	%
Trecho IV - Total	2,7 km	R\$ 106.838.576	100%
Terraplenagem - Corte	22.658 m ³	R\$ 185.568	0%
Terraplenagem - Aterro	401.554 m ³	R\$ 1.088.212	1%
Terraplenagem - Empréstimo	378.896 m ³	R\$ 2.538.606	2%
Terraplenagem - Bota fora	—	—	0%
OAE - Túnel	—	—	0%
OAE - Ponte	—	—	0%
Pavimentação	2,7 km	R\$ 8.632.490	8%
Desapropriação - Área urbana	92.258 m ²	R\$ 92.258.450	86%
Desapropriação - Área socioambiental	—	—	0%
Intersecções com vias	—	R\$ 237.250	0%
Intersecções com rios	—	R\$ 1.898.000	2%

O custo total do Trecho IV é de quase R\$ 107 milhões. O maior custo foi de desapropriação, que corresponde a 86%.

4.3.5 Trecho Completo

A Figura 67, apresenta o gráfico de aptidão para o Trecho Completo.

Figura 67: Trecho completo - *Fitness*



Houve melhora significativa no custo até a geração 50, com melhoras marginais até a geração 125, onde ocorreu a estabilização do custo. A Figura 68 apresenta o traçado horizontal encontrado, enquanto que a Figura 69 apresenta o greide e o perfil do terreno.

Figura 68: Trecho completo - Horizontal

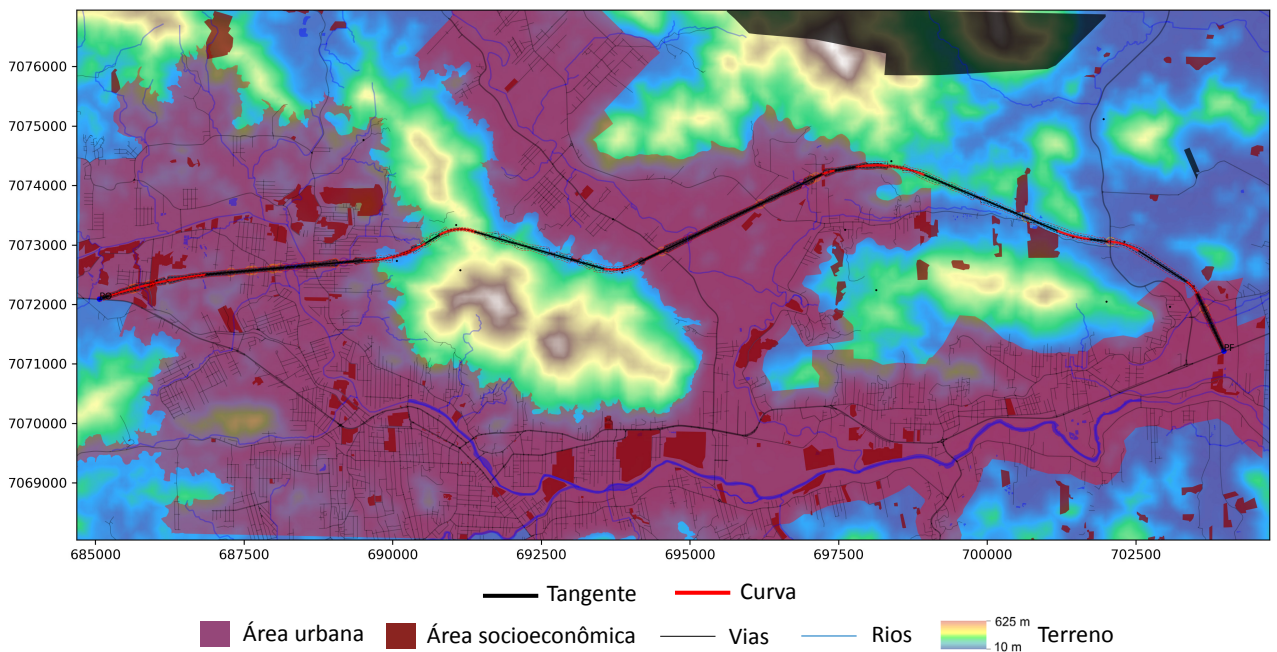
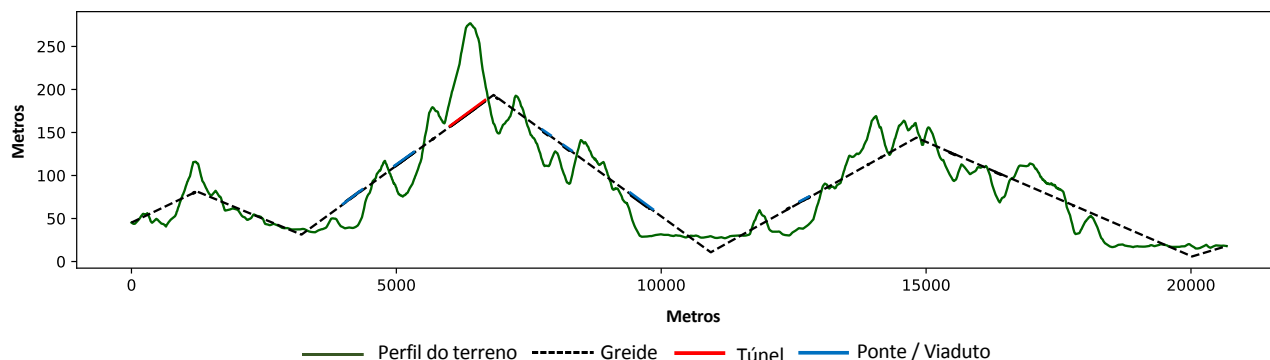


Figura 69: Trecho completo - Greide e perfil do terreno



O resultado para o trecho completo possui 20,7 km com 9 curvas de 5.000 m, 2.027 m, 691 m, 848 m, 1.010 m, 2.096 m, 2.032 m, 1.010 m e 505m respectivamente. A Tabela 13 apresenta os custos do Trecho completo.

Tabela 13: Trecho completo - Custos

		Custo	%
Trecho completo - Total	20,7 km	R\$ 1.551.758.207	100%
Terraplenagem - Corte	9.978.515 m ³	R\$ 81.724.041	5%
Terraplenagem - Aterro	12.790.861 m ³	R\$ 34.663.232	2%
Terraplenagem - Empréstimo	2.812.345 m ³	R\$ 17.565.609	1%
Terraplenagem - Bota fora	—	—	0%
OAE - Túnel	953 m	R\$ 158.546.555	10%
OAE - Ponte	1.884 m	R\$ 89.382.775	6%
Pavimentação	20,7 km	R\$ 65.311.593	4%
Desapropriação - Área urbana	1.047.402 m ²	R\$ 1.047.402.108	67%
Desapropriação - Área socioambiental	14.236 m ²	R\$ 42.706.665	3%
Intersecções com vias	—	R\$ 6.863.625	0%
Intersecções com rios	—	R\$ 7.592.000	0%

O custo total do resultado para o trecho completo é de R\$ 1.551 milhões, com 70% do custo referente à desapropriações. O trecho apresenta ainda um túnel de 953 m, que corresponde a 10% do custo total e 7 trechos de viadutos, que totalizam 6% do custo total.

4.4 Comparação com projeto existente

A Figura 70 apresenta o traçado do projeto existente (E), o traçado resultado da união dos quatro trechos (R1) e o traçado resultado da aplicação no trecho completo (R2). A Tabela 14 mostra a comparação entre os custos dos traçados encontrados.

Figura 70: Comparação entre os resultados e o projeto existente

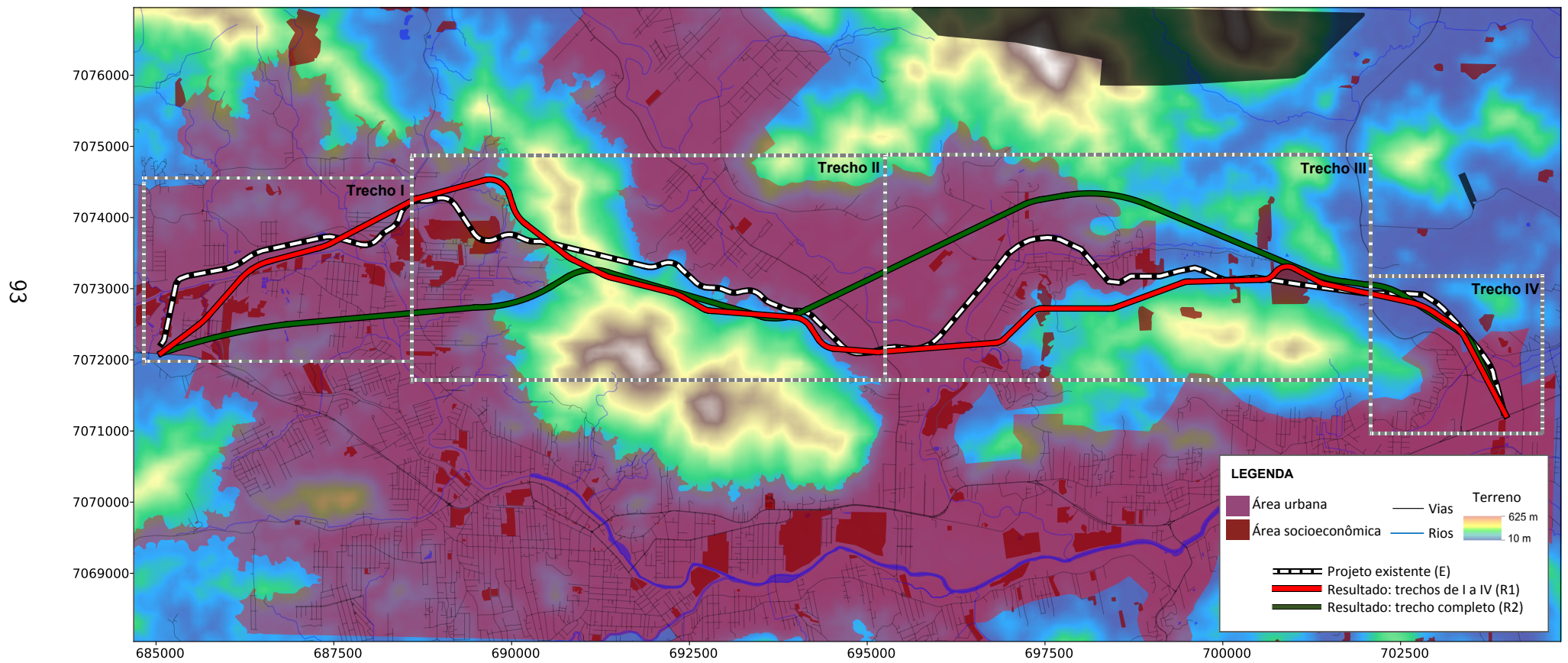


Tabela 14: Comparação entre os custos dos traçados encontrados

	Projeto existente (E)	Trecho I - IV (R1)		Trecho completo (R2)	
Comprimento	23,8 km	21,6 km		20,7 km	
Custo total	-	R\$ 1.285.784.484		R\$ 1.551.758.207	
Custo sem desapropriação	R\$ 535.800.000¹⁵	R\$ 288.983.372		R\$ 461.649.434	
Terraplenagem - Corte		6.584.755 <i>m</i> ³	R\$ 53.929.148	9.978.515 <i>m</i> ³	R\$81.724.041
Terraplenagem - Aterro		6.340.608 <i>m</i> ³	R\$ 17.183.049	12.790.861 <i>m</i> ³	R\$34.663.232
Terraplenagem - Empréstimo		1.466.954 <i>m</i> ³	R\$ 9.828.596	2.812.345 <i>m</i> ³	R\$17.565.609
Terraplenagem - Bota fora		1.743.823 <i>m</i> ³	R\$ 997.448	-	-
OAE - Túnel		568 <i>m</i>	R\$ 94.652.814	953 <i>m</i>	R\$ 158.546.55
OAE - Ponte		322 <i>m</i>	R\$ 15.310.687	1.884 <i>m</i>	R\$ 89.382.775
Pavimentação		21,6 <i>km</i>	R\$ 68.498.855	20,7 <i>km</i>	R\$ 65.311.593
Desapropriação - Área urbana		857.574 <i>m</i> ²	R\$ 857.574.168	1.047.402 <i>m</i> ²	R\$ 1.047.402.108
Desapropriação - Área socioambiental		46.408 <i>m</i> ²	R\$ 139.226.943	14.236 <i>m</i> ²	R\$ 42.706.665
Intersecções com vias		-	R\$ 6.049.875	-	R\$ 6.863.625
Intersecções com rios		-	R\$ 9.490.000	-	R\$ 7.592.000

¹⁵Valor contratual com preços de 2014 (SAPORITI, 2019)

Conforme apresentado na Tabela 14, o traçado de menor comprimento é o R2 (20,7 km), seguido pelo traçado R1 (21,6 km), por último o E (23,8 km). Apesar do menor comprimento do traçado R2, ele é o que apresenta o maior custo devido aos custos de terraplenagem, desapropriação de área urbana e maior número de OAEs.

A comparação direta entre o custo dos traçados resultados da aplicação do método (R1 e R2) com o custo do traçado E não é possível. Não há como saber se foram utilizadas as mesmas considerações de custos ou os mesmos valores de custos unitários. Por causa disto, a comparação será feita apenas de forma visual, com o auxílio da Figura 70.

Para o Trecho I, é possível notar que o traçado P ignora muitas das áreas socioeconômicas de alto custo consideradas no modelo, além de formar um traçado mais curvilíneo, o que indica que o custo de área urbana pode ter sido calculado de forma diferente do que o utilizado no modelo, talvez com dados mais detalhados do real valor dos imóveis da região. A porção do R1 no Trecho I buscou o menor caminho desviando de áreas socioeconômicas de maior custo. Já a porção do traçado R2 busca praticamente um menor caminho para cruzar a área urbana, devido ao alto custo unitário desta.

No Trecho II, todos os traçados comparados possuem túneis. O traçado R1 possui um túnel de 405 m de comprimento, o R2 de 953 m e o E possui túnel duplo, um para cada sentido com 1.040 e 1.070 metros, respectivamente (BEMQUERER, 2017). A localização dos túneis dos traçados R1 e R2 foi bem próxima, enquanto os túneis do traçado E se localizam mais ao norte. O traçado E utiliza mais áreas urbanas e cruza uma área socioeconômica de alto custo, isso indica, como já citado, que o custo de área urbana foi calculado de forma diferente do que o utilizado no modelo.

Com relação ao Trecho III, mais da metade do traçado E atravessa a área urbana de Schroeder e ignora áreas socioeconômicas definidas no modelo de busca. O traçado R2, apesar de desviar das áreas socioeconômicas, também possui mais da metade de seu comprimento em área urbana saindo do Trecho 2 mais ao norte. Por fim, o traçado R1 possui o menor comprimento em área urbana, o traçado também busca desviar das áreas socioeconômicas e contorna a topografia acidentada.

O Trecho IV é o mais curto dos trechos e seu relevo é plano. Devido a isso os traçados apresentaram características bem próximas, ambos desviaram da área urbana quando possível.

5 Conclusões e discussões

Este trabalho apresentou um modelo de otimização para auxílio na escolha de traçado geométrico de rodovias. O modelo leva em consideração limitações técnicas e geométricas de traçados viários, além de custos construtivos e socioambientais calculados a partir de dados geográficos da área de estudo. Ele permite gerar traçados econômicos que buscam diminuir o impacto socioambiental e torna possível a obtenção de informações para a elaboração de estudos de viabilidade e anteprojetos. A aplicabilidade do modelo inclui a análise de traçados de áreas complexas como o caso de contornos rodoviários em áreas urbanas.

Com relação às limitações técnicas e geométricas das rodovias, a Tabela 15 apresenta aquelas incluídas e não incluídas no modelo.

Tabela 15: Limitações geométricas do modelo

Limitações incluídas	Limitações não incluídas
<ul style="list-style-type: none">• Ângulo de deflexão entre 10° e 35°• Raio mínimo horizontal• Inclinação máxima do greide• Comprimento mínimo das curvas verticais	<ul style="list-style-type: none">• Tamanho máximo da tangente• Comprimento mínimo de curva horizontal• Relação entre raios de curvas consecutivas• Tangentes intermediárias mínimas para curvas de sentidos opostos• Tangentes intermediárias mínimas para curvas de mesmo sentido

A avaliação das limitações não incluídas pode ser feita de três formas distintas:

1. eliminar da população os resultados que não respeitam as limitações;
2. penalizar a função custo; ou
3. avaliar posteriormente o resultado encontrado pelo algoritmo.

O primeiro caso, conforme apontou Vázquez-Méndez et al. (2018), dificulta a geração de indivíduos válidos durante o processamento, devido ao processo randômico da população e o grande número de restrições utilizadas. No segundo caso, para serem incluídas no custo, um estudo prévio de sensibilidade seria necessário para avaliar o valor da penalidade. Um valor muito alto, por exemplo, inviabilizaria a escolha de bons indivíduos para as próximas gerações. Logo, testes seriam necessários para se encontrar um valor de penalidade aceitável, sendo que esse valor também variaria para cada área de estudo. Devido aos fatores apresentados, decidiu-se deixar a cargo do projetista a avaliação dessas limitações de forma indireta, após o resultado. No entanto, assume-se que mais estudos devem ser feitos com relação a esse assunto.

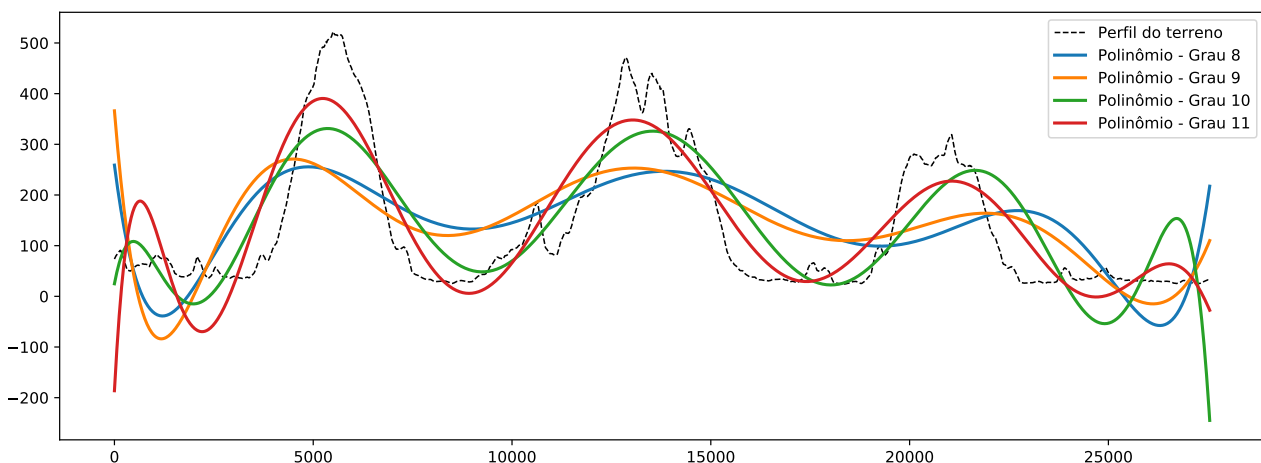
Também não estão incluídas as curvas horizontais de transição, utilizou-se somente curvas circulares no modelo geométrico. Na seção transversal, não foram incluídas a superelevação e a

superlargura. Estudos complementares podem ser realizados quanto à inclusão de mais detalhes no modelo e a influência destes no resultado final do traçado.

No que diz respeito ao algoritmo de otimização, utilizou-se um GA híbrido com a inclusão de listas tabu. A aplicação das listas tabu se mostrou benéfica, ela perturba a população e permite que o algoritmo escape de mínimos locais. Um exemplo dessa aplicação pode ser observada no Trecho III do estudo de caso (Figura 61).

No modelo geométrico implementado, o traçado horizontal foi definido por pares de coordenadas x e y definidos como variáveis para o algoritmo de otimização, enquanto que o traçado vertical foi gerado posteriormente a partir de um modelo de aproximação polinomial. Observou-se, no entanto, que a modelo de aproximação polinomial possui limitações. Ele não se ajusta corretamente ao perfil do terreno quando o início ou fim do perfil for plano. Alguns exemplos podem ser observados na Figura 71, foram ajustados ao perfil do terreno quatro polinômios, com graus de 8 a 11. É possível observar as deformações nos ajustes no início e no fim do perfil.

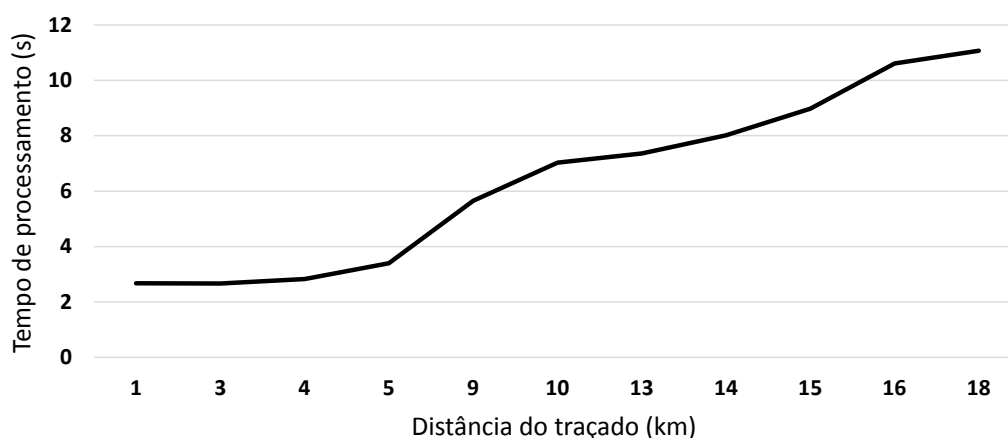
Figura 71: Ajuste polinomial



Outra abordagem para a definição do traçado vertical poderia ser colocá-los todos como variáveis no algoritmo de otimização, ou seja, como genes no GA. Tal abordagem não foi utilizada pois o aumento das variáveis no modelo dificultaria a formação de traçados válidos, o que impacta negativamente nas observações do espaço de busca e na convergência. Ainda assim, mais testes podem ser feitos sobre quais variáveis incluir no modelo.

Do ponto de vista computacional, o processo mais lento foi o cálculo do custo dos indivíduos, mais especificamente o cálculo do volume de corte e aterro. A Figura 72 apresenta o gráfico do tempo de processamento para o cálculo de custo pela distância do traçado em um Intel i5-3210M @ 2.50 GHz com 12 GB de RAM.

Figura 72: Tempo de processamento de cálculo de custo de cada indivíduo



Nota-se que o tempo é maior para traçados mais extensos. Esse comportamento é explicado devido ao maior número de seções transversais para o cálculo de volumes de solo. Durante o procedimento de otimização, todos os dados necessários foram alocados na memória *RAM*. A memória *RAM* possui a função de armazenar a informação que será trabalhada pelo processador, o acesso a esta possui maior velocidade do que acesso ao conteúdo do *HD*. Também utilizou-se técnicas de *multithreading* para diminuir o tempo computacional. Apesar disso, o método atualmente implementado faz com que o resultado, para traçados acima de 20 km, demore entre 2 e 3 dias para convergir.

Com relação aos custos, a Tabela 16 apresenta aqueles incluídos e não incluídos no modelo. Buscou-se construir um modelo de custos que atendesse uma análise para escolha de uma nova rodovia em um contexto urbano, com penalidades para a área urbana e áreas sensíveis selecionadas.

Tabela 16: Custos do modelo

Custos incluídos	Custos não incluídos
<ul style="list-style-type: none"> ● Corte ● Aterro ● Empréstimo ● Bota fora ● Túnel ● Ponte ● Pavimentação ● Desapropriação de áreas urbanas ● Áreas socioambientais sensíveis ● Intersecções com vias ● Intersecções com rios 	<ul style="list-style-type: none"> ● Drenagem ● Contenção de solo ● Instalações de segurança ● Manutenção da rodovia ● Operacional dos veículos ● Tempo de viagem ● Acidentes ● Poluição

Dos custos construtivos, não estão incluídos os custos de drenagem, contenção do solo e itens

relacionados à instalações de segurança como sinalização horizontal e vertical. Também não estão incluídos os custos de manutenção da rodovia, bem como os custos relacionados aos usuários. Um estudo complementar poderia ser a adição dos custos não utilizados, com a investigação da influência desses custos no traçado geométrico.

Para os custos socioambientais, no estudo de caso, utilizou-se um custo único de desapropriação para toda a área urbana. Nos resultados percebeu-se que o custo relativo à desapropriação de áreas urbanas obteve uma porcentagem relativa considerável do custo total, ela representou mais de 50% em todos os trechos, com exceção do Trecho III, com 48%. Pode-se concluir que talvez o custo do m^2 da área urbana foi excessivamente alto.

Uma outra abordagem para a desapropriação urbana poderia ser variar o valor do custo unitário para diferentes áreas. Uma possibilidade seria levar em consideração outros dados como, por exemplo, a população de cada setor censitário. Nos setores com maior população o custo poderia ser maior, enquanto que, nos setores com menor população o custo poderia ser menor. Por ser de grande importância para análise de traçado em área urbana, recomendam-se estudos mais aprofundados para esse custo, com o auxílio inclusive de técnicas de avaliação de imóveis.

Relativo aos custos de terraplenagem, um possível melhoramento do modelo seria atribuir ângulos diferentes para as rampas de corte e saias de aterro, conforme o tipo de solo da região. Dados de ensaios geotécnicos dos solos e rochas presentes na região de estudo, ou até mesmo de mapas geotécnicos existentes, podem fornecer informações para a entrada no modelo. Da mesma forma, custos mais altos poderiam ser adotados em áreas com solos moles, que necessitariam de um tratamento de adensamento especial.

Quanto ao estudo de caso, o contorno rodoviário de Jaraguá do Sul foi dividido em quatro trechos com características diferentes. O Trecho I é plano, totalmente em área urbana e com quantidade significativa de áreas socioeconômicas de maior custo. O Trecho II possui relevo ondulado, o que resultou na utilização de túneis e pontes para respeitar as limitações técnicas da rodovia. O Trecho III possui relevo plano, mas rodeado por morros e áreas socioeconômicas de maior custo, além da área urbana da cidade de Schroeder. Por fim, o Trecho IV é mais curto, não possui muitas áreas de alto custo e é de relevo plano. Essa divisão por trechos permitiu avaliar o comportamento do modelo em cenários distintos.

De volta ao modelo, no que diz respeito ao número de genes, a escolha afeta a configuração e o custo total dos traçados gerados. A Tabela 17 apresenta o número de genes utilizados e o número final de curvas resultantes.

Tabela 17: Comparação entre número de genes e número de curvas resultantes

	Trecho I	Trecho II	Trecho III	Trecho IV	Completo
Número PIs / genes	5	8	9	3	20
Número de curvas	3	8	7	2	9

A densidade de genes deve ser escolhida conforme o uso do solo e o relevo da área de estudo, um maior número de genes permitirá maior possibilidade de combinações para formar o traçado. No entanto, isso pode dificultar a formação de traçados válidos, devido a necessidade de concordâncias das curvas, impactando na convergência do resultado.

Os resultados da Tabela 17 indicam que o número de genes escolhido poderia ter sido variado, tanto aumentado no Trecho II, como diminuído nos outros trechos. Assim, o procedimento de busca poderia ser novamente realizado e avaliado para cada alteração no número de genes.

Identificou-se também que são necessários mais testes em outras áreas de estudos, além de uma investigação mais aprofundada em relação a aplicação do modelo em traçados de grande extensão. Esperava-se, por exemplo, que o Trecho Completo, livre de pontos intermediários fixos, obtivesse um resultado melhor do que os quatro trechos processados separadamente. Uma provável hipótese do ocorrido nesse caso é que o modelo apresentou dificuldades para escapar de um mínimo local, devido ao aumento da área de busca.

Uma investigação possível para sair desse mínimo local, e encontrar um melhor resultado, poderia ser a alteração dos dados de entrada do algoritmo de otimização, como: tamanho da população, número de genes, taxa de reprodução, mutação e tamanho das listas tabu.

Por fim, apesar dos inúmeros avanços que podem ser feitos na metodologia e no modelo desenvolvido, considera-se que os objetivos elencados para o trabalho foram alcançados. Também com o avanço da velocidade de processamento dos computadores e de novas técnicas de busca e otimização, há uma grande e interessante área de pesquisa em modelos para definição de traçados geométricos de obras de infraestrutura.

5.1 Recomendação para trabalhos futuros

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Alterar o modelo de geometria para permitir a aplicação do algoritmo de busca em outras obras de infraestrutura como ferrovias e dutovias;
- Incluir mais detalhes e limitações geométricas no modelo do traçado rodoviário e comparar a variação dos traçados resultantes;
- Avaliar a sensibilidade da convergência, do tempo de busca e do resultado a partir da alteração dos dados de entrada do algoritmo de otimização: tamanho da população, número de genes,

taxa de reprodução, mutação e tamanho das listas tabu;

- Investigar e comparar a utilização de outras meta-heurísticas ou modelos matemáticos de otimização;
- Aplicar e validar o modelo em outras áreas de estudo, além de comparar com resultados obtidos de *softwares* proprietários;
- Incluir novos custos no modelo, como o custo de terraplenagem com diferentes tipos de solos, custos de manutenção da rodovia e dos usuários (valor do tempo, acidentes). Verificar também o impacto da inclusão desses custos no traçado resultante;
- Investigar outras formas de cálculo e avaliação do volume de terra, com o objetivo de diminuir o tempo de processamento; e
- Incluir considerações feitas pelos tomadores de decisão por meio de critérios e custos subjetivos tratados por métodos multicritério. Permitir a consideração de opiniões públicas e políticas, além da avaliação de diversos cenários.

Referências

- ALMEIDA, F. et al. *Hybrid Metaheuristics: Third International Workshop, HM 2006, Gran Canaria, Spain, October 13-14, 2006, Proceedings (Lecture Notes in Computer Science)*. [S.l.]: Springer, 2006. ISBN 3-540-46384-4.
- ANDERSON, D. A. C. . D. G. *Procedures for estimating highway user costs, air pollution, and noise effects*. [S.l.]: National Cooperative Highway Research Program Report (NCHRP), 1972.
- ARUGA, K. et al. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments of forest roads using tabu search. *International Journal of Forest Engineering*, Informa UK Limited, v. 16, n. 2, p. 137–151, jun 2005.
- BABAPOUR, R. et al. Forest road profile optimization using meta-heuristic techniques. *Applied Soft Computing*, Elsevier BV, v. 64, p. 126–137, mar 2018.
- BELFIORE, P.; FAVERO, L. P. *Pesquisa Operacional: Para Cursos de Engenharia*. [S.l.]: Elsevier, 2012. ISBN 978-85-352-4893-7.
- BEMQUERER, M. *Relatório de fiscalização - Adequação de trecho rodoviário na BR-280/SC*. [S.l.], 2017.
- BLUM, C. et al. *Hybrid Metaheuristics: An Emerging Approach to Optimization (Studies in Computational Intelligence)*. [S.l.]: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-78294-0.
- BOOTO, G. K. et al. Road planning and route alignment selection criteria in the norwegian context. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 471, p. 062007, feb 2019.
- BOSURGI, G.; PELLEGRINO, O.; SOLLAZZO, G. A pso highway alignment optimization algorithm considering environmental constraints. *Advances in Transportation Studies an international Journal Section B* 31, 2013.
- BRASIL. *Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997*. 1997. Diário oficial da União.
- BRASIL. *Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA. Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária*. 2017.
- CÂMARA, G. et al. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf>>. Acesso em: 05.4.2016.
- CARMO, C. L. do; JUNIOR, A. A. R. Segurança em rodovias inseridas em áreas urbanas na região sul do brasil. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, FapUNIFESP (SciELO), v. 11, n. 0, 2019.
- CASAL, G.; SANTAMARINA, D.; VAZQUEZ-MENDEZ, M. E. Optimization of horizontal alignment geometry in road design and reconstruction. *TRANSPORTATION RESEARCH PART C-EMERGING TECHNOLOGIES*, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, 74, p. 261–274, JAN 2017. ISSN 0968-090X.
- CHEW, E.; GOH, C.; FWA, T. SIMULTANEOUS-OPTIMIZATION OF HORIZONTAL AND VERTICAL ALIGNMENTS FOR HIGHWAYS. *TRANSPORTATION RESEARCH PART B-METHODOLOGICAL*, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD, ENGLAND OX5 1GB, 23, n. 5, p. 315–329, OCT 1989. ISSN 0191-2615.
- COSTA, A. C. A.; CARRASCO, V. *Infraestrutura: regras e incentivos. Panorama Brasil*. 2018. Disponível em: <<http://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2018/may/Panorama-Brasil-Infrastructure-PT-Final.pdf>>.

- COSTA, A. L.; SOUSA, R. L.; EINSTEIN, H. H. Probabilistic 3d alignment optimization of underground transport infrastructure integrating GIS-based subsurface characterization. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier BV, v. 72, p. 233–241, feb 2018.
- DAVIS, C.; JHA, M. K. A dynamic modeling approach to investigate impacts to protected and low-income populations in highway planning. *TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE*, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, 45, n. 7, p. 598–610, AUG 2011. ISSN 0965-8564.
- DNER. *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais*. 1999.
- DNIT. *NORMA DNIT 003/2002 - PAD. Criação e cadastramento de anel ou contorno rodoviário - Padronização*. 2002.
- DNIT. *Manual de custos rodoviários - Metodologia e conceitos*. Av Presidente Vargas, 522 4 andar, Rio de Janeiro, 2003.
- DNIT. *Manual de conservação rodoviária*. Brasília, 2005.
- DNIT. *Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários - Escopos básicos/ Instruções de serviço*. 2006.
- DNIT, D. N. D. I. D. T. *Publicação IPR 745 - Manual de gerência de pavimentos*. Rio de Janeiro, 2011.
- DNIT, D. N. de Infraestrutura de T. *Custos médios gerenciais*. [S.l.], 2018.
- DNIT, D. N. de Infraestrutura de T. *Relatório de gestão 2018*. 2018.
- DONALDSON, D. Railroads of the raj: Estimating the impact of transportation infrastructure. *American Economic Review*, American Economic Association, v. 108, n. 4-5, p. 899–934, apr 2018.
- EASA, S. M.; MEHMOOD, A. Establishing highway horizontal alignment to maximize design consistency. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canadian Science Publishing, v. 34, n. 9, p. 1159–1168, sep 2007.
- EASA, S. M.; MEHMOOD, A. Optimizing design of highway horizontal alignments: New substantive safety approach. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, v. 23, n. 7, p. 560–573, oct 2008.
- GIPPS, P. Align3d: a package for planning rail alignments. *Transactions on the Built Environment*, v. 6, p. 57–64, 1994. ISSN 1743-3509.
- GIPPS, P. G. Align 3d: A package to optimise route alignment. *ROAD & TRANSPORT RESEARCH*, v. 1, n. 2, p. 50–59, jun. 1992.
- GIPPS, P. G. et al. New technologies for transport route selection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier BV, v. 9, n. 2, p. 135–154, apr 2001.
- GLOVER, F. Tabu search—part i. *ORSA Journal on Computing*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 1, n. 3, p. 190–206, aug 1989.
- GLOVER, F.; KELLY, J. P.; LAGUNA, M. Genetic algorithms and tabu search: Hybrids for optimization. *Computers & Operations Research*, Elsevier BV, v. 22, n. 1, p. 111–134, jan 1995.
- GOKTEPE, A. B.; LAV, A. H. Method for optimizing earthwork considering soil properties in the geometric design of highways. *Journal of Surveying Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 130, n. 4, p. 183–190, nov 2004.

- GOKTEPE, A. B.; LAV, A. H.; ALTUN, S. Method for optimal vertical alignment of highways. *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS-TRANSPORT*, THOMAS TELFORD PUBLISHING, THOMAS TELFORD HOUSE, 1 HERON QUAY, LONDON E14 4JD, ENGLAND, 162, n. 4, p. 177–188, DEC 2009. ISSN 0965-092X.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*. [S.l.]: Campus, 2005. ISBN 978-85-352-1520-5.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1989. ISBN 978-0201157673.
- HASANY, R. M.; SHAFABI, Y. Ant colony optimisation for finding the optimal railroad path. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, Thomas Telford Ltd., v. 170, n. 4, p. 218–230, aug 2017.
- HASSAN, Y.; EASA, S. M.; HALIM, A. O. A. E. State-of-the-art of three-dimensional highway geometric design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canadian Science Publishing, v. 25, n. 3, p. 500–511, jun 1998.
- HIRPA, D. et al. A bi-objective optimization framework for three-dimensional road alignment design. *TRANSPORTATION RESEARCH PART C-EMERGING TECHNOLOGIES*, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, 65, p. 61–78, APR 2016. ISSN 0968-090X.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence (Complex Adaptive Systems)*. (2nd edition, mit press, 1992.). [S.l.]: A Bradford Book, 1975. ISBN 9780262082136.
- ISMAIL, N. W.; MAHYIDEEN, J. M. The impact of infrastructure on trade and economic growth in selected economies in asia. *SSRN Electronic Journal*, Elsevier BV, 2015.
- JHA, M. Using a geographic information system for automated decision making in highway cost analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE Publications, v. 1768, p. 260–267, jan 2001.
- JHA, M. Criteria-based decision support system for selecting highway alignments. *JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING-ASCE*, ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS, 1801 ALEXANDER BELL DR, RESTON, VA 20191-4400 USA, 129, n. 1, p. 33–41, JAN-FEB 2003. ISSN 0733-947X.
- JHA, M.; MCCALL, C.; SCHONFELD, P. Using GIS, genetic algorithms, and visualization in highway development. *COMPUTER-AIDED CIVIL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING*, BLACKWELL PUBLISHERS, 350 MAIN STREET, STE 6, MALDEN, MA 02148 USA, 16, n. 6, p. 399–414, NOV 2001. ISSN 1093-9687.
- JHA, M.; SCHONFELD, P. Geographic information system-based analysis of right-of-way cost for highway optimization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE Publications, v. 1719, p. 241–249, jan 2000.
- JHA, M.; SCHONFELD, P. Integrating genetic algorithms and geographic information system to optimize highway alignments. In: *TRANSPORTATION DATA, STATISTICS, AND INFORMATION TECHNOLOGY: PLANNING AND ADMINISTRATION*. 500 FIFTH ST, NW, WASHINGTON, DC 20001 USA: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATL RESEARCH COUNCIL, 2000. (TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, 1719), p. 233–240. ISBN 0-309-06696-4. ISSN 0361-1981. 79th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board, WASHINGTON, D.C., JAN 09-13, 2000.

- JHA, M.; SCHONFELD, P. A highway alignment optimization model using geographic information systems. *TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE*, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, 38, n. 6, p. 455–481, JUL 2004. ISSN 0965-8564.
- JHA, M. K.; KIM, E. Highway route optimization based on accessibility, proximity, and land-use changes. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 132, n. 5, p. 435–439, may 2006.
- JHA, M. K.; MAJI, A. A multi-objective genetic algorithm for optimizing highway alignments. In: *2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making*. [S.l.]: IEEE, 2007.
- JHA, M. K.; OGALLO, H. G.; OWOLABI, O. A quantitative analysis of sustainability and green transportation initiatives in highway design and maintenance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Elsevier BV, v. 111, p. 1185–1194, feb 2014.
- JHA, M. K. et al. *Intelligent Road Design (Advances in Transport)*. [S.l.]: WIT Press / Computational Mechanics, 2006. ISBN 1-84564-003-9.
- JONG, J.-C.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, v. 15, n. 4, p. 261–271, jul 2000.
- JONG, J.-C.; SCHONFELD, P. Cost functions for optimizing highway alignments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE Publications, v. 1659, n. 1, p. 58–67, jan 1999.
- JONG, J.-C.; SCHONFELD, P. An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier BV, v. 37, n. 2, p. 107–128, feb 2003.
- KANG, M.-W.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. Applicability of highway alignment optimization models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier BV, v. 21, n. 1, p. 257–286, apr 2012.
- KANG, M. W.; SCHONFELD, P.; JONG, J.-C. Highway alignment optimization through feasible gates. *Journal of Advanced Transportation*, INST TRANSPORTATION, 41, n. 2, p. 115–144, SPR 2007. ISSN 0197-6729.
- KANG, M. W.; SCHONFELD, P.; YANG, N. Prescreening and repairing in a genetic algorithm for highway alignment optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, v. 24, n. 2, p. 109–119, feb 2009.
- KERALI, H. G. R. *Volume one: Overview of HDM-4*. [S.l.], 2000.
- KIM, E.; JHA, M.; SON, B. Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach. *Transportation Research Part B - Methodological*, 39, n. 4, p. 339–360, MAY 2005. ISSN 0191-2615.
- KIM, E. et al. Intersection modeling for highway alignment optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, v. 19, n. 2, p. 119–129, mar 2004.
- KIM, E. et al. Highway alignment optimization incorporating bridges and tunnels. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 133, n. 2, p. 71–81, feb 2007.

- KIM, E.; SCHONFELD, P. Estimating highway earthwork cross sections by using vector and parametric representation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE Publications, v. 1772, n. 1, p. 48–54, jan 2001.
- KLEIN, F. de C. *Análise da influência de características geométricas de rodovias nos custos dos usuários utilizando o programa HDM-4*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- KURAHASHI, S.; TERANO, T. A genetic algorithm with tabu search for multimodal and multiobjective function optimization. *GECCO 2000: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 291–298, 2000.
- LEE, S. H. *Introducao ao Projeto Geometrico de Rodovias - Coleção Didática*. 4º. ed. [S.l.]: UFSC, 2017. ISBN 978-8532806512.
- LI, C.; DING, L.; ZHONG, B. Highway planning and design in the qinghai–tibet plateau of china: A cost–safety balance perspective. *Engineering*, Elsevier BV, v. 5, n. 2, p. 337–349, apr 2019.
- LI, W. et al. Methodology for optimizing constrained 3-dimensional railway alignments in mountainous terrain. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier BV, v. 68, p. 549–565, jul 2016.
- LI, W. et al. Mountain railway alignment optimization with bidirectional distance transform and genetic algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, v. 32, n. 8, p. 691–709, jun 2017.
- LOPES, E. E. *Determinação de diretrizes de traçado geométrico de obras lineares utilizando análise multicriterio*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- Lourenço da Silva, L. et al. Análise das desapropriações de terras nos estudos de viabilidade de obras de infraestrutura de transportes. *Espaço & Geografia, Vol.18, No 1 (2015), páginas 161 a 186*, 2014.
- MAJI, A.; JHA, M. K. Multi-objective highway alignment optimization using a genetic algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, Wiley, v. 43, n. 4, p. 481–504, oct 2009.
- MATAS, A.; MARÍN, A. K. R.; BARA, J. L. R. *How do road infrastructure investments affect the regional economy? Evidence from Spain*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:uab:wprdea:wpdea1610>>.
- MENEZES, R. R. V. et al. Emprego dos softwares tcp-mdt e topograph para projeto geométrico de estrada. *V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação -Recife - PE, 12-14 de Nov de 2014*, 2014.
- MIL, S.; PIANTANAKULCHAI, M. Vertical alignment optimization using customized polynomial regression model. In: *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. [s.n.], 2013. v. 9. Disponível em: <<http://www.easts.info/on-line/proceedings/vol9/PDF/P288.pdf>>.
- MOHAMMADI, A.; POORZAHEDY, H. An electromagnetism-like algorithm to solve three-dimensional highway alignment problem. *Scientia Iranica, SciTech Solutions*, v. 0, n. 0, p. 0–0, feb 2018.
- NUNES, D. F. *Diego Nunes Analise de sensibilidada do programa HMD-4*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.
- RAVINDRAN, A.; RAGSDELL, K. M.; REKLAITIS, G. V. *Engineering Optimization: methods and applications*. [S.l.]: Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-55814-9.

- SAJJAD, S. M. Estimation of air pollution cost for optimization of highway alignment. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, OMICS Publishing Group, v. 05, n. 06, 2016.
- SAPORITI, R. *Análise Expedida da situação física das obras de Melhoramentos e Duplicação da Rodovia BR-280/SC, trecho entre São Francisco do Sul e Jaraguá do Sul, e do Acesso de Jaraguá do Sul e Guaramirim (SCT-280) à Rodovia BR-280/SC*. [S.l.], 2019.
- SCHIESS, P.; WHITAKER, C. A. *Road Design and Construction In Sensitive Watersheds*. [S.l.], 1986.
- SCHWAB, K.; MARTÍN, X. S. i. *The Global Competitiveness Report 2017–2018*. [S.l.], 2018.
- TALBI, E.-G. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. [S.l.]: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-27858-1.
- TAO, F. *Bi-level genetic algorithm approach for 3D road alignment optimization*. Dissertação (Mestrado) — National University of Singapore, 2005.
- TAT, C.; TAO, F. Using GIS and genetic algorithm in highway alignment optimization. In: *2003 IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS PROCEEDINGS, VOLS. 1 & 2*. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2003. p. 1563–1567. ISBN 0-7803-8125-4. 6th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, SHANGHAI, PEOPLES R CHINA, OCT 12-15, 2003.
- TAV Brasil. *Volume 5 - Custo de capital*. [S.l.], 2009.
- TAYLOR, M. C.; BARUYA, A.; KENNEDY, J. V. *The relationship between speed and accidentson rural single-carriageway roads*. [S.l.]: TRL, 2002.
- USGS, U. S. G. S. *GIS data layers visualization*. 2016. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/media/images/gis-data-layers-visualization>>.
- VÁZQUEZ-MÉNDEZ, M. E. et al. A 3d model for optimizing infrastructure costs in road design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, v. 33, n. 5, p. 423–439, feb 2018.
- WANG, Z. *Geometric and environmental considerations in higjway aligment optimizario*. Dissertação (Mestrado) — Department of Civil and Environmental Engineering. Faculty of the Graduate School ofthe University of Maryland, College Park, 2011.
- WATANATADA, P. T. *Users Manual for the HDM-Model (World Bank)*. [S.l.]: The Johns Hopkins University Press, 1988. ISBN 0-8018-3592-5.
- WORRALL, S.; NEBOT, E. Automated process for generating digitised maps through gps data compression. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, Australia: [s.n.], 2007.
- YANG, N. et al. Multi-objective highway alignment optimization incorporating preference information. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier BV, v. 40, p. 36–48, mar 2014.

A Características técnicas para projeto de rodovias

Tabela 18: Características técnicas para projeto de novas rodovias - Classes 0, I e II

DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Unidade	CLASSE 0			CLASSE I			CLASSE II		
		Plano	Ondul.	Mont.	Plano	Ondul.	Mont.	Plano	Ondul.	Mont.
Velocidade diretriz mínima	km/h	120	100	80	100	80	60	100	70	50
Distância de visibilid. de parada: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m	310	210	140	210	140	85	210	110	65
	m	205	155	110	155	110	75	155	90	60
Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem	m	-	-	-	680 ^(1B)	560 ^(1B)	420 ^(1B)	680	490	350
Raio mínimo de curva horizontal (p/superelev. max.)	m	540	345	210	345	210	115 ⁽¹⁾	375	170	80
Taxa de superelevação máxima	%	10	10	10	10	10	10 ⁽²⁾	8	8	8
Rampa máxima	%	3	4	5	3	4,5	6	3	5	7
Valor K para curvas convexas: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m/%	233	107	48	107	48	18	107	29	10
	m/%	102	58	29	58	29	14	58	20	9
Valor K para curvas côncavas: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m/%	80	52	32	52	32	17	52	24	12
	m/%	50	36	24	36	24	15	36	19	11
Largura da faixa de trânsito	m	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,50	3,30
Largura do acostamento externo: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	m	3,50	3,00 ⁽³⁾	3,00 ⁽³⁾	3,00 ⁽³⁾	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00
Largura do acostamento interno: - pistas de 2 faixas - pistas de 3 faixas - pistas de 4 faixas	m	0,60-1,20	0,60-1,00	0,50-0,60	Somente para a classe IA. Aplicam-se os mesmos valores indicados para a classe 0			-	-	-
	m	2,50-3,00	2,00-2,50	2,00-2,50				-	-	-
	m	3,00	2,50-3,00	2,50-3,00				-	-	-
Gabarito vertical (altura livre): - mínimo desejável - mínimo absoluto	m	-	-	-	-	-	-	5,50	5,50	5,50
	m	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	4,50	4,50	4,50
Afast. mín. da borda do acost.: - obstáculos contínuos - obstáculos isolados	m	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	m	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Largura do canteiro central: - largura desejável - valor normal - mínimo absoluto	m	10 – 18	10 – 18	10 – 18	10 – 12	10 – 12	10 – 12	-	-	-
	m	6 – 7	6 – 7	6 – 7	≥ 6	≥ 6	≥ 6	-	-	-
	m	3 – 7	3 – 7	3 – 7	3 – 7	3 – 7	3 – 7	-	-	-

Observações: ⁽¹⁾ Somente para a classe IA; para a classe IB, considerar 125 m. ⁽²⁾ Somente para a classe IA; para a classe IB, considerar 8%.

⁽³⁾ Preferivelmente 3,50 m quando for previsto volume horário unidirecional de caminhões superior a 250 vph (DNER, 1999, p. 144).

Fonte: LEE (2017)

Tabela 19: Características técnicas para projeto de novas rodovias - Classes III e IV

DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Unidade	CLASSE III			CLASSE IV A			CLASSE IV B		
		Plano	Ondul.	Mont.	Plano	Ondul.	Mont.	Plano	Ondul.	Mont.
Velocidade diretriz mínima	km/h	80	60	40	60	40	30	60	40	30
Distância de visibilid. de parada: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m	140	85	45	85	45	30	85	45	30
	m	110	75	45	75	45	30	75	45	30
Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem	m	560	420	270	420	270	180	420	270	180
Raio mínimo de curva horizontal (p/ superelev. max.)	m	230	125	50	125	50	25	125	50	25
Taxa de superelevação máxima	%	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Rampa máxima	%	4	6	8	4	6	8	6	8	10 ⁽¹⁾
Valor K para curvas convexas: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m/%	48	18	5	18	5	2	18	5	2
	m/%	29	14	5	14	5	2	14	5	2
Valor K para curvas côncavas: - mínimo desejável - mínimo absoluto	m/%	32	17	7	17	4	17	7	4	12
	m/%	24	15	7	15	4	15	7	4	11
Largura da faixa de trânsito	m	3,50	3,30	3,30	3,00	3,00	3,00	2,50	2,50	2,50
Largura do acostamento externo	m	2,50	2,00	1,50	1,30	1,30	0,80	1,00	1,00	0,50
Gabarito vertical (altura livre): - mínimo desejável - mínimo absoluto	m	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
	m	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Afast. mín. da borda do acost.: - obstáculos contínuos - obstáculos isolados	m	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	m	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

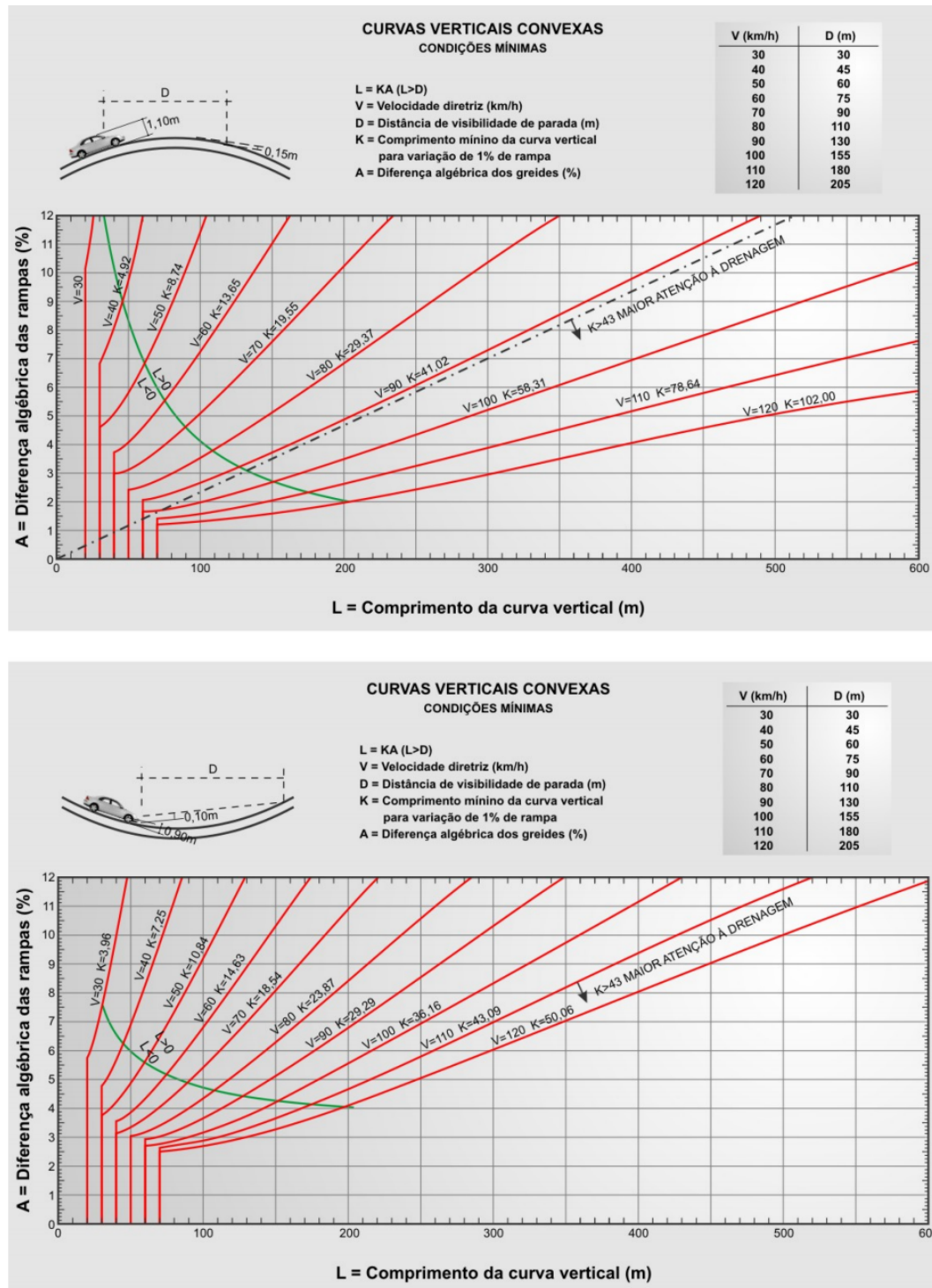
Observação: ⁽¹⁾ Em extensão limitada a 300 m contínuos.

Fonte dos dados primários: **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais** (DNER, 1999, p.161-168).

Fonte: LEE (2017)

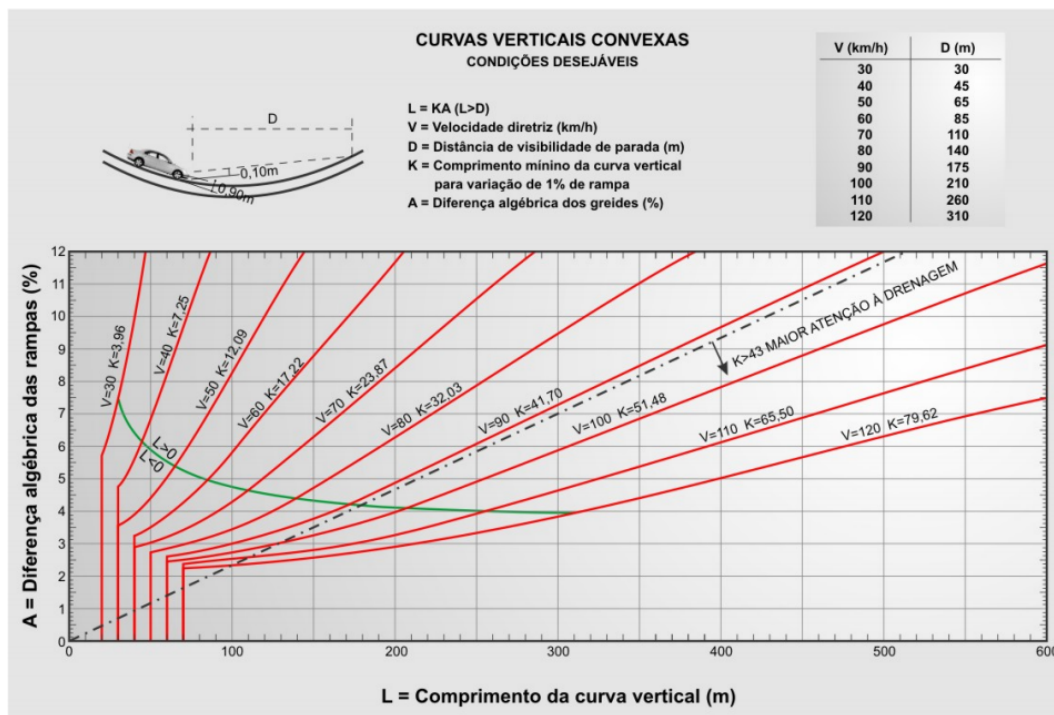
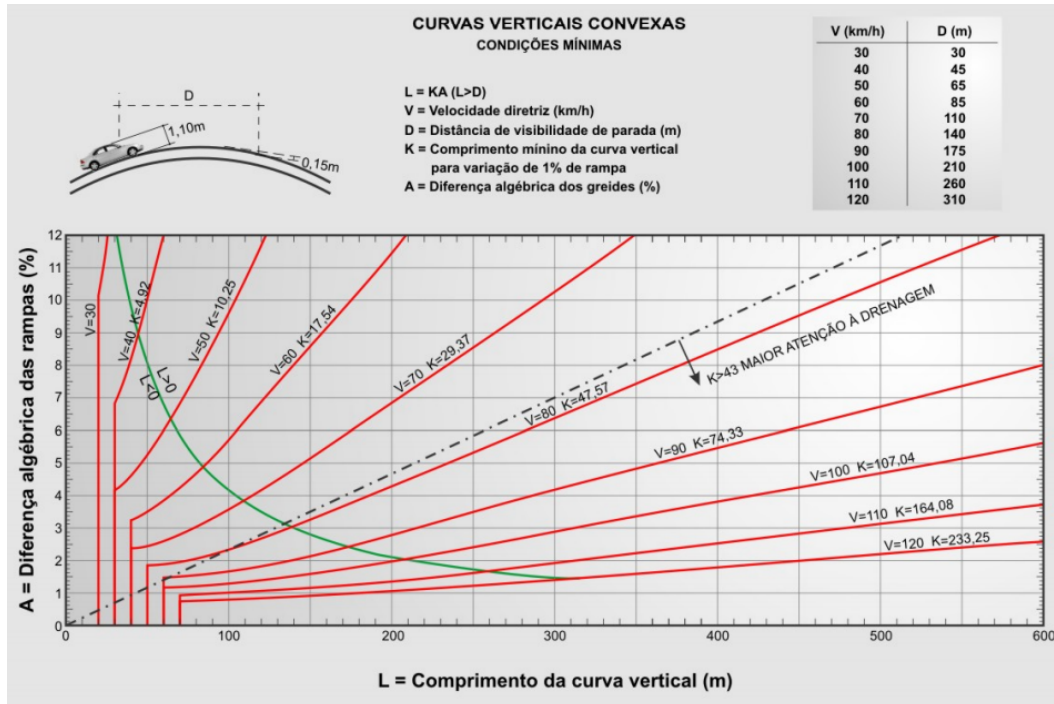
B Ábacos - Critério de distância de visibilidade

Figura 73: Ábaco de comprimento de curva vertical - Condições mínimas



Fonte: LEE (2017)

Figura 74: Ábaco de comprimento de curva vertical - Condições desejáveis



Fonte: LEE (2017)

C Datos geográficos

Figura 75: Camada geográfica - Topografía

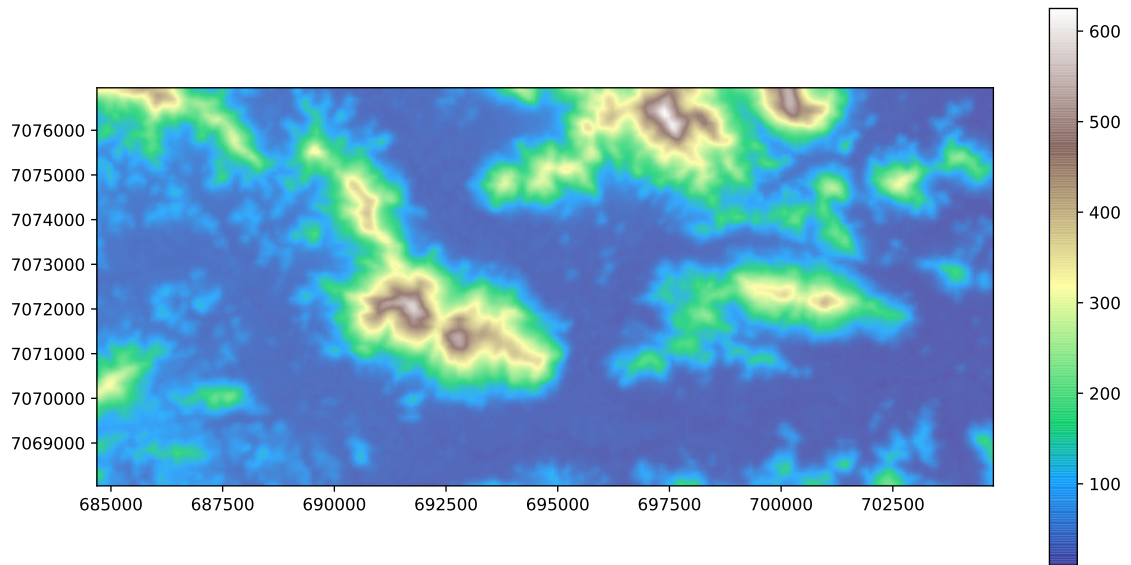


Figura 76: Camada geográfica - Área urbana

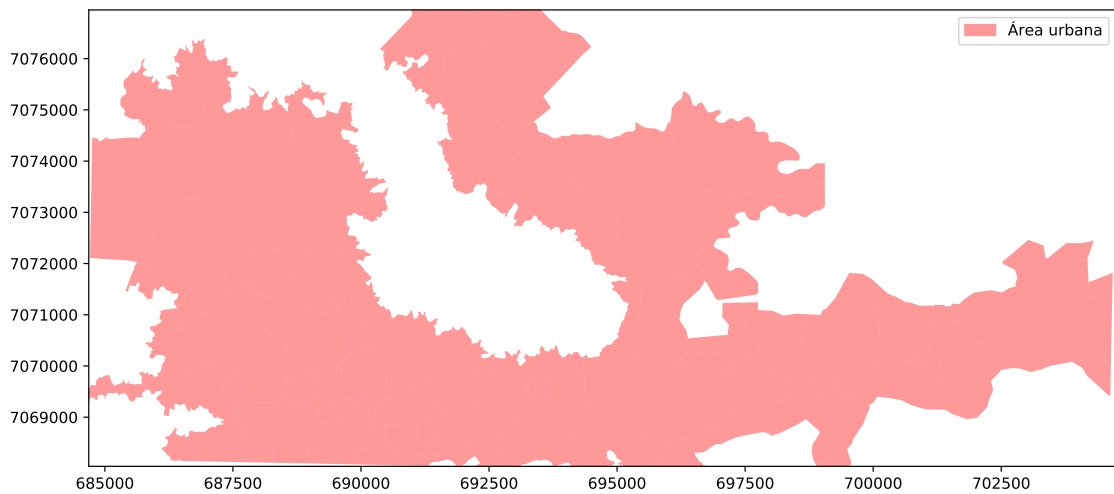


Figura 77: Camada geográfica - Vias

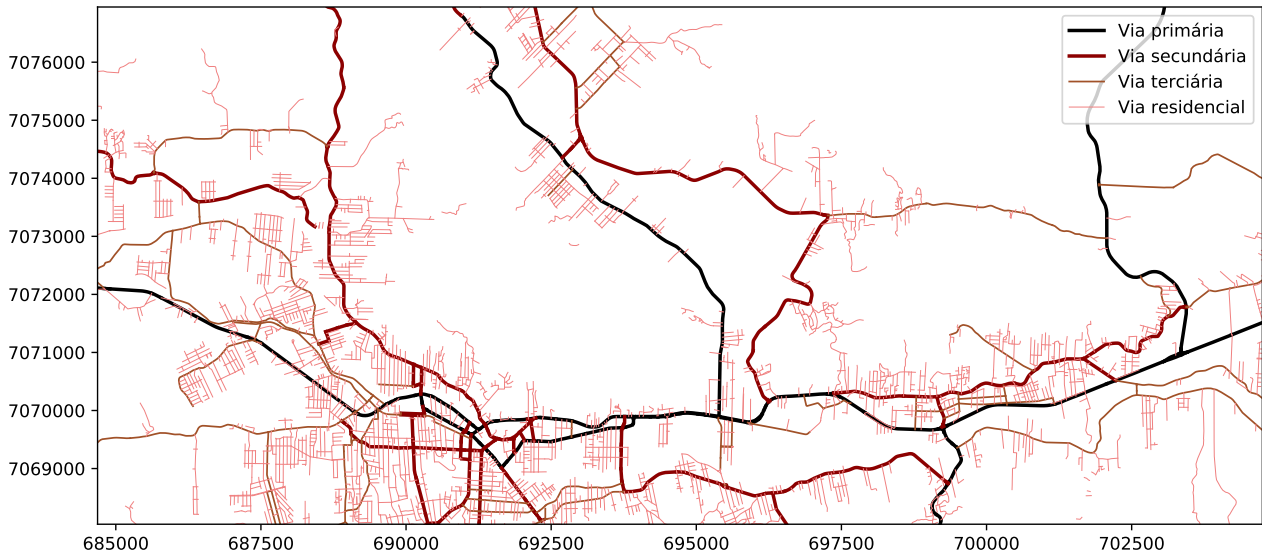


Figura 78: Camada geográfica - Rios

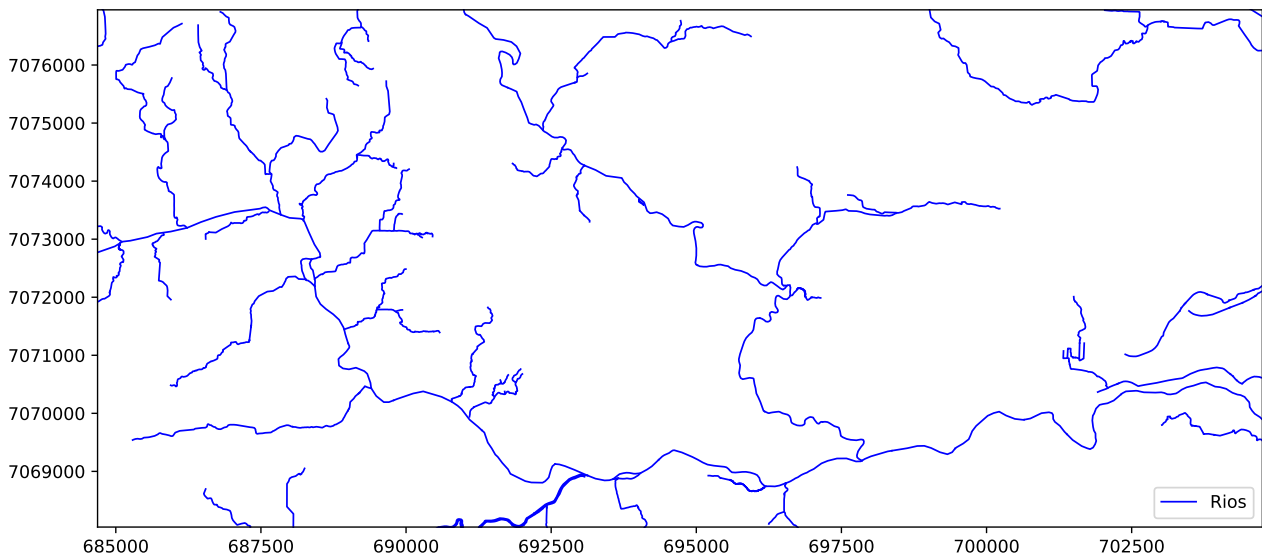


Figura 79: Camada geográfica - Áreas socioambientais

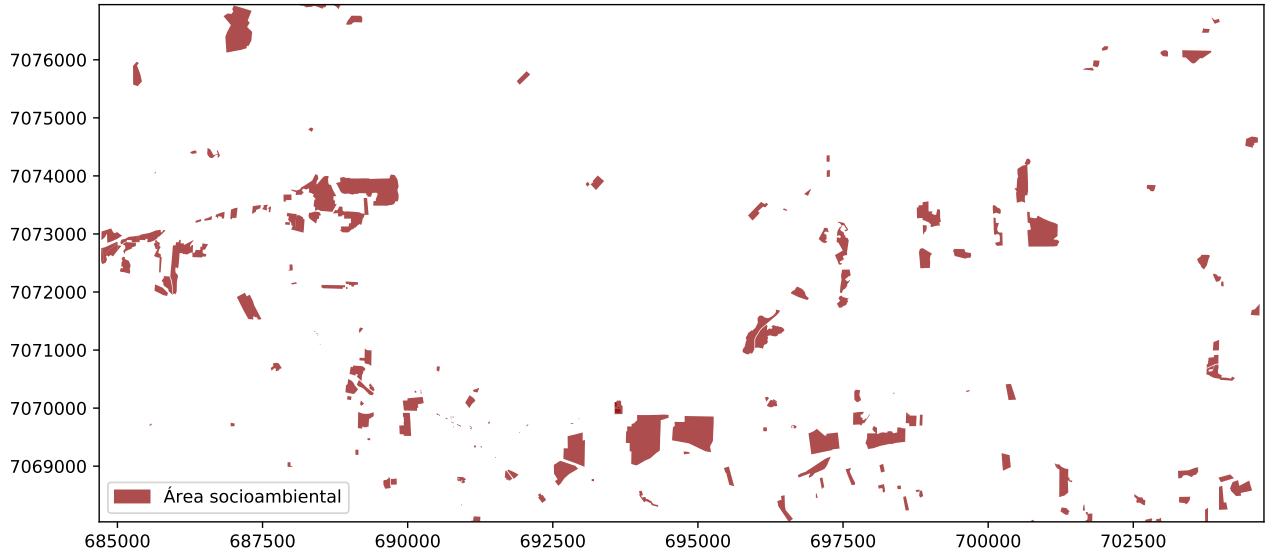


Figura 80: Camada geográfica - Áreas ambiental proibida

