



## OTIMIZAÇÃO DA ROTA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO

Igor Jasmim da Nóbrega

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

Orientador: Marcelo José Colaço

Rio de Janeiro  
Junho de 2019

OTIMIZAÇÃO DA ROTA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO UMA  
METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO

Igor Jasmim da Nóbrega

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

Examinada por:

---

Prof., Marcelo José Colaço, D. Sc.

---

Prof., Daniel Alves Castello, D. Sc.

---

Pesq., Carlos Frederico Trotta Matt, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2019

Nóbrega, Igor Jasmim

Otimização da Rota de Linhas de Transmissão Utilizando uma Metodologia de Avaliação Multicritério/ Igor Jasmim da Nóbrega – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIII, 150 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo José Colaço

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 115-125.

1.linhas de transmissão. 2.*least cost path*. 3.análise multicritério. 4.dijkstra. I. Colaço, Marcelo José. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

## DEDICATÓRIA

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela minha existência, pois *“Todas as coisas foram feitas através dele, e, sem Ele, nada do que existe teria sido feito.”* (João 1.3, BKJA). E também, pela sabedoria, conhecimento e energia que Ele me concedeu durante todo o curso de mestrado e, principalmente, para a conclusão do presente trabalho. Mesmo durante as muitas madrugadas acordado, Ele me sustentava e me conduzia pelo processo de formação do conhecimento, *“O temor do SENHOR é o princípio do conhecimento”* (Provérbios 1.7, BKJA). Meu Pai, Abba, sou grato por tudo que tens feito em minha vida *“Digno é o Cordeiro, que foi morto, de receber a plenitude do poder, riqueza, sabedoria, força, honra, glória e louvor!”* (Apocalipse 5.12, BKJA).

Além disso, quero reconhecer o grande apoio que minha mãe, Solange Jasmim, minha avó, Vanda Jasmim, e toda a minha família me deram durante toda a minha vida e, também, ao longo deste curso. Muito obrigado por terem cuidado de mim desde quando eu não reconhecia minha própria existência e, mesmo nos momentos mais difíceis, continuaram ao meu lado me ajudando. Agora, próximo da obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, posso dizer que vocês são responsáveis por grande parte da pessoa que me tornei.

Este trabalho é dedicado a vocês!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores D. Sc. Marcelo José Colaço e D. Sc. Ricardo Marques Dutra que me ajudaram durante a execução deste trabalho. Além disso, agradeço a todos os professores e colegas que de alguma forma, de maneira direta ou indireta, me ajudaram ao longo do curso de mestrado, bem como, a desenvolver este trabalho de dissertação de mestrado.

Faço um agradecimento especial ao engenheiro M. Sc. Sérgio Roberto F. C. de Melo e a engenheira D. Sc. Vanessa Gonçalves Guedes por todo o apoio, ajuda, paciência e orientação prestados para que eu pudesse fazer o curso de mestrado e terminar o presente trabalho.

Quero agradecer também ao engenheiro Rodrigo Rodrigues, um amigo que me ajudou a desenvolver este trabalho.

Sou grato também pelo grupo do AMBIENTRANS (ELETROBRÁS/CEPEL), composto por: Denise, Juliano, Marcela e Valdir.

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

## OTIMIZAÇÃO DA ROTA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO

Igor Jasmim da Nóbrega

Junho/2019

Orientador: Marcelo José Colaço

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho apresenta um método de avaliação multicritério de traçado de linhas de transmissão com o objetivo de minimizar os custos de implantação do projeto da mesma. No trabalho são utilizadas ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para obter as matrizes de cada critério avaliado. Para a análise multicritério é utilizada a técnica AHP para determinar os pesos dos critérios considerados (Áreas Alagadas, Áreas de Preservação Permanente, Aeroportos, Estrutura, Hidrografia, Rios Navegáveis, Rodovias, Sistema Interligado Nacional, Unidades de Conservação e Uso do Solo). Após isso, é obtida a superfície de custo, ou superfície de atrito, da localidade do estudo. Com essa superfície, é aplicado um algoritmo de grafo para determinar a rota otimizada da linha de transmissão, que é o produto final do presente trabalho.

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

TRANSMISSION LINES ROUTE OPTIMIZATION USING MULTICRITERIA  
EVALUATION METHODOLOGY

Igor Jasmim da Nóbrega

June/2019

Advisor: Marcelo José Colaço

Department: Mechanical Engineering

This work presents a method of multicriteria evaluation of transmission line tracing in order to minimize the project implementation costs. In the work, Geographic Information Systems (GIS) tools are used to obtain the matrices of each evaluated criterion. For the multicriteria analysis, the AHP technique is used to determine the weights of the criteria considered (Alachated Areas, Permanent Preservation Areas, Airports, Structure, Hydrography, Navigable Rivers, Highways, National Interconnected System, Conservation Units and Land Use). After this, the cost surface, or friction surface, of the studied site is obtained. With this surface, a graph algorithm is applied to determine the optimized route of the transmission line, which is the final product of the present work.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
2.1	PROBLEMA GERAL.....	9
2.2	FERRAMENTAS SIG.....	10
2.3	MÉTODO AHP.....	11
2.4	<i>LEAST COST PATH</i> .....	12
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS TÉORICOS .....</b>	<b>15</b>
3.1	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) .....	15
3.2	<i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)</i> .....	19
3.2.1	Estrutura Hierárquica.....	20
3.2.2	Comparações Pareadas e Julgamentos.....	21
3.2.3	Autovetor de Pesos .....	23
3.2.3.1	Método do Autovetor .....	24
3.2.3.2	Método da Média Geométrica .....	25
3.2.4	Avaliação da Relação de Inconsistência.....	26
3.3	<i>LEAST COST PATH</i> .....	32
3.3.1	Superfície de Custo .....	32
3.3.2	Superfície de Custo Acumulado .....	33
3.3.3	Algoritmo de Otimização de DIJKSTRA (1959).....	35
<b>4</b>	<b>CONCEITOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1	TIPOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	37
4.2	CLASSIFICAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	38
4.2.1	Classificação Quanto à Corrente.....	38
4.2.2	Classificação Quanto à Extensão.....	38
4.2.3	Classificação Quanto à Tensão.....	39
4.3	PRINCIPAIS COMPONENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	39
4.3.1	Cabos Condutores.....	39
4.3.2	Cabos de Guarda.....	40

4.3.3 Torres .....	41
4.3.4 Fundações .....	42
4.3.5 Isoladores .....	45
<b>5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
5.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA .....	46
5.2 METODOLOGIA DA PESQUISA .....	49
5.2.1 CRITÉRIOS A SEREM CONSIDERADOS .....	55
5.2.1.1 Áreas Alagadas.....	55
5.2.1.2 Áreas de Preservação Permanente (APP).....	56
5.2.1.3 Aeroportos ou Aeródromos.....	57
5.2.1.4 Estruturas.....	59
5.2.1.5 Hidrografia .....	59
5.2.1.6 Rios Navegáveis .....	60
5.2.1.7 Rodovias.....	61
5.2.1.8 Sistema Interligado Nacional (SIN) .....	62
5.2.1.9 Unidades de Conservação (UC).....	63
5.2.1.10 Uso do Solo .....	65
5.2.2 MÉTODO AHP (PESOS) E VALORES MONETÁRIOS .....	67
5.2.2.1 Pesos AHP .....	67
5.2.2.2 Enxame de Partículas.....	70
5.2.2.3 Valores Monetários .....	71
5.2.3 <i>LEAST COST PATH</i> .....	72
5.2.3.1 Superfície de Atrito.....	72
5.2.3.2 <i>Least Cost Path</i> .....	72
5.2.3.3 Algoritmo DIJKSTRA (1959).....	75
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>78</b>
6.1 CASO 1 .....	78
6.2 CASO 2.....	79
6.3 CASO 3.....	81
6.4 CASO 4.....	83
6.5 CASO 5.....	86
6.6 CASO 6.....	89

6.7	CASO 7.....	91
6.8	CASO REAL.....	93
6.8.1	Valores Monetários.....	93
6.8.1.1	Torres e Fundações Utilizadas.....	93
6.8.1.2	Custos Estimados de LT por Tipo de Torre.....	94
6.8.1.3	Custos Estimados.....	94
6.8.1.4	Estruturas.....	96
6.8.1.5	Aeroportos.....	96
6.8.1.6	Áreas alagadas.....	97
6.8.1.7	Áreas de Preservação Permanente.....	97
6.8.1.8	Hidrografia.....	99
6.8.1.9	Rios Navegáveis.....	100
6.8.1.10	Rodovias.....	102
6.8.1.11	Sistema Interligado Nacional.....	103
6.8.1.12	Unidades de Conservação.....	104
6.8.1.13	Uso do solo.....	105
6.8.2	PESOS AHP.....	106
6.8.3	OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADO - <i>LEAST COST PATH</i> .....	109
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>112</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO I – ALGORITMO PARA DETERMINAR O RI.....</b>	<b>126</b>
	<b>ANEXO II – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE LT PARA CADA TIPO DE ESTRUTURA.....</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXO III – ALGORITMO ENXAME DE PARTÍCULAS.....</b>	<b>140</b>
	<b>ANEXO IV – ALGORITMO DIJKSTRA.....</b>	<b>144</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema Interligado Nacional. ....	2
Figura 2 – Participação dos tipos de tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil. .....	4
Figura 3 – Representação de um ambiente SIG. ....	18
Figura 4 – Modelo de estrutura hierárquica para alternativas de compra de equipamento. .....	21
Figura 5 – Valores de RI ( <i>Random Index</i> ). ....	27
Figura 6 – Histograma dos valores de 100.000 índices CI para matriz de ordem 5. ....	30
Figura 7 – Histograma dos valores de 100.000 índices CI para matriz de ordem 25. ....	31
Figura 8 – Histograma dos valores de 100.000 índices CI para matriz de ordem 45. ....	31
Figura 9 – Custo de travessia de pixels (células) adjacentes. ....	34
Figura 10 – Exemplo de LT. ....	36
Figura 11 – Exemplos de torres: (a) autoportante; (b) estaiada. ....	42
Figura 12 – Exemplo de superfície $F(x, y)$ . ....	47
Figura 13 – Três tipos de padrões de identificação de pixels adjacentes num arquivo de formato <i>raster</i> . ....	48
Figura 14 – Localização da área de estudo para realizar o estudo de traçado de LT. ....	52
Figura 15 – Localização da área de estudo para realizar o estudo de traçado de LT, com representação de empreendimentos eólicos, subestações e SIN. ....	53
Figura 16 – Localização da área de estudo para realizar o estudo de traçado de LT, com representação do ponto de conexão e a subestação. ....	54
Figura 17 – Fluxograma da metodologia. ....	55
Figura 18 – Representação geográfica, <i>raster</i> , das áreas alagadas na região de estudo. ....	56
Figura 19 – Representação geográfica, <i>raster</i> , das áreas APP associadas à vegetação rasteira na região de estudo. ....	57
Figura 20 – Representação geográfica, <i>raster</i> , dos aeroportos na região de estudo. ....	58
Figura 21 – Representação geográfica, <i>raster</i> , da hidrografia na região de estudo. ....	60
Figura 22 – Representação geográfica, <i>raster</i> , dos rios navegáveis na região de estudo. .....	61
Figura 23 – Representação geográfica, <i>raster</i> , de rodovias na região de estudo. ....	62
Figura 24 – Representação geográfica, <i>raster</i> , do Sistema Interligado Nacional (SIN) na região de estudo. ....	63
Figura 25 – Representação geográfica, <i>raster</i> , das Unidades de Conservação (UC) na região de estudo. ....	65
Figura 26 – Representação geográfica, <i>raster</i> , do Uso do Solo na região de estudo. ....	66
Figura 27 – Representação geográfica, <i>raster</i> , de áreas urbanas na região de estudo. ....	67
Figura 28 – Índice CR para cada iteração do processo. ....	69
Figura 29 – Malha de pontos (centroídes dos pixels) e segmentos entre os mesmos. ...	73
Figura 30 – Exemplo de caminho de menor custo. ....	74
Figura 31 – Algoritmo de DIJKSTRA (1959). ....	76
Figura 32 – Caso 1. ....	79
Figura 33 – Caso 2. ....	80
Figura 34 – Caso 3 superfície 1. ....	81
Figura 35 – Caso 3 superfície 2. ....	83
Figura 36 – Caso 4 superfície 1. ....	84
Figura 37 – Caso 4 superfície 2. ....	85
Figura 38 – Caso 4 superfície 1 x superfície 2. ....	86

Figura 39 – Caso 5 superfície 1.....	87
Figura 40 – Caso 5 superfície 2.....	88
Figura 41 – Índice CR para cada iteração (Caso 6).....	90
Figura 42 – Caso 6.....	91
Figura 43 – Caso 7: caminho gerado pelo programa ArcGIS. ....	92
Figura 44 – Caso 7: caminho gerado pelo algoritmo desenvolvido, iniciando no ponto A e finalizando no ponto B.....	92
Figura 45 – Caso 7: caminho gerado pelo algoritmo desenvolvido, iniciando no ponto B e finalizando no ponto A. ....	93
Figura 46 – Faixa de passagem de um LT.....	99
Figura 47 – Travessia de LT em águas navegáveis.....	101
Figura 48 – Travessia de LT em rodovias.....	103
Figura 49 – Rota gerada pelo algoritmo DIJKSTRA (1959) utilizando a superfície de atrito criada pelo método AHP.....	109
Figura 50 – Rota gerada pelo algoritmo DIJKSTRA (1959) utilizando a superfície de atrito criada pelo método de custo.....	110
Figura 51 – Comparação das rotas geradas pelo algoritmo DIJKSTRA (1959).....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empreendimentos de geração de energia elétrica em operação. ....	3
Tabela 2 – Previsão de expansão de geração e transmissão do SIN. ....	4
Tabela 3 – Estimativa da evolução física das linhas de transmissão do SIN. ....	5
Tabela 4 – Evolução da capacidade instalada por fonte de geração. ....	7
Tabela 5 – Escala de importância de comparações pareadas. ....	22
Tabela 6 - Critérios utilizados para realizar os estudos sobre a otimização do traçado de LT. ....	50
Tabela 7 – Classificação quanto aos números identificadores, Figura 26, das classes do critério Uso do Solo. ....	66
Tabela 8 – Aplicação do método AHP, matriz de comparações pareadas. ....	68
Tabela 9 – Classificação de prioridades dos critérios considerados. ....	69
Tabela 10 – Comprimento e custo Caso 1. ....	79
Tabela 11 – Comprimento e custo Caso 2. ....	80
Tabela 12 – Comprimento e custo Caso 3 superfície 1. ....	82
Tabela 13 – Comprimento e custo Caso 3 superfície 2. ....	83
Tabela 14 – Comprimento e custo Caso 4 superfície 1. ....	84
Tabela 15 – Comprimento e custo Caso 4 superfície 2. ....	85
Tabela 16 – Comprimento e custo Caso 5 superfície 1. ....	88
Tabela 17 – Comprimento e custo Caso 5 superfície 2. ....	89
Tabela 18 – Matriz de comparações pareadas e o autovetor de pesos antes do algoritmo para minimizar o CR. ....	89
Tabela 19 – Matriz de comparações pareadas e o autovetor de pesos depois do algoritmo para minimizar o CR. ....	90
Tabela 20 – Custo para construção de LT para cada tipo de torre. ....	94
Tabela 21 – Custos estimados para cada um dos critérios e suas respectivas classes. ....	95
Tabela 22 – Relação de custos: LT aérea × LT subterrânea. ....	96
Tabela 23 – Comparação de custos de construção: LT aérea × LT subterrânea. ....	97
Tabela 24 – Custo de travessia da feição APP. ....	97
Tabela 25 – Custo de travessia da feição Hidrografia. ....	100
Tabela 26 – Distâncias básicas. ....	101
Tabela 27 – Custo de travessia da feição Uso do Solo. ....	106
Tabela 28 – Resultado dos pesos pelo método AHP, ver Tabela 8. ....	107
Tabela 29 – Comparação das rotas obtidas pelo algoritmo de DIJKSTRA (1959). ....	110
Tabela 30 – Custo direto básico, para estrutura em aço autoportante convencional (DUCK). ....	129
Tabela 31 – Estudos de Engenharia, Custos Ambientes e Administração Local, para estrutura em aço autoportante convencional (DUCK). ....	130
Tabela 32 – Custos indiretos, para estrutura em aço autoportante convencional (DUCK). ....	130
Tabela 33 – Custo direto básico, para estrutura em aço estaiada convencional (DOVE). ....	131
Tabela 34 – Estudos de Engenharia, Custos Ambientes e Administração Local, para estrutura em aço estaiada convencional (DOVE). ....	132
Tabela 35 – Custos indiretos, para estrutura em aço estaiada convencional (DOVE). ....	133

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo o ONS (2018), o sistema de produção e transmissão de energia elétrica brasileiro é um sistema composto hidro-termo-eólico de grande porte, sendo que, dentre essas formas de geração de energia, existe uma predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional, também conhecido como SIN, é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

Os sistemas elétricos são interconectados através da malha de transmissão. Essa interconexão possibilita a transferência de energia entre subsistemas, permitindo assim obter ganhos sinérgicos, bem como explorar a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão de energia elétrica proporciona o atendimento ao mercado com segurança e economicidade (ONS, 2018).

Como foi citado anteriormente, a capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas. Essas usinas estão distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Além disso, nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, resultando em um aumento da importância dessa fonte de geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor. A Figura 1 apresenta o SIN no horizonte de 2017 (ONS, 2018).

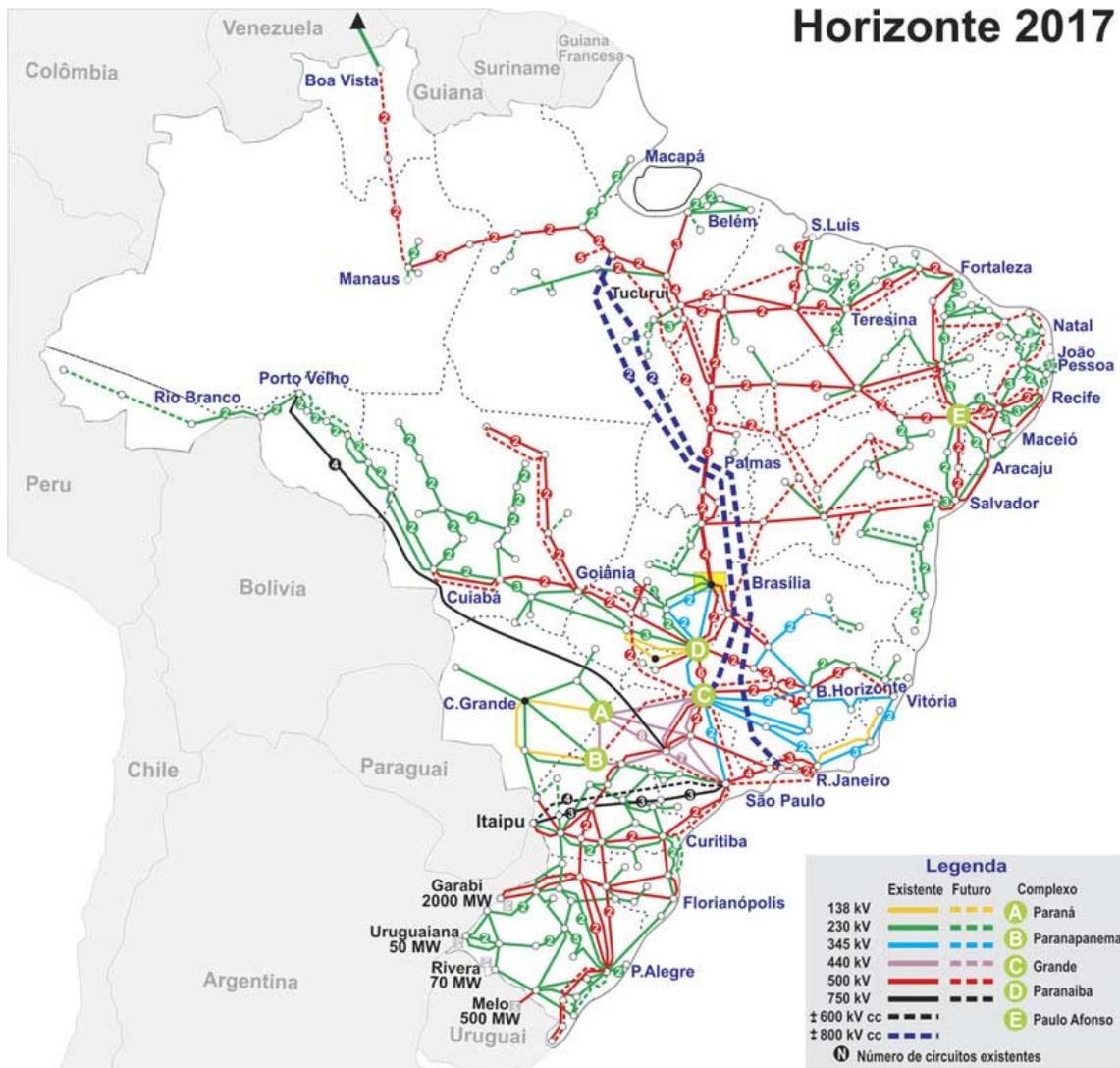


Figura 1 – Sistema Interligado Nacional.  
Fonte: ONS, 2018.

O Banco de Informações de Geração (BIG) cita que o Brasil possui, em 2019, 7.425 empreendimentos de geração de energia elétrica, totalizando 163.794.232 kW de potência instalada (ANEEL, 2019). A seguir, a Tabela 1 apresenta os tipos de tecnologias utilizadas na geração de energia elétrica, bem como a quantidade e potência outorgada e fiscalizada. As siglas utilizadas para diferenciar os tipos de tecnologia de geração de energia são: Central Geradora Hidrelétrica (CGH) – potência instalada de até 1,0 MW; Central Geradora Undi-elétrica (CGU) – usina que gera energia a partir das ondas; Central Geradora Eólica (EOL); Pequena Central Hidrelétrica (PCH) – potência instalada entre 1,0 MW e 30,0 MW e que esteja de acordo com ANEEL (2003); Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV); Usina Hidrelétrica (UHE) – potência instalada

maior que 30,0 MW; Usina Termelétrica (UTE); e Usina Termonuclear (UTN) (ANEEL, 2019).

Tabela 1 – Empreendimentos de geração de energia elétrica em operação.  
Fonte: ANEEL, 2019.

<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>Potência Fiscalizada (kW)</b>	<b>%</b>
<b>CGH</b>	698	708.794	708.608	0,43
<b>CGU</b>	1	50	50	0,00
<b>EOL</b>	604	14.878.689	14.832.793	9,06
<b>PCH</b>	425	5.216.829	5.174.756	3,16
<b>UFV</b>	2.469	2.076.252	2.074.002	1,27
<b>UHE</b>	217	102.529.978	98.581.478	60,19
<b>UTE</b>	3.009	41.990.474	40.432.545	24,68
<b>UTN</b>	2	1.990.000	1.990.000	1,21
<b>Total</b>	<b>7.425</b>	<b>169.391.066</b>	<b>163.794.232</b>	<b>100,00</b>

Os valores de porcentagem apresentados na Tabela 1 estão relacionados com a Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é a mesma considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual aquela considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora. A Figura 2 apresenta um gráfico contendo o percentual de participação de cada tecnologia de geração de energia elétrica no Brasil, segundo a ANEEL (2019). É possível notar a predominância da tecnologia que utiliza recursos hídricos. Outra tecnologia que está aumentando sua participação na matriz geradora do país é a energia eólica.

## Potência(%)

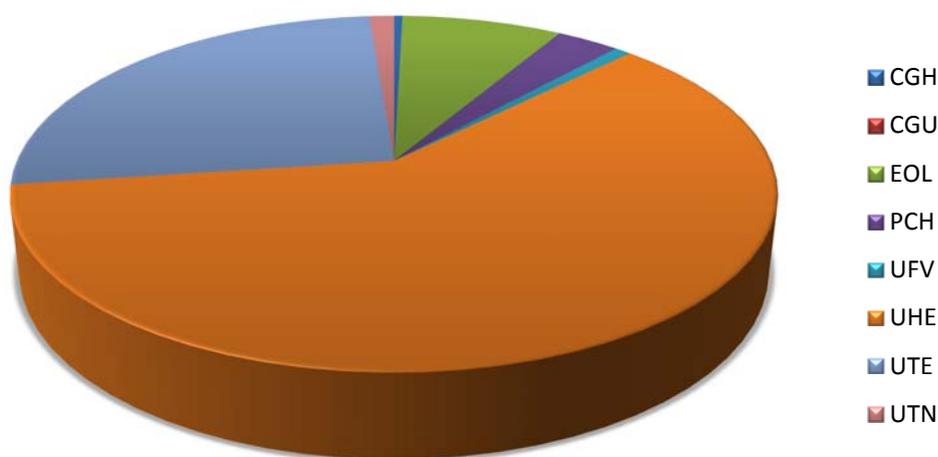


Figura 2 – Participação dos tipos de tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil.  
Fonte: ANEEL, 2019 (Adaptado).

Além disso, existe uma previsão para que nos próximos anos seja realizada uma adição de 19.602.784 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 149 empreendimentos atualmente em construção e mais 423 com construção não iniciada (ANEEL, 2019). A Tabela 2, apresenta, de maneira resumida, a previsão de expansão da capacidade instalada de geração elétrica e de linhas de transmissão no SIN.

Tabela 2 – Previsão de expansão de geração e transmissão do SIN.  
Fonte: MME-EPE, 2017.

	2016	2021	2026	2016-2026	
				Incremento	%
Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Sistema Interligado Nacional (GW)	148,4	179,4	212,5	64,1	43%
Linhas de Transmissão (km)	134.956	167.232	196.839	61.883	46%

Para o caso da estimativa da expansão de construção de linhas de transmissão, a Tabela 3 mostra a projeção de evolução das LTs. Nessa tabela, os dados são apresentados com maiores detalhes especificando os tipos de linhas que poderão ser construídas, classificadas quanto ao nível de tensão de operação das mesmas, com distância em km (MME-EPE, 2017).

Tabela 3 – Estimativa da evolução física das linhas de transmissão do SIN.  
 Fonte: MME-EPE, 2017.

<b>Tensão</b>	<b>±800kV</b>	<b>750kV</b>	<b>±600kV</b>	<b>500kV</b>	<b>440kV</b>	<b>345kV</b>	<b>230kV</b>	<b>TOTAL (km)</b>
<b>Existente em 2016</b>	-	2.683	12.816	46.569	6.748	10.320	55.820	134.956
<b>Evolução 2017-2026</b>	12.078	0	0	30.737	439	1.337	17.293	61.884
<b>Evolução 2017-2021</b>	9.158	0	0	14.778	316	802	7.222	32.276
<b>Evolução 2022-2026</b>	2.920	0	0	15.959	123	535	10.071	29.608
<b>Estimativa 2026</b>	12.078	2.683	12.816	77.306	7.187	11.656	73.113	196.839

A Tabela 4 apresenta os detalhes para a estimativa de evolução da capacidade instalada por fonte de geração. Os dados de evolução apresentados não consideram a autoprodução de uso exclusivo que, para os estudos energéticos, é representada como abatimento de carga. Os valores da tabela indicam a projeção da potência instalada em dezembro de cada ano, considerando a motorização das UHE. Essa tabela inclui as usinas de biomassa de bagaço de cana. Para as usinas a bagaço de cana, os empreendimentos são contabilizados com a potência instalada total. Para o caso dos dados do gás natural, é incluído também o montante de gás de processo. As usinas termelétricas movidas a óleo diesel e óleo combustível são retiradas do Plano de Expansão de Referência nas datas de término de seus contratos. A Alternativa Indicativa de Ponta pode contemplar termelétricas de ciclo aberto, usinas reversíveis, motorização adicional de hidrelétricas, baterias ou gerenciamento da demanda. As informações da UHE Itaipu (50 Hz), pertencente ao Paraguai, representam o excedente de energia que é exportado para o mercado brasileiro (MME-EPE, 2017).

Esta expansão de geração e transmissão de energia elétrica demanda a construção de novas linhas de transmissão para conectar os novos empreendimentos ao SIN. Além disso, existe um crescimento do consumo de energia que demanda reforços nas interligações existentes e construção de novos trechos (LIMA, 2015).

A metodologia proposta no presente trabalho tem como fundamento a utilização de ferramentas SIG (Sistema de Informações Geográficas), que permitem a análise e tratamento de dados espaciais, e uma técnica de avaliação multicritério para ponderar os critérios considerados no estudo.

Uma forma eficaz para conduzir esta análise é utilizar comparações pareadas. A justificativa é que isso possibilita ao tomador de decisão considerar duas alternativas de cada vez. Dessa forma, a estratégia é decompor o problema original em subproblemas menores (BRUNELLI, 2015). O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), proposto por SAATY (1987), foi escolhido por causa de sua eficiência na determinação de pesos de múltiplos critérios através de comparações pareadas e de sua praticidade de implementação.

Tabela 4 – Evolução da capacidade instalada por fonte de geração.  
Fonte: MME-EPE, 2017.

<b>FONTE</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>
<b>RENOVÁVEIS</b>	118.445	127.711	136.886	141.212	143.548	146.974	150.687	154.477	158.383	162.489	166.690
<b>HIDRO</b>	89.698	94.846	99.846	102.008	102.008	102.008	102.150	102.268	102.501	102.937	103.466
<b>OUTRAS RENOVÁVEIS</b>	28.747	32.865	37.040	39.204	41.540	44.966	48.538	52.209	55.882	59.552	63.223
<b>PCH e CGH</b>	5.820	6.052	6.270	6.393	6.658	6.658	6.958	7.258	7.558	7.858	8.158
<b>EÓLICA</b>	10.025	12.843	15.598	16.645	17.645	19.450	21.254	23.058	24.862	26.666	28.470
<b>BIOMASSA</b>	12.881	13.010	13.182	13.506	13.577	14.199	14.666	15.234	15.802	16.368	16.936
<b>SOLAR CENTRALIZADA</b>	21	960	1.990	2.660	3.660	4.660	5.660	6.660	7.660	8.660	9.660
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	22.947	23.538	23.566	23.906	25.427	25.427	25.427	26.735	25.751	24.852	26.634
<b>URÂNIO</b>	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	3.395
<b>GÁS NATURAL</b>	12.532	13.123	13.151	13.151	14.672	14.672	14.672	16.172	16.172	16.756	17.339
<b>CARVÃO</b>	3.174	3.174	3.174	3.514	3.514	3.514	3.514	3.514	3.514	3.514	3.514
<b>ÓLEO COMBUSTÍVEL</b>	3.721	3.721	3.721	3.721	3.721	3.721	3.721	3.721	3.287	1.805	1.774
<b>ÓLEO DIESEL</b>	1.530	1.530	1.530	1.530	1.530	1.530	1.530	1.337	787	787	612
<b>ALTERNATIVA INDICATIVA DE PONTA</b>						994	2.532	4.334	8.002	12.198	12.198
<b>TOTAL DO SIN</b>	141.392	151.249	160.452	165.118	168.974	173.395	178.646	185.546	192.136	199.539	205.522
<b>Itaipu (50 Hz)</b>	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
<b>TOTAL DISPONÍVEL</b>	148.392	158.249	167.452	172.118	175.974	180.395	185.646	192.546	199.136	206.539	212.522

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para determinar o caminho de menor custo de uma linha de transmissão, ou a rota ótima considerando o aspecto econômico, visando reduzir os custos de implantação da mesma, utilizando ferramentas de SIG e uma metodologia de avaliação multicritério.

Os objetivos específicos são:

- utilizar a metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) no tocante ao estudo de desenvolvimento de avaliação multicritério;
- desenvolver uma integração da metodologia proposta com arquivos gerados em ambiente SIG;
- aplicar o algoritmo de DIJKSTRA (1959) para determinar o caminho de menor custo (*least cost path*), usando como dados de entrada arquivos do tipo *raster*, tipo de imagem de computador baseada em uma malha retangular de *pixels* (CAMBRIDGE, 2018).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROBLEMA GERAL

Segundo HOSSEINI e BAHMANI (2011) a otimização é uma das questões mais importantes em todas as áreas de engenharia. Com isso, a utilização generalizada de ferramentas SIG e sua combinação com métodos de Algoritmo Genético (AG) oferecem uma solução prática para determinar a rota de uma LT de energia elétrica. Este trabalho avalia os pontos disponíveis para a instalação de torres de energia utilizando o método AHP para análise de decisão multicritério e depois com o AG encontra o caminho ótimo entre a origem e o destino.

Para DEMIRCAN *et al.* (2011) existe uma demanda crescente por energia. Por esse motivo, determinar a rota de uma LT está se tornando importante. O objetivo é encontrar um resultado ótimo considerando seus critérios importantes, determinado por especialistas. Isso não significa o caminho mais curto para o problema. Por isso, não foi utilizado o algoritmo clássico de caminho mais curto. O planejamento da rota da LT foi baseado em ferramentas SIG.

LIMA (2015) desenvolveu uma metodologia de otimização de traçados de linhas de transmissão (LT) em relação a custos de implantação. A otimização foi realizada utilizando ferramentas SIG para simulação de rotas de menor custo (*least cost path*) do programa comercial QGIS 2.6.0. Aos critérios foram atribuídos pesos de duas formas: custos reais (R\$/km) de travessia de uma LT; e determinação de pesos pelo método AHP. Após uma ponderação, os critérios foram integrados por meio de álgebra de mapas<sup>1</sup> e ferramentas *least cost path* foram aplicadas para obter rotas otimizadas.

Para EROĞLU e AYDIN (2015) determinar a melhor rota em uma área de estudo muito complexa é um dos problemas mais importantes para a construção de LT. Atualmente, em problemas de engenharia, especialmente para determinar rotas, as ferramentas SIG são as mais poderosas. Neste estudo, o AHP e Fuzzy AHP foram utilizados para ponderar os critérios relevantes para a LT. Os mapas digitais da área de estudo foram editados, convertidos em formato em *raster* e reunidos, de maneira ponderada, usando o programa comercial ArcGIS Desktop 10. Após realizar a soma

---

<sup>1</sup> O termo "Álgebra de Mapas" é utilizado na literatura de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto para denotar o conjunto de operadores que manipulam campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno).

ponderada das matrizes de cada critério, foi utilizada uma ferramenta de *least cost path* do ArcGIS para encontrar o traçado ótimo.

De acordo com GRASSI (2014) planejar infraestruturas lineares (modificações antropogênicas que interferem numa matriz florestal provocada pela construção de estradas, rodovias, ferrovias, canais, linhas de energia e de gás) pode ser uma tarefa difícil para regiões caracterizadas por topografia complexa, restrições naturais e áreas de alta densidade populacional. Esses aspectos tornam o planejamento de LT complexo e demorado. O trabalho propõe um método que utiliza as abordagens de análise multicritério e *least cost path*. O método é aplicado a um estudo de caso em que uma LT antiga precisa ser substituída por uma nova.

## 2.2 FERRAMENTAS SIG

COWEN *et al.* (2000) desenvolvem um modelo de seleção de rota para novos trilhos de ferrovia assistido por SIG e sensoriamento remoto. Para solução deste problema os autores empregaram um modelo de roteamento econométrico em um *raster* para a exploração de potenciais rotas usando como critérios: custo de construção; passagens de nível e de estrada; travessias de fluxo; e custo do trajeto. O modelo de caminho otimizado pode ser usado para identificar rapidamente uma variedade de rotas potenciais com base nos fatores de custo mais importantes.

Em SHU *et al.* (2012) é apresentada uma metodologia para o problema de planejamento de redes de energia baseado em um arquivo *raster* com ferramentas SIG. Considerando as linhas candidatas e as ligações das células, o modelo de planejamento proposto integra o roteamento de linha elétrica ideal e a avaliação da rede de energia, com o objetivo do custo mínimo de investimento da linha.

De acordo com SCHMIDT (2009) a utilização de ferramentas de análise espacial SIG na padronização das metodologias para construção de LT tem um grande potencial para ajudar a definir novos traçados ótimos. Uma metodologia padrão que incorpora múltiplas perspectivas de influência ponderada pode ajudar na aprovação governamental da rota, na permissão de entidades reguladoras e no apoio do público afetado.

Em MONTEIRO *et al.* (2005) os autores propõem uma metodologia para seleção de rota para a construção de novas LT, utilizando ferramentas SIG. São consideradas:

restrições ambientais; custos de operação, manutenção, instalação e equipamentos; e custos associados com a inclinação do terreno atravessado pela LT. As ferramentas SIG são exploradas para a seleção de corredores econômicos, mantendo os custos totais sob um limite imposto.

### 2.3 MÉTODO AHP

Para BRUNELLI (2015) os tomadores de decisão estão mais relutantes em tomar decisões baseadas em sentimentos e palpites. Ao invés disso, preferem usar ferramentas analíticas e quantitativas baseando suas decisões de maneira mais sólida. Muitos métodos provaram ser úteis para ajudar na tomada de decisões e, entre estes métodos, há aqueles que exigem, como entradas, julgamentos subjetivos de um especialista. É neste contexto que o AHP torna-se uma ferramenta útil para a análise de decisões.

HUSAIN *et al.* (2012) realizaram um estudo com o objetivo de determinar a melhor rota de LT usando AHP e SIG. O roteamento da LT considera uma variedade de critérios para encontrar o caminho ótimo como: traçados alternativos que equilibram a contribuição da comunidade com o impacto ambiental mais convincente; a capacidade de construção; o uso da terra atual e futura; os custos do projeto; e as necessidades de um sistema elétrico.

ADAMCSEK (2008) afirma que o método AHP permite que os tomadores de decisão possam modelar um problema complexo em uma estrutura hierárquica, mostrando a relação das metas, objetivos (critérios) e alternativas. Este processo é constituído por vários componentes, tais como: estruturação hierárquica de complexidade; comparações de pares; juízos ou vetor para derivar pesos; e considerações de consistência.

NISHIZAWA e TAKAHASHI (2009) demonstram que o Método dos Mínimos Quadrados ponderado e o Método Logarítmico de Mínimos Quadrados, dentre os vários métodos existentes para resolver um sistema de rede de avaliação mútua (incluindo o AHP), são superiores aos outros. Ambos os métodos podem resolver problemas de determinar o vetor de prioridades ou pesos, sem quaisquer restrições.

No trabalho de ALONSO e LAMATA (2006) é apresentada uma metodologia para determinar um critério estatístico de maneira a avaliar as matrizes de comparação de pares recíprocos na hierarquia do processo analítico para saber se as mesmas devem

ou não ser aceitas. Além disso, os autores avaliaram a consistência<sup>2</sup> de matrizes aleatórias de diferentes dimensões.

## 2.4 *LEAST COST PATH*

Segundo LEE e STUCKY (1998) o conceito de caminho de custo mínimo (*least cost path*) na área de computação foi proposto e discutido durante décadas, porém apenas de maneira simplificada porque os recursos computacionais eram limitados no passado. Entretanto, com o evolução da tecnologia dos computadores no tocante à velocidade e ao armazenamento de dados, tornou-se possível implementar algoritmos que determinam rotas otimizadas e aplicá-los em condições realistas.

De acordo com BAGLI *et al.* (2011) a análise de caminho de menor custo (*least cost path*) permite encontrar a melhor rota para ligar dois pontos sobre uma superfície de custo. Esta superfície pode ser obtida através da combinação de vários critérios como impacto ambiental, investimento econômico etc. Este procedimento pode ser facilmente implementado com ferramentas SIG e, conseqüentemente, tem sido amplamente utilizado para apoiar o planejamento e traçado de diferentes tipos de infraestruturas lineares (estradas e oleodutos). Aquele trabalho apresenta uma integração da avaliação multicritério e da análise de caminho de menor custo para identificar a rota ótima para uma LT, considerando como critérios: custo, visibilidade, densidade populacional e naturalidade do ecossistema.

Para COLLISCHONN e PILAR (2000), ao planejar rotas potenciais para estradas e canais, a topografia geralmente atua como uma restrição significativa. Existem possibilidades de trajetórias quase infinitas entre dois pontos, porém o caminho selecionado deve ser uma boa aproximação daquele com o menor custo. Aquele artigo apresenta um algoritmo de menor custo desenvolvido para encontrar o melhor caminho dados a topografia, os pontos inicial e final da característica linear (canal ou estrada) e uma função relacionando inclinação, distância e custo. O algoritmo é baseado em técnicas de programação dinâmica adaptadas para resolver problemas em uma estrutura matricial que é normalmente usada por ferramentas SIG.

---

<sup>2</sup> Se os pesos dos critérios são conhecidos:  $w_1; w_2; \dots; w_n$ , e  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ , a matriz é consistente se, e somente se,  $w_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \forall i, j$  (BRUNELLI, 2015). Este conceito é definido com maiores detalhes no tópico 3.2.4.

DOUGLAS (1994) afirma que uma das aplicações mais interessantes e potencialmente úteis dos sistemas de informação geográfica é o cálculo sobre um espaço mapeado das rotas mais rápidas, mais curtas, de menor custo ou menos impacto, dado um mapa da área com seus atritos, custos ou impedimentos.

No presente trabalho foram utilizadas ferramentas SIG de geoprocessamento de dados, para tratar e compatibilizar os dados (topografia, bases cartográficas e outras informações georreferenciadas) a um formato compatível com o código elaborado em ambiente de programação MATLAB®. A maneira como foi alcançado o objetivo de compatibilizar qualquer dado georreferenciado relevante ao estudo a um formato utilizado estará sendo explicada com maiores detalhes nos próximos capítulos do trabalho.

A análise multicritério utilizada neste trabalho foi o método AHP, cujo objetivo foi encontrar os pesos dos critérios de cada dado de entrada relevante para definição do traçado de uma linha de transmissão. Nos trabalhos pesquisados na literatura, esta matriz de comparações é fornecida pelo usuário final da metodologia, que utiliza seus conhecimentos para defini-la de modo subjetivo. As matrizes de comparação obtidas apresentam um índice de inconsistência elevado (acima de 40%) que se reflete nos resultados finais do traçado. De modo a reduzir o índice de inconsistência a um valor aceitável, abaixo de 10%, foi desenvolvido um algoritmo para determinar a matriz de comparações pareadas através de um método de otimização heurístico, conhecido como Enxame de Partículas. Com este algoritmo foi gerada uma nova matriz de julgamentos que atende à restrição do índice de inconsistência, permitindo ao usuário realizar algumas modificações a partir do seu conhecimento, porém agora de forma consistente e, então, classificar os pesos a serem utilizados no método. Essa técnica foi sintetizada em um algoritmo no programa MATLAB®, cujo código encontra-se no anexo deste trabalho.

Além do método AHP, foi aplicado um método de análise de custos reais de construção de uma LT para cada um dos critérios considerados, de acordo com as referências. O método AHP e os custos reais geram os pesos da soma ponderada dos critérios. Com a metodologia proposta foi possível obter uma superfície de custo obtida a partir de um processo denominado de álgebra de mapas. Esse processo foi implementado no ambiente de programação MATLAB®.

Por fim, para determinar o caminho ótimo, ou seja, qual seria a alternativa de menor custo na elaboração de uma linha de transmissão na área de estudo, foi

implementado o algoritmo de DIJKSTRA (1959), algoritmo baseado na teoria de grafos, no ambiente de programação MATLAB®.

Uma importante contribuição deste trabalho foi a integração de códigos e metodologias citadas na literatura no intuito de elaborar ferramenta única para determinar o traçado de LT. Outra importante contribuição foi o desenvolvimento de todos os códigos e metodologias integradas em MATLAB®, permitindo assim que futuramente outros trabalhos possam ser integrados no intuito de melhorar o objetivo final de traçado otimizado de linhas de transmissão.

Citando uma terceira contribuição, o método AHP foi adaptado de forma a possibilitar a elaboração do estudo com matrizes de qualquer tamanho e, conseqüentemente, com inúmeros critérios que podem ser levados em consideração na elaboração de um traçado de uma linha de transmissão, ou de qualquer outra análise. Um destes algoritmos ajuda o usuário a encontrar uma matriz de comparações pareadas que esteja dentro das especificações de aceitação, baseando-se nas especificações utilizadas na literatura.

Citando uma última contribuição, de forma distinta às formas utilizadas na literatura especializada, o algoritmo de DIJKSTRA (1959) foi implementado de maneira a trabalhar com superfícies de atrito georreferenciadas, para elaborar caminhos de custo mínimo em matrizes que representam projeções destas superfícies em um plano cartesiano.

No próximo capítulo serão apresentados os principais conceitos teóricos sobre ferramentas SIG, o método AHP, o algoritmo para determinar o caminho de menor custo e, por fim, alguns conceitos sobre linhas de transmissão.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados os principais fundamentos teóricos relacionados à metodologia proposta para a otimização do traçado de linhas de transmissão. A divisão do mesmo está descrita nos parágrafos abaixo.

O primeiro tópico trata de conceitos sobre Sistemas de Informações Geográficas (SIG), pois a metodologia de otimização será aplicada a uma região georreferenciada do Brasil. Esses dados em formato SIG são importantes para determinar os custos de travessia das diferentes feições geográficas (fisiográficas, ambientais e socioeconômicas da área de estudo), como: aeroportos; áreas alagadas; áreas de preservação permanente (APP); hidrografia; rios navegáveis; unidades de conservação; e uso do solo.

O segundo tópico aborda o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) apresentando seus conceitos como estrutura hierárquica, comparações pareadas e julgamentos, autovetor de pesos e a avaliação da consistência dos julgamentos.

O terceiro item de fundamentos teóricos apresenta a superfície de custo que é obtida a partir da álgebra de mapas e do método AHP. Além disso, são abordados os conceitos do algoritmo de DIJKSTRA (1959) que foi aplicado no presente trabalho para obter a rota otimizada da linha de transmissão.

O último tópico trata da revisão dos conceitos relacionados a linhas de transmissão (LT) como, por exemplo, corrente e tensão, cabos condutores, isoladores, torres e fundações.

#### 3.1 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Uma parcela fundamental das atividades de sociedades organizadas era obter informações sobre animais e plantas, distribuição geográfica e demarcação de propriedades. Entretanto, até alguns anos atrás, esses estudos eram realizados apenas em documentos e mapas em papel e, por causa disso, não era possível realizar uma análise que combinasse diversos dados e mapas. O desenvolvimento da tecnologia da informação possibilitou armazenar e representar essas informações computacionalmente, o que abriu espaço para o geoprocessamento (CÂMARA *et al.*, 2001).

Os Sistemas de Informações Geográficas são programas especializados no processamento e análise de dados espaciais que constituem a ferramenta diretamente manuseada pelos usuários, ou seja, que tornam mais amigável a relação de dados geográficos com os usuários finais. A capacidade desses sistemas para integrar informações de origens e formatos diversos, mantendo tanto a expressão numérica quanto geográfica das variáveis, tem demonstrado potencial cada vez maior para avaliações e diagnósticos (MELO, 2018).

Geoprocessamento é a disciplina que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para tratar a informação geográfica. Esse estudo vem influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, comunicações, energia, planejamento urbano e regional, recursos naturais e transportes. Os SIG são as ferramentas computacionais para geoprocessamento. Essas ferramentas permitem elaborar análises complexas, integrando dados de diversas fontes e gerando bancos de dados georreferenciados (CÂMARA *et al.*, 2001).

O geoprocessamento é amplamente utilizado em empresas de *utilities* de diversos ramos, como distribuidoras de energia, gás e água, operadoras de telecomunicações, gestão de logística, entre outras. As características de distribuição geográfica dos componentes da rede elétrica tornam-se atualmente essenciais para subsidiar tomadas de decisão. Neste contexto, o geoprocessamento surge como tecnologia de elevado potencial para auxiliar no processo de tomada de decisão relativo ao traçado de linhas de transmissão. O geoprocessamento consiste em um conjunto de tecnologias que reúne numerosos recursos para a coleta, o processamento e a análise de informações espaciais, ou seja, de informações cuja localização geográfica seja uma característica inerente (MELO, 2018).

De acordo com CÂMARA *et al.* (2001) diz-se de maneira genérica que “*Se onde é importante para seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho*”. Portanto, quando **onde** for uma das questões e/ou problemas que serão resolvidos por um sistema informatizado, vale a pena considerar a utilização de um SIG.

O termo Sistema de Informações Geográficas é empregado em sistemas que são capazes de executar computacionalmente o tratamento de dados geográficos e resgatam informações baseadas em suas características alfanuméricas considerando também sua localização espacial. Oferecem ao usuário (por exemplo, engenheiro) uma perspectiva nova do ambiente de trabalho, disponibilizando todas as informações sobre um

determinado assunto, inter-relacionadas com base na localização geográfica. Portanto, é necessário que a geometria e os atributos dos dados no SIG estejam georreferenciados, ou seja, localizados na superfície terrestre e representados em uma projeção cartográfica (CÂMARA *et al.*, 2001).

Uma dualidade básica dos SIGs é a condição de armazenar a geometria dos objetos geográficos e seus atributos. A aplicação desses sistemas é ampla, incluindo temas como agricultura, cartografia, cadastro urbano, florestas e redes de concessionárias (água, energia e telefonia) (CÂMARA *et al.*, 2001).

Os SIGs já existiam antes do advento do primeiro computador e esses sistemas evoluíram a partir de séculos de elaborações de mapas e da compilação de registros geográficos. O conceito de registro de propriedades já era empregado pelos romanos, no *capitum registra* (registro de terra). Em muitos países o termo cadastro designa o registro de mapas e propriedades (MIRANDA, 2010).

Um ambiente SIG atual é definido como aquele que possui componentes de informática (GPS, mesas digitalizadoras; computadores; impressoras e monitores), módulos de programas de aplicação (softwares e aplicações desenvolvidas em ambiente computacional para tratar e analisar os dados espaciais, produzindo produtos como mapas, planilhas, gráficos e outras informações) e recursos humanos (responsável por definir projetos, desenvolver, usar e prestar assistência ao SIG). A Figura 3 apresenta a representação de um ambiente SIG (LIMA, 2015).

O emprego da tecnologia de geoprocessamento possibilita sensíveis ganhos em tempo e qualidade dos resultados, permitindo a realização de avaliações complexas em grandes extensões territoriais. Torna-se possível integrar informações existentes em bancos de dados convencionais (relacionais) com dados mapeados, gerando resultados de elevado valor para racionalizar a aplicação de recursos financeiros e subsidiar a tomada de decisão na escolha de alternativas mais adequadas do ponto de vista técnico e econômico (MELO, 2018).

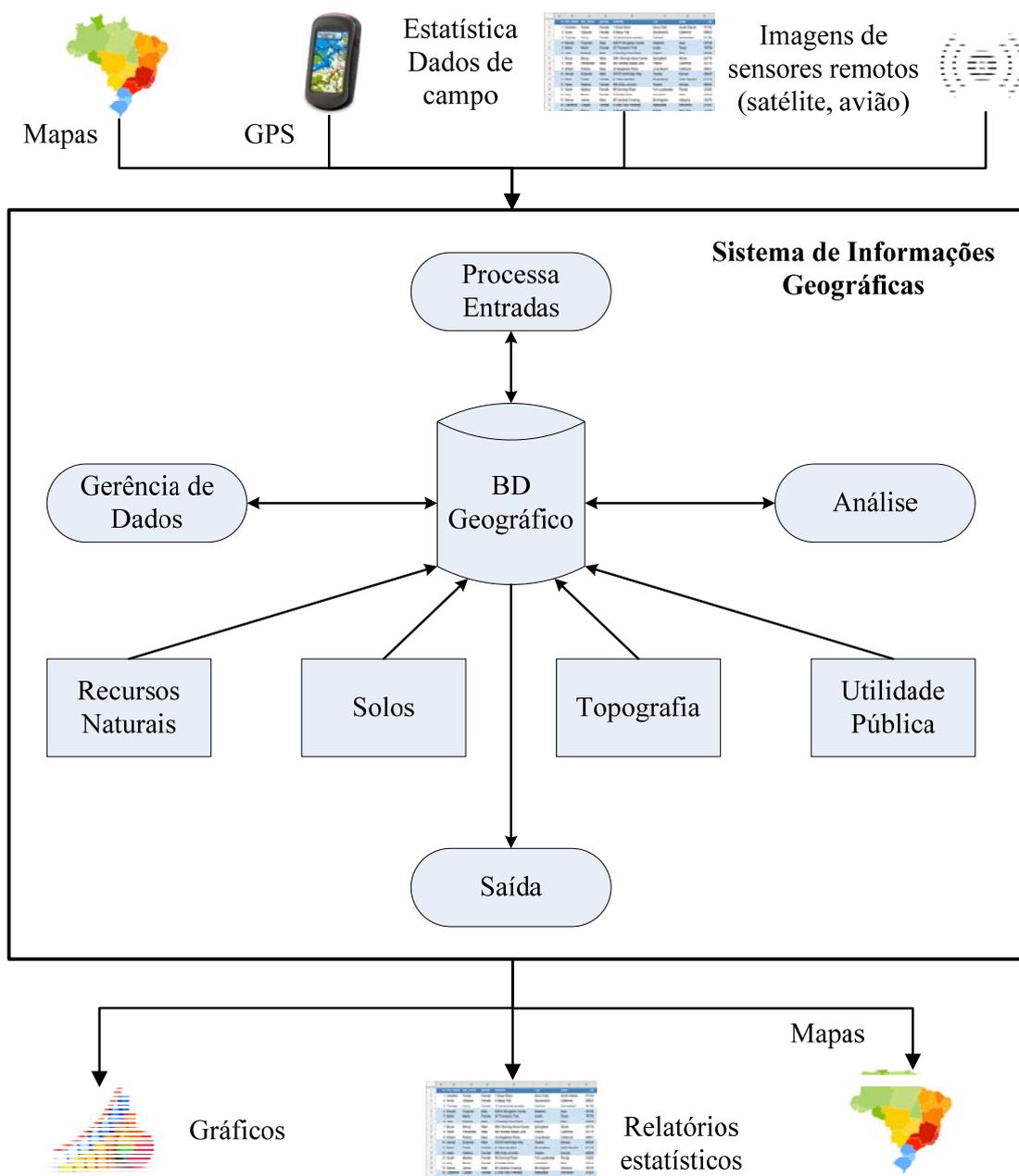


Figura 3 – Representação de um ambiente SIG.  
 Fonte: MIRANDA, 2010 (Adaptado).

O presente trabalho dá ênfase aos programas e as aplicações desenvolvidas computacionalmente que foram utilizados para tratar e analisar as informações geográficas. Existem vários programas SIG, sendo que, dentre os pagos, destacam-se o ArcGIS, IDRISI e *Global Mapper*. Dentre os gratuitos, destacam-se o SPRING e QuantumGIS.

Neste trabalho foram utilizadas duas ferramentas SIG: ArcGIS versão 10.3 na linguagem nativa Python 2.7 e *Global Mapper*. Estas ferramentas possuem a função de

decodificar a entrada dos dados em um formato compatível com a ferramenta SIG (*shapefile*, formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor) a um formato compatível para leitura no programa MATLAB® R2016b.

Os dados espaciais podem ser representados basicamente de duas maneiras: formato matricial (*raster*) e formato vetorial. Os arquivos no formato *raster* são constituídos por uma matriz de pixels (ou células), com as dimensões definidas, onde cada pixel possui somente um valor numérico que caracteriza a área coberta pelo mesmo. Ou seja, um *raster* pode representar, por exemplo, a topografia de uma região, onde cada célula possui um valor que corresponde à cota média da área. A dimensão do pixel é conhecida como resolução. O formato matricial apresenta problemas relacionados à representação discreta das informações espaciais e à imprecisão na representação dos limites de feições geográficas (LIMA, 2015).

Na representação vetorial, as informações são representadas por elementos com sua própria geometria de pontos, linhas e polígonos, permitindo que as posições, comprimentos e dimensões possam ser definidos com precisão. Portanto, esse formato surge como solução para os problemas abordados no formato matricial. O formato vetorial permite associar a cada elemento outras informações na forma de atributos. Em outras palavras, um arquivo vetorial que represente os municípios, por exemplo, pode conter diversos atributos para armazenar a área, nomes dos municípios, população, PIB entre outros (LIMA, 2015).

### 3.2 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

O AHP é um método usado em problemas de decisão multicritério desenvolvido por Thomas Saaty (ADAMCSEK, 2008). O AHP é uma teoria geral de medida e é uma técnica utilizada para determinar escalas de proporção de comparações, discretas e contínuas, e de critérios em relação a um objetivo geral. Tais comparações podem ser obtidas de medições reais ou de uma escala que considera o peso relativo de preferências e juízos (LIMA, 2015, SAATY, 1987). Esse método possui aplicações na tomada de decisões, planejamento e alocação de recursos multicritérios e na resolução de conflitos (SAATY, 1987, GOLDEN *et al.*, 1989).

De maneira resumida, esse processo promove o pensamento dedutivo e indutivo, considerando simultaneamente diversos fatores e permitindo a dependência, fazendo compensações numéricas para chegar a uma síntese ou conclusão (SAATY, 1987).

Esse processo permite a modelagem de problemas complexos em uma estrutura hierárquica, apresentando as relações entre alternativas, critérios e o objetivo geral (ADAMCSEK, 2008). A hierarquia permite elaborar decisões focadas separadamente para cada variável e a maneira efetiva para realizar esse procedimento é julgar em pares os elementos em relação a um único critério, sem considerar outros elementos ou critérios. Devido a isso, as comparações pareadas, em conjunto com estruturas hierárquicas, são muito úteis para determinar os pesos das alternativas em relação a um objetivo (LIMA, 2015, SAATY, 1990).

Existem outras metodologias desenvolvidas para solucionar problema de tomada de decisão com multicritérios como, por exemplo, ANP (SAATY, 1999), ELECTRE (ROY, 1991) e TOPSIS. Essas técnicas definem uma base de pesos para cada parâmetro, que são utilizados para classificar a preferência em uma série de alternativas em que os critérios selecionados podem influenciar. Dentre esses métodos citados, as metodologias AHP e ANP apresentam uma maneira mais elaborada na caracterização das comparações pareadas (pesos dos critérios que são definidos pelo tomador de decisões). Os outros métodos determinam, previamente de maneira direta pelo tomador de decisões, os pesos e, conseqüentemente, a ordem de importância das alternativas (LIMA, 2015).

De acordo com ADAMCSEK (2008), esse método é composto por vários componentes, como estruturação hierárquica de complexidade, comparações pareadas, julgamentos, um método para determinar o autovetor de pesos e considerações de consistência. Esses temas serão abordados com maiores detalhes a seguir. Portanto, para o presente trabalho, foi escolhida a metodologia AHP, pois é relevante determinar somente os pesos dos critérios avaliados que serão utilizados no desenvolvimento do estudo do traçado ótimo de linhas de transmissão.

### **3.2.1 Estrutura Hierárquica**

O modelo hierárquico de um problema possui, geralmente, um foco (objetivo geral) que depende de critérios e subcritérios e, por fim, as alternativas a partir das quais

a escolha deverá ser realizada (SAATY, 1987). Desenvolver a estrutura hierárquica do problema é o primeiro passo para utilizar o método AHP. A Figura 4 apresenta um exemplo de estrutura para escolher um equipamento considerando flexibilidade, operabilidade, preço e segurança. Portanto, o objetivo, ou foco, é determinar o equipamento que possui a melhor relação custo/benefício. No exemplo proposto, o segundo nível contém os equipamentos selecionados para a escolha (ADAMCSEK, 2008).

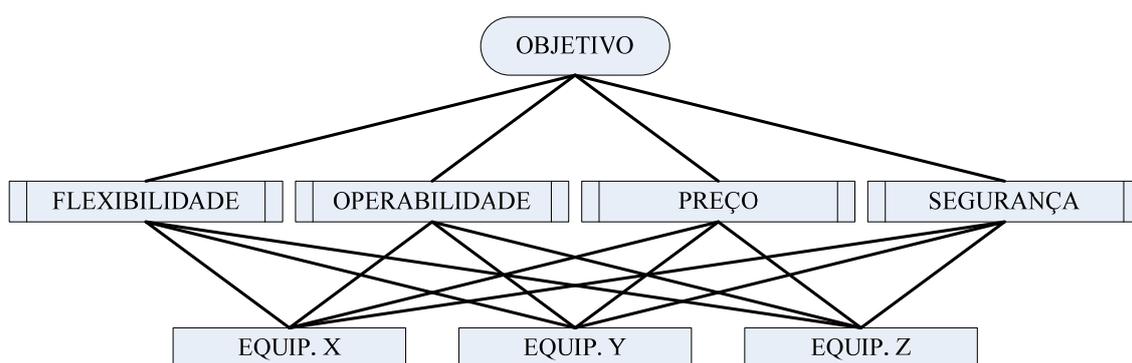


Figura 4 – Modelo de estrutura hierárquica para alternativas de compra de equipamento.  
Fonte: ADAMCSEK, 2008 (Adaptado).

A estrutura hierárquica do AHP básico permite que as dependências entre os elementos sejam apenas entre os níveis da hierarquia, e a única direção de impacto possível é em direção ao topo da hierarquia. Os elementos de um determinado nível são considerados independentes entre si (ADAMCSEK, 2008). Neste trabalho, o método AHP foi utilizado para determinar os pesos dos critérios considerados na otimização da rota de menor custo do traçado de linha de transmissão.

### 3.2.2 Comparações Pareadas e Julgamentos

Depois de organizar o problema de forma hierárquica, o próximo passo do processo é determinar as prioridades, ou seja, estabelecer os pesos dos critérios em cada nível da hierarquia. Isso é realizado através de comparações pareadas. Existem dois tipos de comparações pareadas realizadas no AHP: a primeira ocorre entre os pares de critérios e a segunda entre os pares de alternativas. As comparações são realizadas com base na importância relativa ao objetivo geral entre os critérios (ADAMCSEK, 2008, LIMA, 2015).

A Tabela 5 apresenta a escala de importância para basear os julgamentos. SAATY (1990) afirma que essa escala foi validada através de aplicações de muitas pessoas e por meio de comparações teóricas com outras escalas.

Tabela 5 – Escala de importância de comparações pareadas.  
Fonte: SAATY, 1990.

Importância	Definição
1	Igual importância: Dois fatores contribuem igualmente ao objetivo.
3	Importância moderada: Experiência e julgamento indicam fator ligeiramente favorecido em relação ao outro.
5	Forte importância: Experiência e julgamento indicam fator ligeiramente favorecido em relação ao outro.
7	Importância muito forte: Critério é fortemente favorecido, e sua dominância é demonstrada na prática.
9	Extrema importância: A evidência que favorece um critério sobre outro tem a maior validade possível.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários.

De acordo com BRUNELLI (2015), a matriz de comparações pareadas é estruturada da seguinte forma:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

onde  $a_{ij} > 0$  (de acordo com o valores apresentados na Tabela 5), expressa o grau de preferência (ou importância) do critério  $x_i$  em relação ao critério  $x_j$ . Ou seja, cada elemento deve se aproximar da relação entre dois pesos (BRUNELLI, 2015):

$$a_{ij} \approx \frac{w_i}{w_j} \quad \forall i, j \quad (2)$$

Isso significa dizer que, se as entradas representam as proporções exatas entre os pesos, a matriz  $A$  pode ser expressa da seguinte forma (BRUNELLI, 2015):

$$\mathbf{A} = (w_i/w_j)_{n \times n} = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

Ao considerar (2) e (3), uma condição de reciprocidade multiplicativa  $a_{ij} = 1/a_{ji} \forall i, j$  é válida. Portanto, é possível simplificar e reescrever a matriz  $\mathbf{A}$  como (BRUNELLI, 2015):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Com essa estrutura de matriz de comparação pareada simplificada, supõe-se que se, por exemplo, o critério  $x_1$  é 2 vezes mais importante do que o critério  $x_2$ , então pode-se dizer que  $x_2$  é 1/2 tão importante quanto  $x_1$  (BRUNELLI, 2015).

### 3.2.3 Autovetor de Pesos

Determinar o autovetor de pesos, ou vetor de prioridades, da matriz de comparações pareadas é um ponto fundamental no método AHP. É possível notar que cada elemento  $a_{ij}$  da matriz é a razão exata entre dois pesos, denominados de  $w_i$  e  $w_j$ , logo as colunas da matriz de comparações  $\mathbf{A}$  são proporcionais entre si e, portanto, linearmente dependentes (BRUNELLI, 2015).

Quando as entradas da matriz de comparações não são razões exatas entre pesos, não existe um vetor de pesos que represente perfeitamente a informação contida na matriz. Porém, como o método AHP precisa do vetor de pesos, é necessário engendrar algumas formas de estimar um vetor de prioridades. Existem alguns métodos na literatura para obtenção do vetor de prioridades, ou de pesos,  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_n)^T$  (BRUNELLI, 2015).

Cada técnica trata de uma regra que sintetiza as comparações entre pares em uma classificação e, matematicamente, é uma função  $\tau: \mathbb{R}_+^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}_+^n$ , ou seja, da matriz de comparações pareadas, denominada de  $\mathbf{A}$ , de ordem  $n \times n$  com todos os elementos reais

e positivos obtém-se um vetor de prioridades, denominado de  $\mathbf{w}$ , de ordem  $n$  com todos os elementos reais e positivos. É importante dizer que métodos diferentes podem levar a diferentes vetores  $\mathbf{w}$ , exceto se os elementos da matriz forem proporções de pesos. Nesse caso todos os métodos encontrarão o mesmo vetor  $\mathbf{w}$ . Ou seja, caso isso ocorra, o vetor  $\mathbf{w}$  obtido com qualquer método deve ser tal que  $(w_i/w_j)_{n \times n} = \mathbf{A}$  (BRUNELLI, 2015). A seguir serão apresentados dois métodos utilizados para determinar o vetor de prioridades  $\mathbf{w}$ , que são: o método do autovetor e o método da média geométrica.

### 3.2.3.1 Método do Autovetor

Proposto pelo próprio SAATY (BRUNELLI, 2015; ADAMCSEK, 2008). Esse é o método mais popular para estimar o vetor  $\mathbf{w}$ . O método do autovetor pode ser explicado ao considerar uma matriz cujos elementos são proporções exatas entre pesos, isto é,  $a_{ij} = w_i/w_j$ . Multiplicando a matriz  $\mathbf{A}$  por  $\mathbf{w}$ , tem-se (BRUNELLI, 2015):

$$\mathbf{A}\mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ \vdots \\ nw_n \end{pmatrix} = n\mathbf{w} \quad (5)$$

É conhecido, da álgebra linear, que a formulação do tipo  $\mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda\mathbf{w}$  implica que  $\lambda$  e  $\mathbf{w}$  são, respectivamente, um autovalor e um autovetor da matriz  $\mathbf{A}$ . Portanto, de acordo com a Equação (5), se os elementos da matriz forem proporções exatas entre pesos, o vetor de peso é o autovetor associado ao autovalor  $n$ , onde  $n$  é a ordem da matriz  $\mathbf{A}$ . SAATY (1987) propõe que este resultado pode ser estendido a qualquer matriz de comparações pareadas  $\mathbf{A}$ , trocando  $n$  pelo autovalor máximo de  $\mathbf{A}$ . O vetor  $\mathbf{w}$  pode, portanto, ser obtido para qualquer matriz  $\mathbf{A}$  resolvendo o seguinte sistema de equações (BRUNELLI, 2015):

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda_{max}\mathbf{w} \\ \mathbf{w}^T \mathbf{1} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

onde  $\lambda_{max}$  é o autovalor máximo de  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$ . Esse problema de autovalor matricial pode ser resolvido por programas computacionais e planilhas eletrônicas (BRUNELLI, 2015). A equação  $\mathbf{w}^T \mathbf{1} = 1$  significa dizer que o módulo de  $\mathbf{w}$ ,  $\|\mathbf{w}\|$ , é 1. Ou seja,  $\mathbf{w}$  é um vetor de módulo unitário.

Se a matriz  $\mathbf{A}$  é consistente, cada linha da matriz é um múltiplo constante da primeira linha. Para essa matriz, o posto (*rank*) é um e apenas um autovalor é diferente de zero. A soma dos autovalores de uma matriz é igual ao traço da mesma (soma dos elementos da diagonal principal), logo o autovalor diferente de zero é igual ao valor de  $n$ , o tamanho da matriz. Como  $\mathbf{A}\mathbf{w} = n\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{w}$  é o autovetor de  $\mathbf{A}$  correspondente ao autovalor máximo, o qual é igual à ordem da matriz  $\mathbf{A}$  (ADAMCSEK, 2008).

Nas matrizes que contêm julgamentos humanos, a condição  $w_{ij} = w_{ik}w_{kj}$  (sabendo que,  $w_{ij} = \frac{1}{w_{ji}}$  e  $w_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \frac{w_i w_k}{w_k w_j} = w_{ik}w_{kj} \forall i, j, k$ ) não se aplica, uma vez que os julgamentos humanos possuem um grau de inconsistência (BRUNELLI, 2015). Desta forma, na matriz  $\mathbf{A}$ , a propriedade de consistência provavelmente não é válida. Pequenas perturbações, variações nas relações exatas de pesos  $w_{ij}$ , nas entradas implicam em perturbações semelhantes nos autovalores (ADAMCSEK, 2008). Neste caso, o  $\lambda_{max}$  estará próximo de  $n$  (maior que ou igual a  $n$ ) e os outros autovalores estarão próximos de zero. As estimativas dos pesos para os critérios podem ser encontradas normalizando o autovetor correspondente ao maior autovalor da matriz  $\mathbf{A}$  (ADAMCSEK, 2008).

### 3.2.3.2 Método da Média Geométrica

O Método da Média Geométrica, proposto por CRAWFORD e WILLIAMS (1985), é outra técnica utilizada amplamente para estimar o vetor de pesos. Neste método, cada elemento de  $\mathbf{w}$  é obtido como a média geométrica dos componentes da mesma linha, dividida pelo termo de normalização. Essa divisão é realizada para que a soma dos componentes de  $\mathbf{w}$  seja igual a 1. A equação para determinar  $\mathbf{w}$  é apresentada a seguir (BRUNELLI, 2015):

$$w_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} / \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

onde  $i$  representa a  $i$ -ésima linha,  $j$  representa a  $j$ -ésima coluna e o denominador é conhecido como termo de normalização.

Esse método também é conhecido como Método Logarítmico de Mínimos Quadrados (*Logarithmic Least Squares Method*) e seu desenvolvimento é apresentado em ADAMCSEK (2008). Além disso, maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados em BRUNELLI (2015) e CRAWFORD e WILLIAMS (1985).

Algumas aplicações desse método em conjunto com lógica Fuzzy podem ser encontradas em XU *et al.* (2013) e RUONING e XIAOYAN (1996), e uma utilização desse método com AHP e ANP pode ser vista em NISHIZAWA e TAKAHASHI (2009).

### 3.2.4 Avaliação da Relação de Inconsistência

No método AHP, a consistência dos pesos inseridos na matriz de comparação pareada é um fator importante. Supondo que os pesos dos critérios são conhecidos:  $w_1; w_2; \dots; w_n$ , e assumindo que  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ , a matriz de comparação pareada  $\mathbf{A}$  é consistente se, e somente se, seus componentes  $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \forall i, j$  (BRUNELLI, 2015).

Algumas inconsistências podem, portanto, ocorrer ao se comparar critérios onde não existe uma escala ou medida estabelecida, em virtude das medidas estarem relacionadas em mais de uma comparação e os pesos serem determinados com base em julgamentos humanos. Quando a condição de consistência não é satisfeita, o autovalor encontrado não é igual à ordem da matriz  $\mathbf{A}$ . Então, é necessário determinar o índice de consistência (CI, *Consistency Index*) de acordo com a seguinte equação (LIMA, 2015, SAATY, 1987):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

Estudos numéricos apontam que o valor esperado do CI de uma matriz aleatória de tamanho  $n + 1$  é maior do que o valor esperado de CI de uma matriz aleatória de ordem  $n$ . Por isso, o CI não é justo na comparação de matrizes de ordens diferentes e precisa ser redimensionado (BRUNELLI, 2015). Define-se então a relação de consistência (CR, *Consistency Ratio*):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

onde  $RI$  é o índice randômico (*Random Index*). Este índice é uma estimativa do CI médio obtido a partir de um conjunto suficientemente grande de matrizes geradas aleatoriamente, todas de tamanho  $n$  (BRUNELLI, 2015). A seguir, na Figura 5, são apresentados os valores de  $RI$ , e seus respectivos desvios padrões, para diferentes dimensões da matriz de julgamentos  $A$ . As barras verticais indicadas na Figura 5 representam o intervalo  $[RI - \sigma, RI + \sigma]$ , para cada valor de  $n$ , sabendo que  $\sigma$  é o desvio padrão.

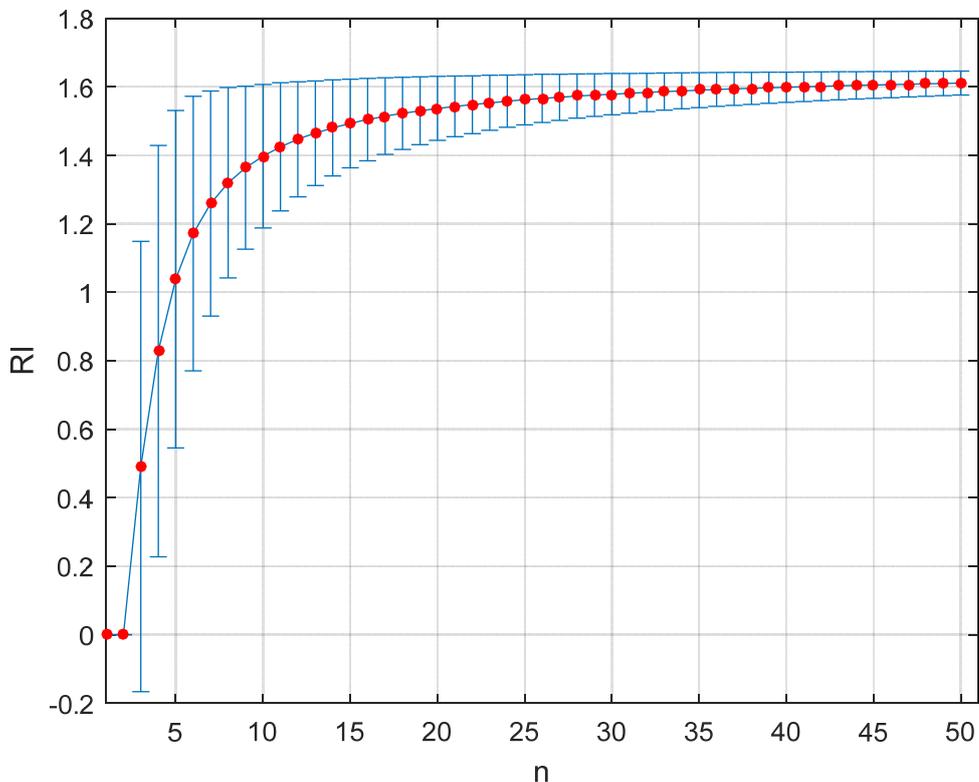


Figura 5 – Valores de RI (*Random Index*).

Segundo CORREA (2003) o desvio padrão é a medida mais utilizada para comparar as diferenças entre conjuntos de dados. O desvio padrão determina a dispersão de um conjunto de valores em relação à média e é calculado como a raiz quadrada da variância. A variância é a média aritmética dos quadrados dos desvios e pode ser calculada da seguinte forma (CORREA, 2003, MORETTIN e BUSSAB, 2004, SPIEGEL, 1978):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (10)$$

onde  $x_i$  é o valor da  $i$ -ésima medida,  $\bar{x}$  é a média das medidas e  $n$  é o número de medidas. É importante citar que para dados amostrais, o denominador é  $n - 1$ ; para dados populacionais é  $n$ . Portanto, o desvio padrão é dado por (CORREA, 2003, MORETTIN e BUSSAB, 2004, SPIEGEL, 1978):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (11)$$

O coeficiente de variação (CV) é uma medida relativa de dispersão usada para comparar, em termos relativos, o grau de concentração. O CV é a relação entre o desvio padrão  $\sigma$  e a média  $\bar{x}$  (CORREA, 2003):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (12)$$

Para cada ordem  $n$  da matriz  $\mathbf{A}$ , o valor de RI é obtido pela média aritmética de índices CI. Neste trabalho, para cada valor de  $n$ , foram geradas de maneira aleatória 100.000 matrizes  $\mathbf{A}$  geradas de maneira aleatória. Os elementos de cada matriz  $\mathbf{A}$  gerada são obtidos através de um sorteio aleatório dos números  $\{1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9\}$  (SAATY, 1980, FORMAN, 1990). A seguir serão apresentados os passos do algoritmo (de acordo com ANEXO I):

- gerar matrizes aleatórias  $\mathbf{A}$ , considerando as escalas de peso supracitadas e um sorteio aleatório dos valores  $\{1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9\}$ . Para

realizar essa etapa é criado inicialmente um vetor contendo todos esses valores. Após isso, é sorteado um número inteiro de 1 até 17 (tamanho do vetor que contém os números) que representa a posição do valor selecionado;

- calcular os índices CI de cada matriz gerada, com o auxílio da Eq. (8);
- obter a média desses valores para cada ordem de matriz avaliada (um RI para cada ordem).

Com o valor de RI, é possível determinar a relação de consistência. De acordo com SAATY (1987), se a relação descrita na Equação (9) for maior do que 10%, a avaliação dos critérios deve ser refeita. Outros valores desse fator podem ser encontrados em ALONSO e LAMATA (2006) que apresenta uma tabela comparando os índices obtidos por vários outros autores.

A Figura 6 apresenta o histograma (à esquerda) e a estimativa de distribuição (à direita) dos valores dos índices CI para matrizes de ordem 5. Para obter a densidade de probabilidade dos CI a partir do histograma foi utilizada a função *kdensity* do MATLAB®. Observando a curva nota-se que a mesma não se assemelha a uma curva gaussiana.

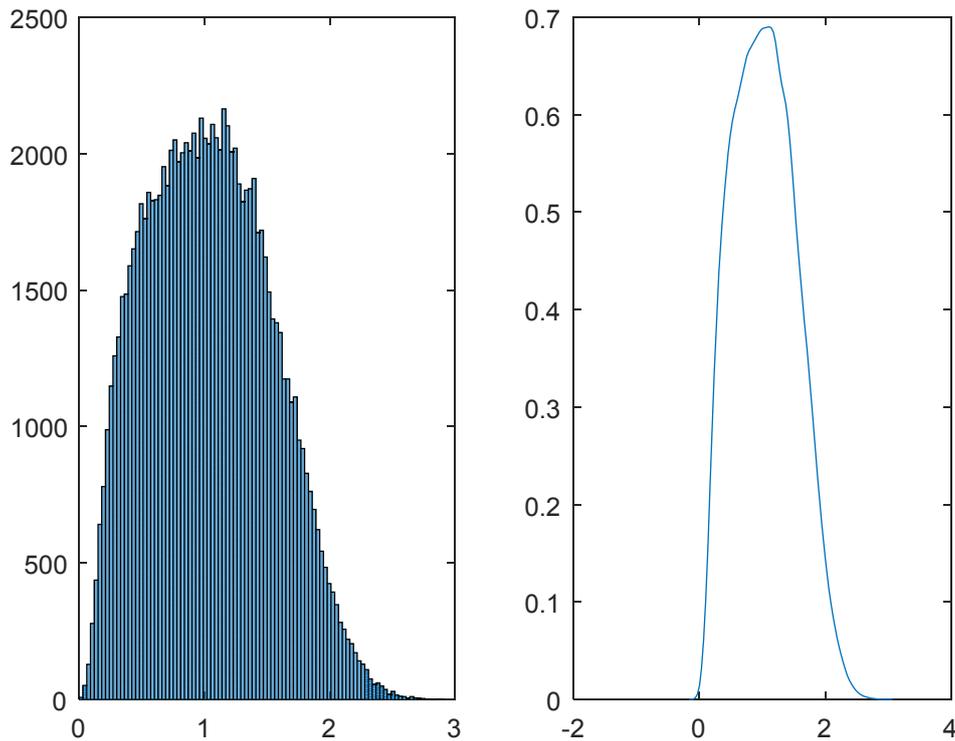


Figura 6 – Histograma dos valores de 100.000 índices CI para matriz de ordem 5.

Entretanto na Figura 7 e na Figura 8 são apresentados os histogramas (à esquerda) e as estimativas de distribuição (à direita) dos valores dos índices CI para matrizes de ordem 25 e 45, respectivamente. Observando as curvas nota-se que as mesmas se assemelham a uma curva gaussiana. Então, considerando o intervalo de desvio padrão citado anterior pode-se dizer que o mesmo contém 68,3% das amostras de índice CI, para matrizes com ordens elevadas.

Além disso, foi calculado o CV, que para o caso da matriz de ordem 5, apresentou uma alta dispersão com  $CV \cong 47,5\%$ . Para os casos de ordem 25 e 45 observa-se baixa dispersão como  $CV \cong 4,7\%$  e  $CV \cong 2,4\%$ , respectivamente, coerente com a redução do tamanho das barras verticais no gráfico da Figura 5 à medida que  $n$  aumenta. De acordo com CORREA (2003), uma distribuição é classificada como: baixa dispersão ( $CV \leq 15\%$ ); média dispersão ( $15\% < CV < 30\%$ ); e alta dispersão ( $CV \geq 30\%$ ).

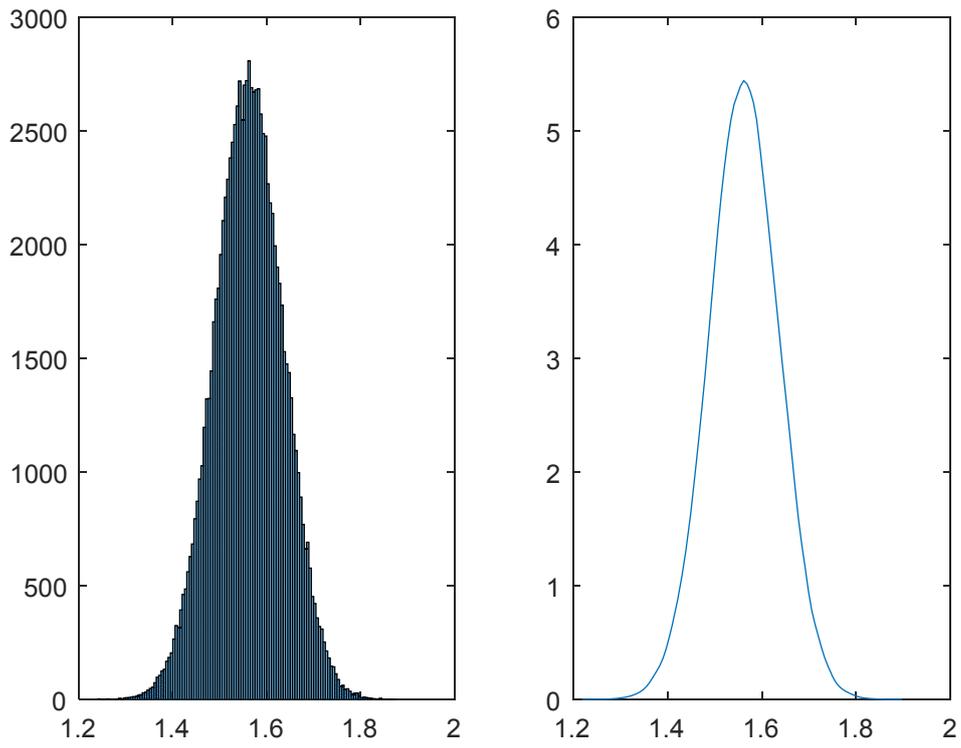


Figura 7 – Histograma dos valores de 100.000 índices CI para matriz de ordem 25.

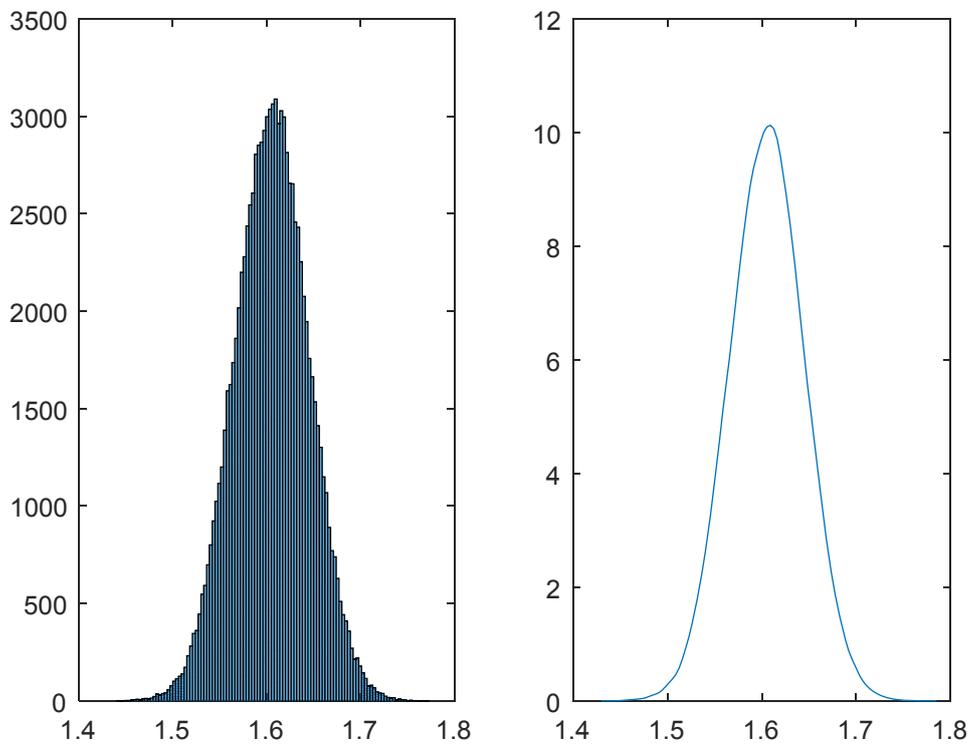


Figura 8 – Histograma dos valores de 100.000 índices CI para matriz de ordem 45.

### 3.3 *LEAST COST PATH*

Determinar o caminho de menor custo, ou a rota otimizada, é uma aplicação que é frequentemente utilizada em sistemas SIG. Dentre as diversas aplicações, podem ser destacadas: identificação de corredores de migração e dispersão (HAILONG LI *et al.*, 2010, LARUE e NIELSEN, 2008); traçado de linhas de transmissão (CAMPOS, 2014, DEDEMEN, 2013, EROĞLU e AYDIN, 2015, LIMA, 2015, MONTEIRO *et al.*, 2005, SCHMIDT, 2009) e gasoduto (HASENACK e WEBER, 1998); redução dos impactos ambientais da construção das linhas (BAGLI *et al.*, 2011); determinação dos traçados de estradas (ATKINSON *et al.*, 2005, COLLISCHONN e PILAR, 2000); navegação de veículos terrestres autônomos (STAHL, 2005); determinação da rota de menor custo para transportar as mercadorias derivadas da terra cultivada para a cidade mais próxima e os custos de transporte incorridos (JAGA *et al.*, 1993); e determinação do percurso marítimo mais curto entre dois portos (KAVOURAS e STEFANAKIS, 1995a, KAVOURAS e STEFANAKIS, 1995b).

A metodologia aplicada na maioria dos programas SIG que são comercializados para determinar o caminho de menor custo (*least cost path*) pode ser dividida em três etapas: geração de uma superfície de custo, determinação da superfície de custo acumulado e, por fim, o algoritmo de otimização da rota (LIMA, 2015).

#### 3.3.1 Superfície de Custo

A superfície de custo é representada como uma matriz com informações georreferenciadas. Cada célula da matriz tem valores numéricos associados. Esses valores representam custos, que são utilizados no cálculo do caminho de menor custo. Os valores de custos relacionados a cada célula correspondem ao atrito, resistência ou, em outras palavras, a dificuldade de passar pelas células. Podem expressar custos monetários, distância, risco, tempo ou outras grandezas (COLLISCHONN e PILAR, 2000).

Vale a pena ressaltar que a superfície de custo pode conter inúmeros critérios, onde diferentes superfícies preliminares são integradas em uma única superfície. Esse processo é realizado através da utilização de técnicas de álgebra de mapas que são baseadas, fundamentalmente, em operações (algébricas) de matrizes que possuem

diferentes informações relacionadas a uma mesma área de estudo (LIMA, 2015). A seguir é apresentada a formulação matemática da superfície de custo:

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{N_{crit}} w^{(k)} C_{ij}^{(k)} \quad (13)$$

onde  $N_{crit}$  é o número de critérios,  $w^{(k)}$  é o peso do  $k$ -ésimo critério ( $k = 1, 2, \dots, N_{crit}$ ) e  $C_{ij}^{(k)}$  é o custo da célula, da  $i$ -ésima linha com a  $j$ -ésima coluna na forma matricial, do  $k$ -ésimo critério.

### 3.3.2 Superfície de Custo Acumulado

O termo acumulado significa que existe um aumento dos valores. Isso ocorre porque o procedimento utilizado para determinar tal superfície é baseado em uma função de propagação que busca por uma célula adjacente à célula de destino (na primeira iteração, a célula de origem é a célula de destino que tem um custo zero). Ou seja, o custo de uma célula em uma superfície acumulada é um valor que representa um custo cumulativo do destino (LEE & STUCKY, 1998, STAHL, 2005).

Depois que é feita a escolha das células com menor valor, essa célula passa a ser a célula de origem. Esse processo continua procurando por outras células vizinhas que possuem o menor valor, sempre determinando o custo acumulado, ou seja, a soma dos custos das células até a célula de destino (LEE & STUCKY, 1998, STAHL, 2005). O cálculo do custo acumulado é formulado de acordo com as seguintes equações:

$$C_{acumulado}^{(ij) \rightarrow (mn)} = C_{CA} + \left( \frac{C_{ij} + C_{mn}}{2} \right), \quad \text{se } i = m \text{ ou } j = n \quad (14)$$

e

$$C_{acumulado}^{(ij) \rightarrow (mn)} = C_{CA} + \left( \frac{C_{ij} + C_{mn}}{2} \right) \sqrt{2}, \quad \text{se } i \neq m \text{ ou } j \neq n \quad (15)$$

$C_{ij}$  é o custo da célula (da  $i$ -ésima linha com a  $j$ -ésima coluna na forma matricial),  $C_{mn}$  é o custo da célula (da  $m$ -ésima linha com a  $n$ -ésima coluna na forma matricial) e  $C_{CA}$  é o valor da soma de cada segmento que é selecionado para formar o caminho. A Figura 9 exemplifica a metodologia para determinar os custos de travessia dos pixels adjacentes.

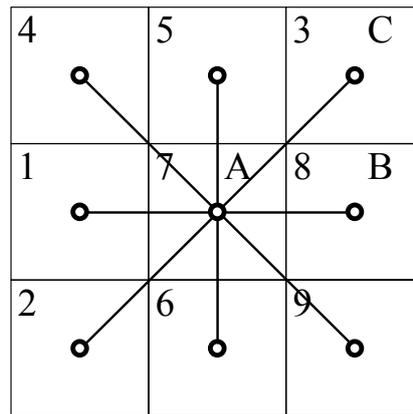


Figura 9 – Custo de travessia de pixels (células) adjacentes.  
Fonte: STAHL, 2005 (Adaptado).

Os números indicados na Figura 9 representam os valores de custo em cada célula. Para determinar o custo do segmento AB é aplicada a seguinte equação:

$$C_{AB} = \frac{C_A + C_B}{2} = \frac{7 + 8}{2} = 7,5 \quad (16)$$

Este é o custo acumulado partindo do ponto A indo para o ponto B. E para o custo do segmento AC tem-se:

$$C_{AC} = \frac{C_A + C_C}{2} \sqrt{2} = \frac{7 + 3}{2} \sqrt{2} \cong 7,0711 \quad (17)$$

Este é o custo acumulado partindo do ponto A indo para o ponto C. Nota-se que o fator  $C_{CA}$  é igual a zero nas duas equações, pois trata-se de condições iniciais. Nas Equações (16) e (17) supõe-se que a distância entre os pixels é igual a 1. Na Equação (17), o termo  $\sqrt{2}$  representa a diagonal do quadrado. Maiores detalhes desse cálculo são apresentados no item 5.2.3.2.

Esse algoritmo é aplicado na superfície de custo para determinar o caminho otimizado entre dois pontos, iniciando no ponto de origem, procurando o pixel vizinho que possui o menor valor de custo acumulado, até chegar ao ponto de destino (DIJKSTRA, 1959, ETHERINGTON, 2012).

### **3.3.3 Algoritmo de Otimização de DIJKSTRA (1959)**

Existem poucos algoritmos que são utilizados para determinar o caminho de menor custo, ou o caminho otimizado, sendo que o desenvolvido por DIJKSTRA (1959) é o mais utilizado. Esta metodologia foi criada inicialmente para solucionar dois problemas em um grafo de  $n$  nós, onde alguns ou todos os pares são conectados por ramos de comprimentos dados: (i) construir a árvore com valores mínimos totais de comprimento entre todos os  $n$  nós, em que uma árvore é definida como um grafo com um e apenas um caminho entre dois nós; e (ii) encontrar o caminho de menor comprimento entre dois nós dados (DIJKSTRA, 1959, LIMA, 2015).

As plataformas SIG que utilizam a implementação desse algoritmo nas ferramentas de *least cost path* consideram os centroides de cada pixel do *raster* (ou célula da matriz que representa a superfície de custo) como um nó do grafo e os ramos são as interligações entre os pixels vizinhos (células adjacentes). Com isso, cada pixel é conectado por ramos aos seus oito vizinhos. Considerando pixels adjacentes diagonais, a distância do ramo pode ser obtida pela média dos custos entre os dois pixels multiplicada pela raiz quadrada de dois. Este fator é aplicado para compensar a diagonal do quadrado (LIMA, 2015). Esse algoritmo será apresentado com maiores detalhes no tópico 5.2.3.3 deste trabalho.

## 4 CONCEITOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo MELO (2016) as linhas de transmissão são elementos condutores projetados para transportar energia, através de longas distâncias, com perdas e distorções reduzidas. Geralmente, as linhas de transmissão são operadas em tensões superiores a 100 kV, podendo ultrapassar 1000 kV.

As linhas de transmissão, comumente abreviadas por LT, são constituídas, basicamente, por cabos condutores e torres. Além desses, são utilizadas cadeias de isoladores e ancoragens que possuem a função de fixar e estabilizar os condutores nas torres. Existem diversos tipos de torres e fundações, além de outros componentes de uma LT, que são dimensionados e projetados de acordo com características técnicas como tensão, corrente e potência. Podem ser citadas também características relacionadas a localidades de implantação do empreendimento como relevo, estabilidade do solo, presença de água na superfície, dentre outras. Os tópicos seguintes irão abordar com maiores detalhes os principais componentes e particularidades de uma LT. Os principais componentes estão ilustrados na Figura 10.

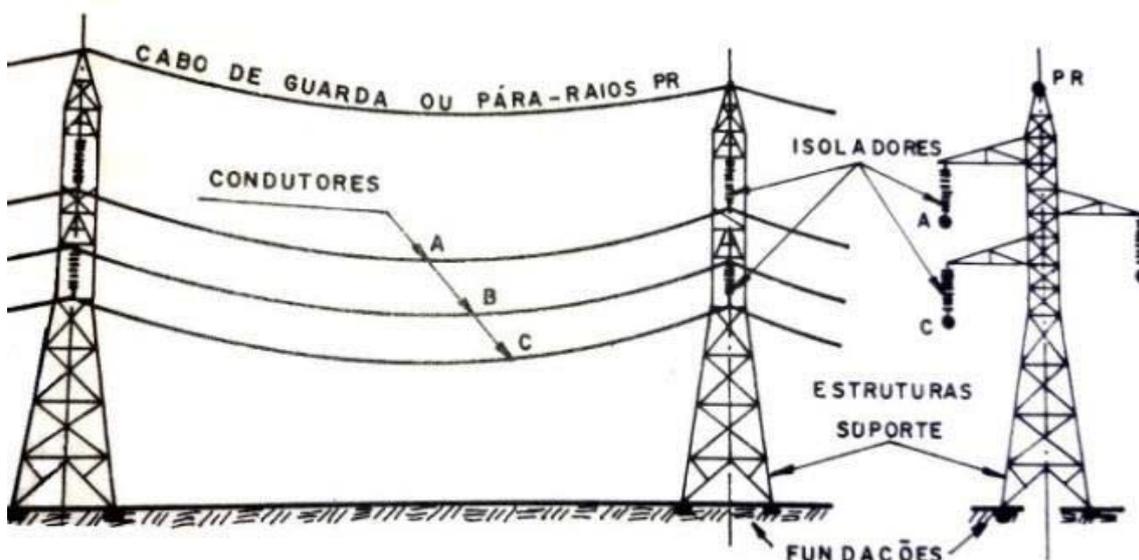


Figura 10 – Exemplo de LT.  
Fonte: ARANTES *et al.*, 2016.

As informações descritas neste capítulo servem para determinar as características da LT que será planejada, como um exemplo de estudo final deste trabalho, e nos custos para determinar o caminho otimizado para construir a mesma.

## 4.1 TIPOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Inicialmente as aplicações e estudos de eletricidade foram realizados em corrente contínua. Nos anos de 1880 e 1890, com o desenvolvimento dos sistemas elétricos trifásicos, o transformador e a máquina de indução, tornou-se possível a construção de sistemas elétricos de potência (SEP) em corrente alternada. As vantagens das redes elétricas em corrente alternada fizeram com que tais sistemas se tornassem predominantes (SILVA, 2011).

Os transformadores são máquinas simples e eficientes que tornaram possível a geração, transmissão, distribuição e a utilização de energia pelos consumidores (domésticos, comerciais e industriais), com diferentes níveis de tensão. A máquina de indução, principalmente a trifásica, é mais simples, robusta e de menor custo quando comparada aos comutadores de máquinas de corrente contínua (LIMA, 2015, SILVA, 2011).

As máquinas de corrente contínua possuem algumas limitações de velocidade e demandam maior necessidade de manutenção. São máquinas que trabalham em baixa velocidade e são mais pesadas e, por conseguinte, possuem um custo mais elevado, em comparação às máquinas de corrente alternada. Com o surgimento das turbinas a vapor (máquinas que trabalham em altas velocidades), os geradores de corrente alternada tornaram-se mais vantajosos (LIMA, 2015, SILVA, 2011).

No que tange à corrente alternada é necessário levar em conta a frequência de operação do sistema, parâmetro que representa o número de ciclos que a corrente elétrica completa em um segundo. No Brasil, as primeiras empresas de eletricidade operavam em conformidade com as frequências das máquinas importadas. As máquinas europeias funcionavam em 50Hz e as americanas em 60Hz. A frequência da energia elétrica fornecida no Brasil é 60Hz, excetuando-se a usina de Itaipu que opera em 50Hz (parte paraguaia) e em 60Hz (parte brasileira). A energia em excesso gerada pela parte paraguaia, exportada para o Brasil, passa por um processo de conversão em corrente alternada de 60Hz (CUNHA, 2010, LIMA, 2015).

O nível de tensão de operação de uma LT é especificado de acordo com a potência elétrica a ser despachada ou transmitida para suprir a demanda de uma determinada localidade. A energia elétrica gerada é transmitida com elevados níveis de tensão, pois a

quantidade de energia transmitida aumenta com o quadrado da tensão (KIESSLING *et al.*, 2003, LIMA, 2015).

## 4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 4.2.1 Classificação Quanto à Corrente

As linhas de transmissão podem ser de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA). Os dois tipos têm características específicas, que as tornam mais apropriadas para determinadas aplicações. As LTs em CA são as mais comuns. Este tipo de LT apresenta um desempenho melhor quanto às perdas elétricas para níveis de tensão não tão elevados. Além disso, essas linhas não demandam estruturas grandiosas e, no geral, utilizam um número maior de cabos condutores quando comparadas a uma linha CC. As LTs em CC são recomendadas também para longas distâncias. Neste caso, são utilizados também níveis de tensão muito mais elevados para diminuir as perdas elétricas e os custos de projeto (GRIGSBY, 2007, MELO, 2016).

### 4.2.2 Classificação Quanto à Extensão

No tocante às análises matemáticas, simulações e modelagens, é comum classificar as LTs segundo o comprimento. Isso é realizado pelas diferentes aproximações passíveis à modelagem de uma LT em conformidade com a característica da extensão. As LTs são modeladas matematicamente de acordo com seus parâmetros elétricos por fase e seu comprimento (MELO, 2016).

As LTs classificadas como curtas possuem um comprimento de 60 a 80 km para linhas de até 150 kV, com comprimento máximo de 40 km para linhas com tensões maiores ou iguais a 150 kV e menores que 400 kV, e com comprimento máximo de 20 km para linhas com tensões maiores ou iguais a 400 kV. As linhas consideradas médias possuem um comprimento de até 200 km para linhas com tensões entre 150 kV e 400 kV, e comprimentos inferiores a 100 km para linhas com tensões acima de 400 kV. Por fim, as linhas consideradas longas são aquelas que excedem os limites expostos anteriormente (FUCHS, 1977).

### **4.2.3 Classificação Quanto à Tensão**

Outra característica utilizada para classificar as LTs é o nível de tensão das mesmas. De acordo com ANEEL (2011), as tensões nominais são padronizadas para as diferentes camadas do sistema elétrico (transmissão e distribuição, distribuição primária e distribuição secundária).

Segundo a nota técnica, a PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (1988), estabelece que as linhas de distribuição secundárias apresentam níveis de tensão de 380/220 V (onde o primeiro valor representa tensão de linha, ou entre fases, e o segundo tensão de fase, entre fase e neutro) e 220/127 V em redes trifásicas, e 440/220 V e 254/127 V em redes monofásicas. A distribuição primária se dá em níveis de 34,5 e 13,8 kV. Enquanto que as linhas de transmissão e subtransmissão têm tensões nominais de 750, 500, 230, 138, 69, 34,5 e 13,8 kV.

No tocante às LTs, encontram-se, frequentemente na literatura, terminologias para diferentes grupos de tensões. Entretanto, verifica-se, geralmente, uma convenção na aplicação dessas terminologias. Portanto, o termo alta tensão (AT) é utilizado para caracterizar as linhas com tensão nominal entre 100 kV e 230 kV, já o termo extra alta tensão (EAT) é utilizado para tensões menores que 800 kV, e, por fim, ultra alta tensão (UAT) é utilizado para designar linhas com nível maior ou igual a 800 kV (GRIGSBY, 2007, MELO, 2016).

## **4.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO**

### **4.3.1 Cabos Condutores**

O projeto para determinar o tipo do condutor e o seu dimensionamento é realizado com o objetivo de mitigar as perdas de energia por efeito Joule ou Corona, controlar os níveis de rádio interferência e os ruídos acústicos. Além dos critérios já mencionados é necessário considerar outros como, por exemplo, variações nas condições ambientais, onde baixas temperaturas resultam em um aumento da tração dos cabos devido à redução do comprimento dos mesmos; pode ser citado também o vento que induz vibrações mecânicas que podem provocar rupturas por fadiga nos pontos de fixação; outro fator importante é a temperatura de operação que influencia na escolha do

material do cabo de maneira a suportar altas temperaturas com mínimas perdas da resistência mecânica do mesmo (MAMEDE, 2005, LIMA, 2015, STEVENSON, 1986).

Em geral, os cabos condutores são formados por muitos fios, estrutura essa que possibilita que os condutores sejam mais flexíveis e resistentes ao serem comparados com um condutor de mesma seção transversal, formado por apenas um único fio. Os cabos podem ser produzidos utilizando-se mais de um material, com o objetivo de estabelecer uma relação ideal entre peso e resistência mecânica. Dentre os diversos materiais utilizados na produção de cabos, o alumínio consolidou-se como o material mais empregado em LT, principalmente quando se trata de tensões elétricas elevadas (MAMEDE, 2005, LIMA, 2015, STEVENSON, 1986).

A baixa resistência à tração do alumínio é compensada colocando fios de aço galvanizado nos cabos. Quanto à baixa resistência à corrosão do alumínio, causada devido à ação de agentes químicos presentes na atmosfera de regiões poluídas, é atenuada aplicando-se ligas de alumínio mais resistente. Além disso, o alumínio possibilita a utilização de uma seção transversal maior devido ao seu menor peso específico e preço, balanceando assim, a sua maior resistividade elétrica (MAMEDE, 2005, LIMA, 2015, STEVENSON, 1986).

#### **4.3.2 Cabos de Guarda**

Os cabos de guarda são responsáveis pela proteção dos condutores contra as descargas atmosféricas. Conhecidos também como cabos protetores, geralmente com seção transversal menor do que os condutores das fases são localizados na parte superior das torres. Os cabos protetores são fixados às estruturas e são solidários eletricamente a elas. Esses cabos são aterrados, de forma a fornecer um caminho de baixa resistência para a terra de modo a escoar as descargas atmosféricas que os atingem. Observa-se, em alguns casos, nestes cabos a presença de uma esfera em geral de cor alaranjada. Esse equipamento possui a função de sinalização e é utilizado em localidades com tráfego de aeronaves e equipamentos agrícolas, para reforçar a visibilidade da linha de transmissão e evitar acidentes (MELO, 2016).

### 4.3.3 Torres

Essas estruturas de suporte das LTs possuem a função de sustentar os cabos condutores e para-raios, obedecendo a um espaçamento mínimo adequado para a segurança, desempenho e custo (VELOZO, 2010). As estruturas são responsáveis por definir uma distância segura entre os cabos e dos cabos ao solo. Existem diversos modelos de torres utilizadas em LT e podem ser divididas conforme a função estrutural, resistência aos esforços e materiais utilizados em sua fabricação (LIMA, 2015). As torres são, geralmente, construídas em forma de treliças com perfis de aço galvanizado ou em postes de aço, concreto ou madeira (VELOZO, 2010).

No Brasil, os tipos mais usuais de torres são as metálicas treliçadas, pois possibilitam obter uma estrutura alta, mais leve e versátil, em espaços limitados. Outro fator importante é que essas estruturas possuem uma composição modular, melhorando assim, sua adaptação nos locais onde serão construídas. O projeto de torres deve, portanto, considerar, além de hipóteses sobre o carregamento, as diversas opções de composição da estrutura com diferentes alturas relacionadas às variadas extensões das pernas, que podem estar niveladas ou não (VELOZO, 2010).

Existem diversas características que possibilitam agrupar os tipos de torres metálicas existentes, podendo ser citada a funcionalidade estrutural (suspensão, ancoragem, para ângulos e fim de linha, derivação e transposição de fases), disposição dos condutores (plano ou lençol horizontal, plano ou lençol vertical e triangular), número de circuitos (simples e duplo) e a forma de suportar as cargas. De acordo com a forma com que as torres resistem aos esforços, as estruturas são classificadas como autoportantes ou estaiadas. A Figura 11 apresenta os exemplos de cada uma das estruturas (AGUILERA, 2007, VELOZO, 2010).

As estruturas autoportantes são projetadas para transmitir os esforços, através de suas fundações, para o solo. Nas estruturas estaiadas são instalados tirantes ou estais com o objetivo de suportar os esforços (horizontais, transversais e longitudinais). Essas estruturas possuem uma boa aceitação em consequência da confiabilidade exibida, possibilitando assim uma redução no tamanho das mesmas. Entretanto, é importante salientar que é necessário um espaço maior devido à utilização dos estais nas faixas de servidão. No tocante ao uso do solo, isso representa uma barreira quando são instaladas em faixas de servidão administrativa. Outro fator a ser citado é que essas estruturas

demandam que a topografia do terreno seja favorável à fixação dos estais da torre (LIMA, 2015).

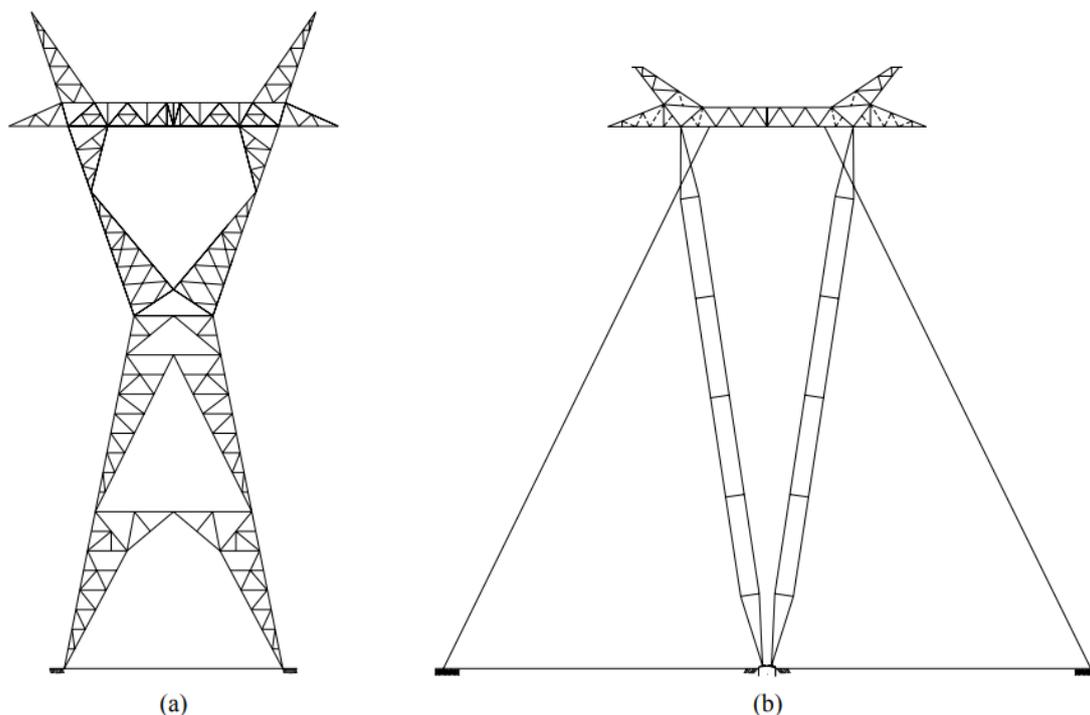


Figura 11 – Exemplos de torres: (a) autoportante; (b) estaiada.  
Fonte: GARCIA, 2005.

#### 4.3.4 Fundações

Em geral, as torres das LTs são dimensionadas para suportar os seguintes esforços: cargas provenientes dos cabos condutores e para-raios e da cadeia de isoladores; e peso próprio da estrutura e carga de vento incidente diretamente sobre a torre. As fundações das torres são classificadas em dois grupos de acordo com a sua aplicação. A escolha do tipo de fundação é sempre em função das condições do subsolo e das condições de acesso ao local da estrutura (VELOZO, 2010).

As fundações de uso corrente são aquelas cujos projetos, chamados “projetos-tipo”, são de aplicação generalizada de acordo com o tipo de terreno e de torre. Nesse caso, são considerados os valores extremos das reações de apoio relativos a cada tipo de torre, cobrindo as diferentes hipóteses de carregamento e de composição física da torre (VELOZO, 2010).

Já as fundações especiais são para aplicações específicas em determinados locais, estruturas e condições de terreno. Em geral, com local de implantação e composição

física da estrutura bem definidos, a fundação é dimensionada para as cargas correspondentes à situação específica da torre, manifestada nas árvores de carga, na ação do vento sobre a torre, além, naturalmente, do seu peso próprio (VELOZO, 2010).

A ABNT 8681 (2003) define que os estados limites considerados nos projetos de estruturas dependem dos tipos de materiais de construção empregados e devem ser especificados pelas normas referentes ao projeto de estruturas com eles construídas. No caso das estruturas de fundação de torres de LTs, são consideradas as seguintes verificações: deslocamentos da fundação a fim de mantê-los abaixo dos limites aceitáveis; tensões mecânicas no solo a fim de limitá-las aos valores admissíveis compatíveis com as hipóteses de cálculo dos deslocamentos; e, limitações de tensão mecânica nas armaduras ou do seu detalhamento com o propósito de manter as fissuras no concreto dentro do padrão aceitável de acordo com ABNT 6118 (2004) (VELOZO, 2010).

Verifica-se que, no caso de estruturas estaiadas, são projetadas fundações diferentes para o mastro central e para os estais. Para estruturas autoportantes é frequente o uso de um mesmo modelo de fundação para cada pé da torre. Apresenta-se, a seguir, a descrição das fundações mais adotadas em cada tipo de suporte. Considerando as fundações aplicáveis a estruturas autoportantes (VELOZO, 2010):

- Sapata de concreto armado

Esse tipo de fundação é constituído por uma placa de concreto armado, em geral quadrada, encimada por pilar, também de concreto armado, que recebe o *stub*. O pilar da sapata costuma ter a mesma inclinação do *stub* e da perna da torre, pois os momentos atuantes na sua base são menores, reduzindo o custo da fundação. Pode, no entanto, ser vertical, quando em geral resulta a necessidade de maiores dimensões para a fundação. As sapatas são mais adotadas para as torres de suspensão, em virtude dos menores esforços horizontais na fundação.

- Bloco ancorado em rocha

Os blocos ancorados são prismas retos de dimensões, em planta, menores e de maior altura que as sapatas, associados a chumbadores constituídos por barras de aço. São utilizados na ocorrência de rocha não escavável manualmente a pequena profundidade (até cerca de 2,5 m). Como as sapatas, os blocos podem ter pilares de concreto armado para receber os *stubs*.

Em virtude dos valores reduzidos das dimensões desse tipo de fundação, é importante a atenção para a reserva de espaço para a colocação do *stub*. Nesse tipo de fundação, os esforços de arrancamento são transmitidos ao maciço de fundação pelos chumbadores.

- Tubulões

O tubulão é uma fundação profunda de concreto armado, de forma cilíndrica, em geral escavado a céu aberto e com base alargada, destinado a transmitir ao maciço de fundação os esforços. De acordo com LIMA (2015), é o tipo de fundação indicada em terrenos argilosos, arenosos ou siltosos.

O tubulão com base alargada é utilizado em solos com resistência crescente com a profundidade e, em geral, que tenham condições de escavação a céu aberto. Sua profundidade varia de 3,0 m a 10,0 m, dependendo do tipo de solo e dos esforços na fundação. A ABNT 6122 (1996) estabelece a base alargada tronco-cônica com até 1,8 m de altura e com um trecho inicial cilíndrico de, no mínimo, 20 cm.

- Estacas

As fundações estaqueadas geralmente são constituídas de estacas verticais e/ou inclinadas, sendo essas destinadas a suportar também os esforços horizontais. São constituídas, em geral, por um bloco de coroamento e um pilar de concreto armado (vertical ou inclinado segundo a perna da torre) sobre um número variável de estacas. O pilar deve receber o *stub* e, portanto, pode ter suas dimensões condicionadas pelas daquela peça. Eventualmente, as quatro pernas das torres autoportantes com fundações em estacas podem ter os blocos de coroamento ligados por vigas de concreto armado.

Os tipos mais utilizados em linhas de transmissão são as estacas pré-moldadas de concreto armado ou protendido e as metálicas. Entretanto, antes da seleção de estacas, deve-se observar, no campo, as condições de acesso para o equipamento de cravação ou de execução da fundação, no caso das estacas injetadas.

- Grelha metálica

Esse tipo de fundação pode ser aplicado nas mesmas condições em que são empregadas as sapatas de concreto armado, com a desvantagem de apresentar menor resistência à agressividade do terreno natural. Portanto, devem ser tomadas medidas de proteção adicionais, além da galvanização das peças metálicas, especialmente em locais de solos agressivos. Por outro lado, as principais vantagens da grelha consistem na

rapidez de execução da fundação (escavação, montagem e reaterro) e na facilidade de transporte, principalmente em locais de difícil acesso para o uso de concreto.

Considerando agora as fundações que são aplicadas em estruturas estaiadas (VELOZO, 2010):

- Fundações para o Mastro

Para suportar os esforços de compressão que atuam sobre o mastro central das estruturas estaiadas, podem ser selecionadas fundações em sapatas e blocos de concreto armado. As sapatas e blocos podem ser de concreto pré-moldado ou concretados no local da estrutura. O emprego dessas fundações é feito nas mesmas circunstâncias em que tais fundações são escolhidas para as torres autoportantes.

- Fundações para os Estais

Os estais são constituídos por cabos de aço associados a barras que se ligam a peças enterradas. As peças enterradas suportam os esforços de tração nos cabos provenientes da outra extremidade e são ligadas ao mastro central da estrutura.

As fundações para os estais podem ser placas de concreto armado pré-moldadas, com forma poligonal ou circular. Outra forma de ancoragem dos cabos dos estais é feita mediante uso de tubulões curtos, desde que o solo local permita a escavação a céu aberto.

#### **4.3.5 Isoladores**

Os condutores necessitam ser isolados eletricamente dos suportes. Os isoladores são elementos fabricados em material com alta rigidez dielétrica. Esses equipamentos são frequentemente fabricados em porcelana vitrificada, vidro temperado ou material sintético composto. O número de isoladores que devem ser instalados em uma linha de transmissão é determinado de acordo com o nível de tensão elétrica e a quantidade de descargas atmosféricas da região. As cadeias de isoladores são instaladas em conjunto com outras peças que possuem a função de suportar os cabos nos isoladores e fixar o conjunto à torre. São divididas em dois tipos denominadas de cadeias de ancoragem e cadeias de suspensão. As cadeias de suspensão sustentam, principalmente, o peso dos cabos propagando os esforços às estruturas de suporte. Já as cadeias de ancoragem suportam todos os esforços transmitidos axialmente pelos cabos em todas as condições requeridas (MAMEDE, 2005, LIMA, 2015).

## 5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E METODOLOGIA

### 5.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Inicialmente é necessário determinar uma superfície contemplando a soma ponderada das superfícies de cada um dos critérios considerados para o desenvolvimento do estudo. Ou seja, a superfície total dos critérios é obtida da seguinte forma:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i f_i(x, y) \quad (18)$$

onde  $N$  é o número de critérios que estão sendo avaliados durante o estudo,  $w_i$  representa o  $i$ -ésimo peso do autovetor  $\mathbf{W}$ , obtido pelo método da média geométrica conforme discutido no capítulo anterior na análise AHP, e  $f_i(x, y)$  é a  $i$ -ésima superfície, ambos correspondentes ao  $i$ -ésimo critério considerado no estudo. As variáveis  $x$  e  $y$  representam as coordenadas referentes aos pontos, centroides de cada pixel, existentes na superfície (longitude e latitude, respectivamente, para o caso de superfícies geograficamente referenciadas). Por fim,  $F(x, y)$  representa a superfície final obtida pela soma ponderada por  $w_i$  das superfícies de cada um dos critérios  $f_i(x, y)$ .

Além disso, é importante lembrar que, para a construção da superfície considerando os custos de valores monetários, não existe definição dos pesos  $w_i$  para os critérios. Nessa análise, são encontrados valores monetários para cada um dos critérios e as superfícies dos mesmos são somadas posteriormente. A seguir, na Figura 12, é apresentado um exemplo de superfície  $F(x, y)$  onde se deseja encontrar um caminho mínimo.

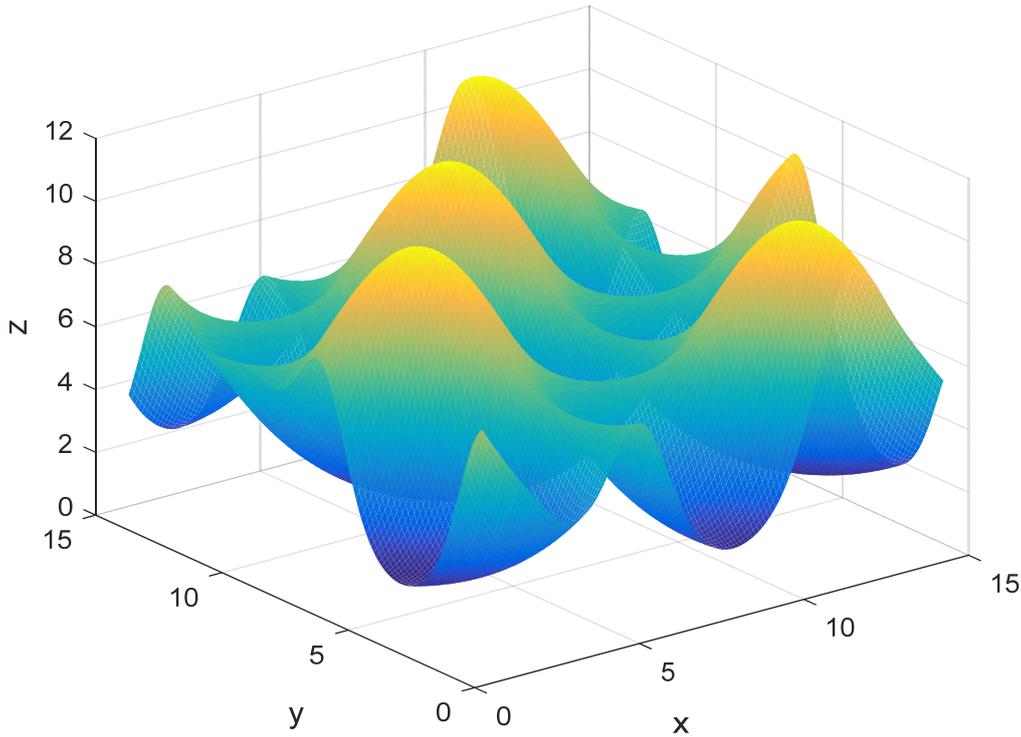


Figura 12 – Exemplo de superfície  $F(x, y)$ .

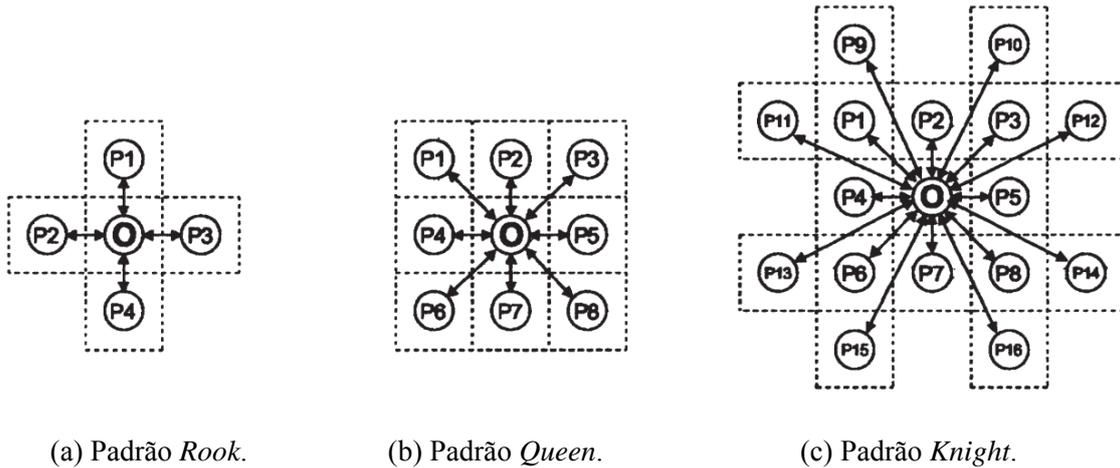
Definição do problema da rota ótima: Dado um caminho  $\mathbb{C}$  sobre a superfície  $F(x, y)$ , como indicado na Figura 12, e os pontos inicial  $B$  (*begin*) e final  $E$  (*end*), ambos contidos no conjunto de pontos que formam a superfície  $F(x, y)$ , o caminho de rota ótima é aquele para o qual o custo total do percurso do ponto inicial  $B$  ao ponto final  $E$  é o menor possível. A seguir é apresentada a formulação matemática para este problema.

$$\min \sum_{j=1}^{N_s} \left[ \frac{F(x_{P_j}, y_{P_j}) + F(x_{P_{j+1}}, y_{P_{j+1}})}{2} \right] d(P_{j+1}, P_j) \quad (19)$$

Para a formulação supracitada,  $N_s$  é o número de segmentos entre os pontos inicial  $B$  e final  $E$ ,  $j$  é o número do segmento,  $j \in \{1, 2, 3, \dots, N_s\}$ ,  $F(x_{P_j}, y_{P_j})$  é o valor do  $j$ -ésimo pixel e  $F(x_{P_{j+1}}, y_{P_{j+1}})$  representa o valor do próximo pixel escolhido para fazer parte do caminho. É importante destacar que quando  $j = 1$ ,

$P_j = P_1$ , se trata do ponto inicial  $B$  e quando  $j = N_s$ ,  $P_j = P_{N_s}$ , está relacionado ao ponto final  $E$ . Portanto,  $P_j$  e  $P_{j+1}$  são, respectivamente, o  $j$ -ésimo e seu adjacente escolhido que pertencem ao conjunto de pontos que constituem a superfície e que fazem parte do caminho determinado pelo algoritmo.

Por fim, é necessário definir o termo  $d(P_{j+1}, P_j)$  que está associado à distância entre o  $j$ -ésimo ponto e o próximo pixel adjacente. Existem muitas definições de pixels adjacentes, onde podem ser destacados o padrão *Rook* (4 células), o padrão *Queen* (8 células) e o padrão *Knight* (16 células) (BEMMELEN, 1993, GOODCHILD, 1977, STAHL, 2005, YU *et al.*, 2003). A Figura 13 apresenta os três padrões de identificação de células (pixels) adjacentes em uma superfície.



(a) Padrão *Rook*. (b) Padrão *Queen*. (c) Padrão *Knight*.  
 Figura 13 – Três tipos de padrões de identificação de pixels adjacentes num arquivo de formato *raster*.  
 Fonte: YU *et al.*, 2003.

É possível perceber que um algoritmo desenvolvido de acordo com o padrão *Rook* não consegue examinar os valores diagonais durante o processo e considera somente os cálculos baseados nas células vizinhas diretas. Enquanto que os padrões *Queen* e *Knight* consideram tais células como sendo adjacentes, ou seja, consideram movimentos mais angulares (STAHL, 2005). Para este trabalho, o algoritmo foi desenvolvido considerando o padrão *Queen*. A distância entre as células adjacentes é dada por:

$$d(P_{j+1}, P_j) = \sqrt{(x_{P_{j+1}} - x_{P_j})^2 + (y_{P_{j+1}} - y_{P_j})^2} \quad (20)$$

para  $j = 1, 2, 3, \dots, 8$

onde  $x_{P_j}$  e  $y_{P_j}$  representam as coordenadas da célula, ou seja, longitude e latitude, respectivamente, do centroide do pixel  $P_j$ ;  $x_{P_{j+1}}$  e  $y_{P_{j+1}}$  representam as coordenadas da célula, ou seja, longitude e latitude, respectivamente, do centroide do pixel  $P_{j+1}$ .

## 5.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

No presente trabalho, foi elaborada uma metodologia que consiste na customização de um conjunto de operações aritméticas utilizando um ambiente SIG (funções de álgebra de mapas), que serão aplicadas às feições/temas do tipo *raster* (imagens que contêm a descrição/valoração de cada pixel, em oposição aos gráficos vetoriais) que irão resultar em uma superfície de custo onde cada pixel/célula será ponderado e classificado. Em seguida, aplica-se um método para determinar qual é o caminho de menor custo para traçar uma linha de transmissão nesta superfície de custo.

Na metodologia aplicada neste trabalho, foram considerados dez critérios para realizar o estudo de otimização do traçado de LT. Os critérios, bem como suas classes, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Critérios utilizados para realizar os estudos sobre a otimização do traçado de LT.

<b>Critério</b>	<b>Classe</b>
Aeroportos	-
Áreas alagadas	-
Áreas de Preservação Permanente	Com vegetação rasteira
	Com fragmentos florestais
Hidrografia	Menor que 500m
	500-900m
	900-1800m
	Maior que 1800m
Rios navegáveis	-
Rodovias	-
Sistema Interligado Nacional	-
Unidades de Conservação	-
Uso do solo	Áreas urbanas
	Fragmentos florestais
	Solo exposto
	Vegetação rasteira
Estruturas	-

Os critérios a serem avaliados na aplicação da metodologia podem variar de acordo com a localidade estudada. A utilização destes ou de outros critérios dependem do conhecimento do operador do sistema. Por exemplo, no caso apresentado e estudado não foram considerados os critérios que avaliam a presença de comunidades quilombolas e terras indígenas, critérios estes importantes na determinação de traçados de LT, porém não são encontrados na região do estudo. Concluindo, cada região de estudo representará um conjunto de critérios distintos que serão aplicados na metodologia desenvolvida neste trabalho.

Neste trabalho, foi selecionada uma região no estado da Bahia, Brasil, definida pelas coordenadas geográficas entre os limites: [-12,3762 S; -11,6837 O] e [-41,7312 S; -41,0487 O] apresentada na Figura 14. Nesta área existe uma LT de 230 kV construída, e em operação no SIN (Figura 15), que servirá para interligar a nova LT. A metodologia será aplicada entre dois pontos que definem a conexão inicial e final da linha de transmissão para obter uma rota com um custo de construção otimizado (Figura 16). Um dos pontos de conexão, [-12,02 S; -41,44 O], foi definido dentro do ambiente SIG pelo operador.

Os dados utilizados para elaboração do estudo de caso avaliado neste trabalho, foram obtidos em uma escala regional (1:1.000.000), através de fontes de dados

públicos (EPE, NASA entre outros), porém existe a possibilidade de se realizar o mesmo estudo com dados mais detalhados, de melhor qualidade, onde as informações obtidas através de levantamento de campo e imagens de satélite de alta resolução podem ser utilizadas.

Cada critério foi ponderado mediante duas abordagens: utilização de valores monetários e a determinação dos pesos através do método de avaliação multicritério AHP. A Figura 17 apresenta, por meio de um fluxograma, as etapas da metodologia proposta. Os próximos tópicos deste capítulo são compostos por descrições mais aprofundadas de cada uma das etapas apresentadas.

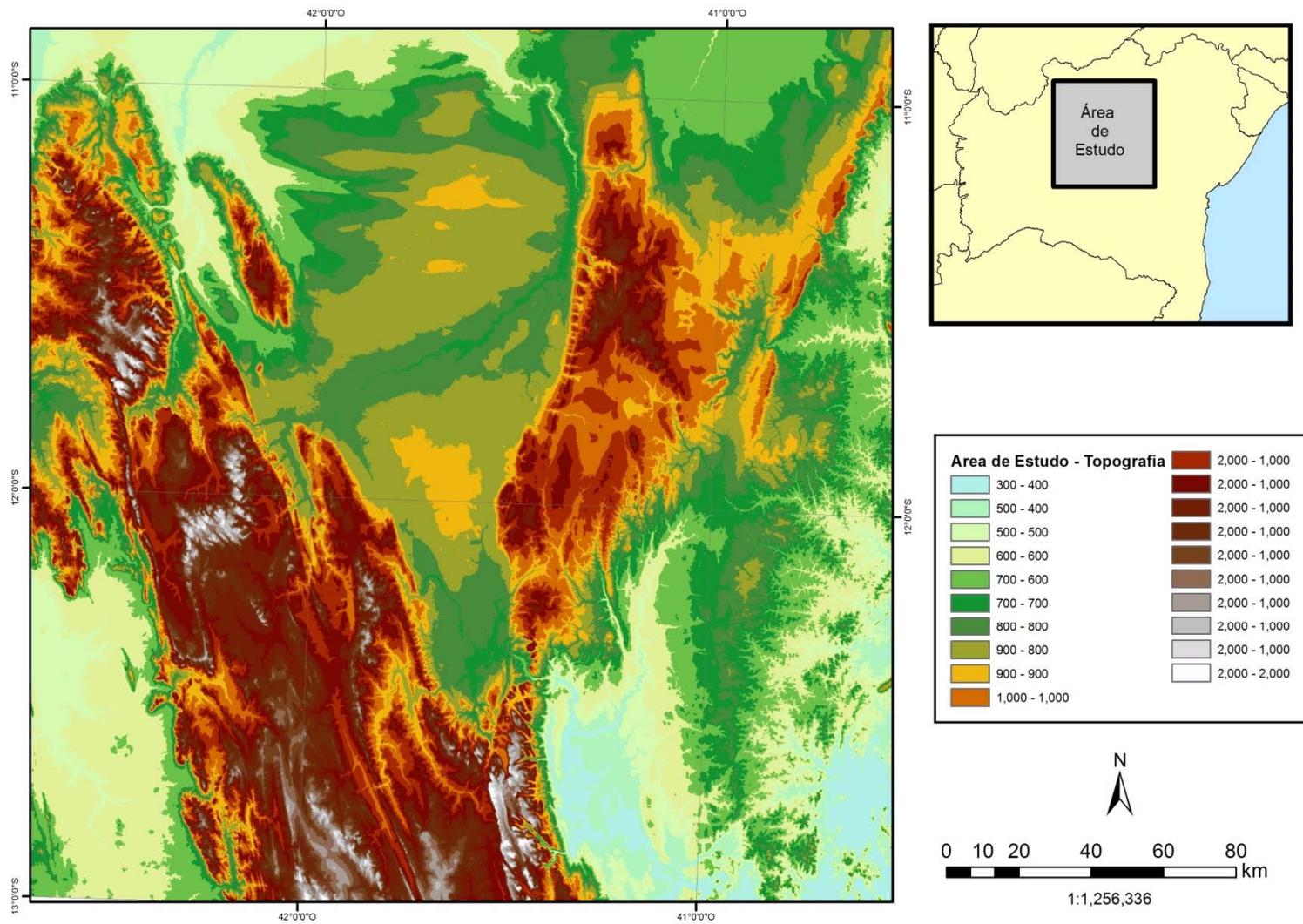


Figura 14 – Localização da área de estudo para realizar o estudo de traçado de LT.

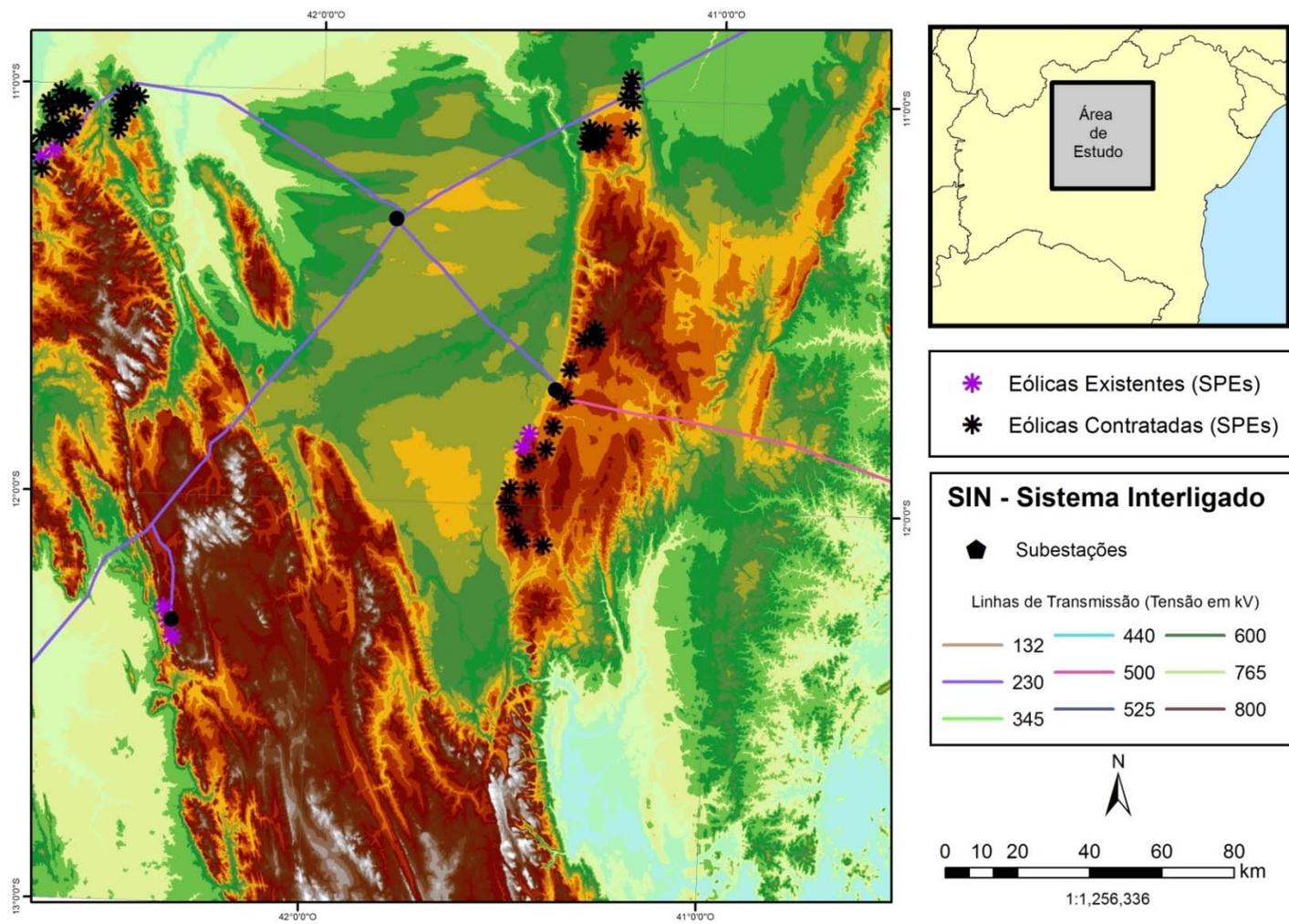


Figura 15 – Localização da área de estudo para realizar o estudo de traçado de LT, com representação de empreendimentos eólicos, subestações e SIN.

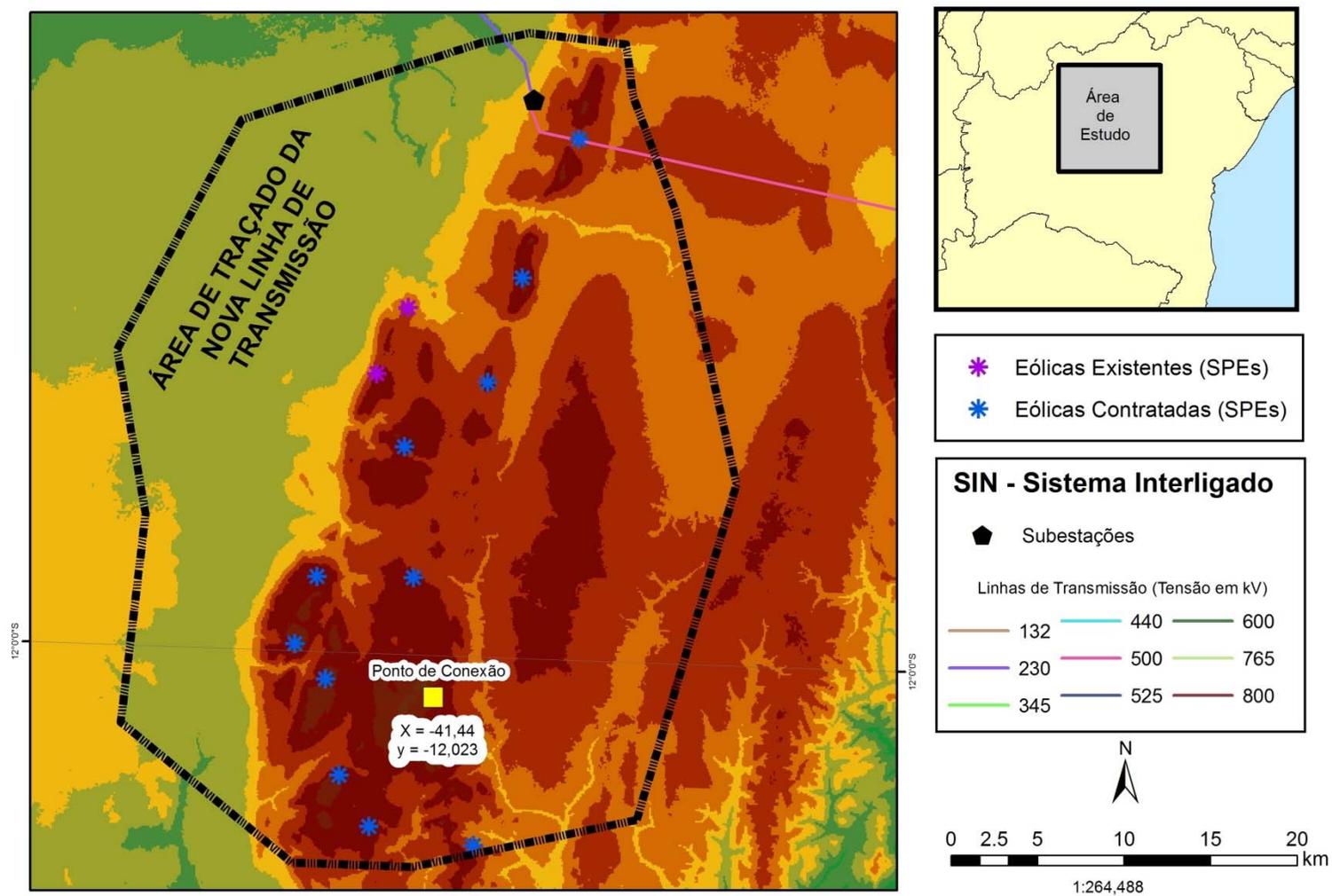


Figura 16 – Localização da área de estudo para realizar o estudo de traçado de LT, com representação do ponto de conexão e a subestação.

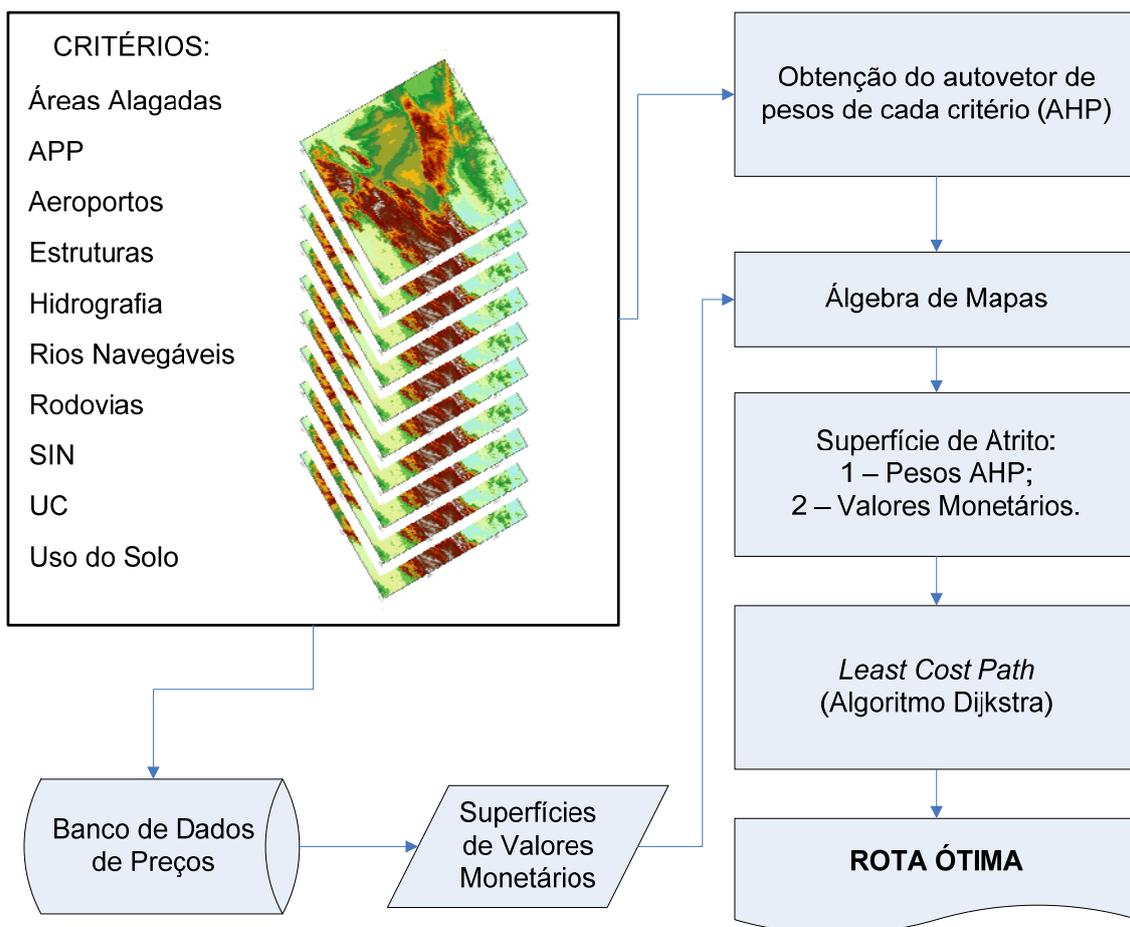


Figura 17 – Fluxograma da metodologia.

## 5.2.1 CRITÉRIOS A SEREM CONSIDERADOS

Os critérios avaliados serão abordados com maiores detalhes nos tópicos seguintes.

### 5.2.1.1 Áreas Alagadas

Ao projetar uma LT, deve-se tratar com cuidado os dados referentes às áreas alagadas, pois a presença desse critério na fisiografia da região produz mudanças nos projetos de fundações das torres de transmissão, por causa da qualidade geotécnica ser inferior nos solos existentes nessas regiões. Outros fatores, relacionados às questões ambientais, devem ser considerados para tais áreas, pois, em geral, essas regiões possuem maiores vulnerabilidades ambientais, contendo uma fauna e flora específica da área.

As dimensões e perímetros das áreas alagadas foram definidas utilizando técnicas de geoprocessamento aplicadas a um modelo digital de elevação (MIRANDA, 2005). A Figura 18 mostra a representação geográfica das áreas alagadas na região em que está sendo realizado o estudo (a região mais clara representa a existência de áreas alagadas).

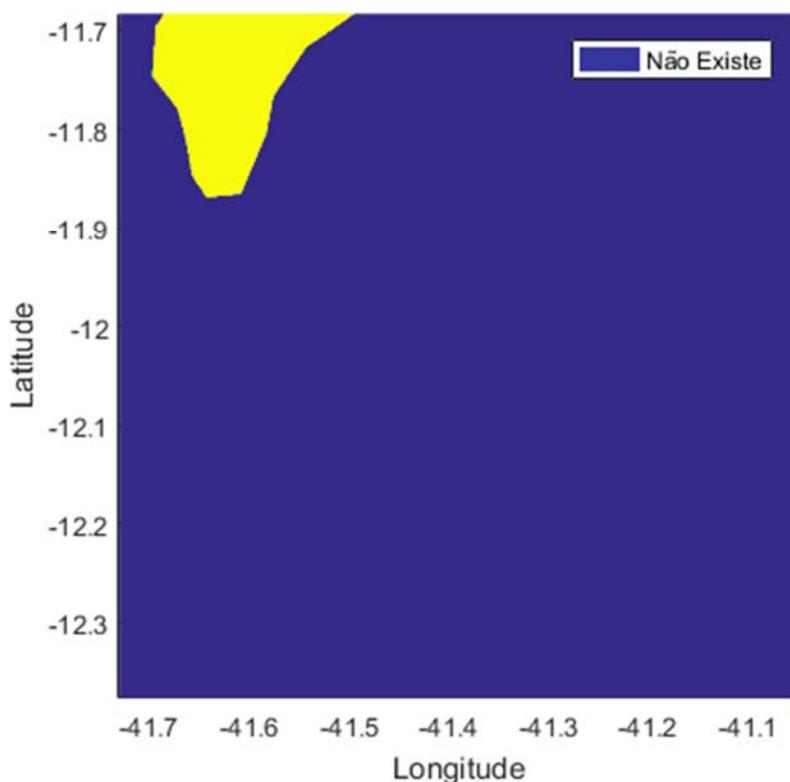


Figura 18 – Representação geográfica, *raster*, das áreas alagadas na região de estudo.

#### 5.2.1.2 Áreas de Preservação Permanente (APP)

As áreas de preservação permanente são definidas como áreas protegidas, podendo ser cobertas ou não por vegetação nativa, com o intuito ambiental de preservar recursos hídricos, paisagem, biodiversidade e estabilidade geológica. Além disso, facilitam o fluxo gênico de fauna e flora, protegem o solo e asseguram o bem-estar das populações humanas. Algumas definições relacionadas às APP são encontradas em PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2012).

A portaria nº 421 de 2011 do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), que dispõe sobre o licenciamento e a regularização ambiental federal de sistemas de transmissão de energia elétrica e dá outras providências, estabelece que, quando houver necessidade de supressão de vegetação para a instalação do empreendimento, será

requerida a Autorização para Supressão de Vegetação (ASV) juntamente com a licença de instalação, com a apresentação do inventário florestal. Para os casos em que seja necessária a supressão de vegetação em áreas de preservação permanente (APP), a emissão da ASV deverá ser precedida da Declaração de Utilidade Pública (DUP). Além disso, durante o processo para obter o licenciamento ambiental, é necessário que seja prevista uma área destinada à recomposição da vegetação suprimida, de maneira a compensar os impactos ambientais causados. Para as áreas de APP, em muitos casos, a área a ser recomposta é maior do que a área que sofreu supressão. Portanto, esse critério deve ser levado em consideração, bem como os custos adicionais relacionados. A superfície, apresentada na Figura 19, determina a APP referente à vegetação rasteira na região de estudo (cinza mais claro). Na área não foi encontrada APP relacionada com fragmentos florestais.

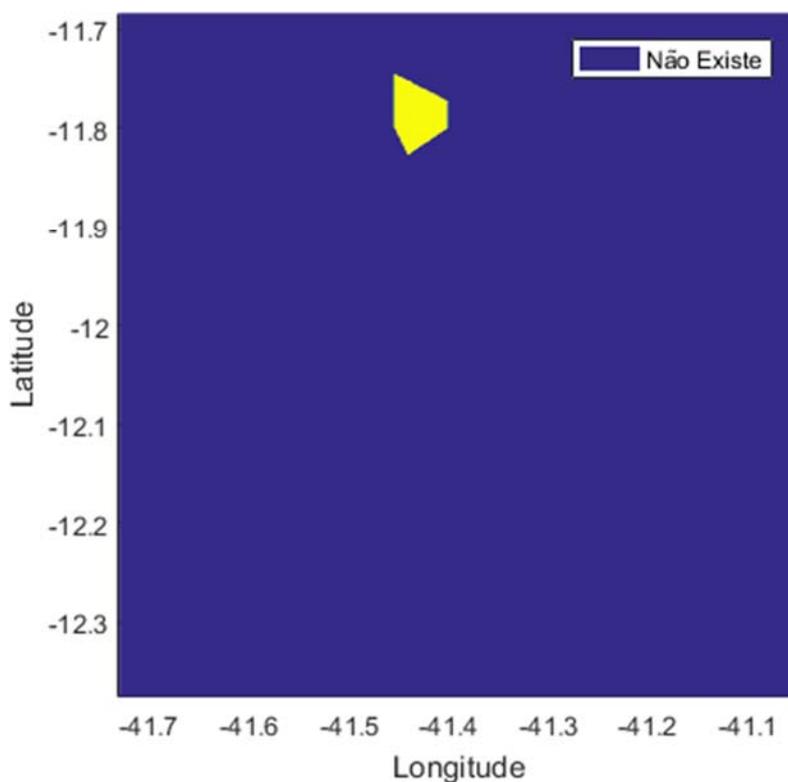


Figura 19 – Representação geográfica, *raster*, das áreas APP associadas à vegetação rasteira na região de estudo.

### 5.2.1.3 Aeroportos ou Aeródromos

É importante considerar a presença de aeroportos na região de estudo, pois os mesmos geram restrições relacionadas a construções acima do nível do solo,

principalmente no caso de linhas elétricas aéreas. Os limites dos aeroportos foram definidos baseados na utilização de imagens georreferenciadas de satélite. Foram utilizados arquivos contendo a localização dos aeroportos na área de interesse (PNLT, 2010). Com isso, foi realizada a determinação dos limites de aeroportos na área de estudo no programa QGIS. Para definir os limites, foi considerada uma distância de 3 km a partir da borda, a qual está de acordo com a Instrução de Comando da Aeronáutica, ICA 96-1 (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016). Esse documento especifica que as linhas de transmissão devem respeitar uma distância mínima de 3 km a partir da borda interna das superfícies de aproximação e decolagem, mesmo que não constitua um obstáculo. A Figura 20 mostra a representação geográfica do critério na região em que está sendo realizado o estudo.

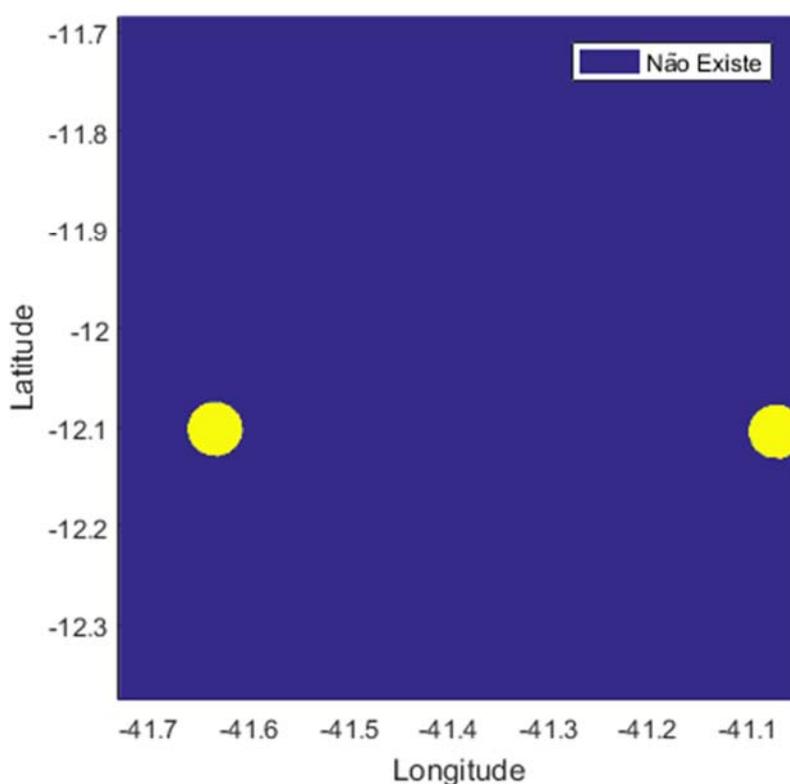


Figura 20 – Representação geográfica, *raster*, dos aeroportos na região de estudo.

#### 5.2.1.4 Estruturas

O critério estruturas está relacionado às questões econômicas e de custos de construção de uma LT. Para esse critério foi estipulado um valor único, em toda a área de realização do estudo, e representa de maneira sintética o custo de implantação de uma linha de transmissão, considerando que a mesma será construída sob condições ideais. Os valores estimados para este critério estão descritos de maneira detalhada no ANEXO II.

#### 5.2.1.5 Hidrografia

A largura dos rios é um critério importante para determinar a rota de uma LT quando sua dimensão resulta em um aumento da distância padrão entre as torres de uma linha de energia elétrica e/ou a necessidade de construir torres em cima de uma calha pluvial. A variável relacionada à hidrografia foi definida utilizando uma classificação de arquivos de imagens de satélite. Depois desse processo, foi realizado o seccionamento da hidrografia para determinar a largura média de cada divisão. Esse procedimento possibilita definir as feições que representam os corpos de água que possuam uma largura significativa, de acordo com a resolução das imagens utilizadas obtidas de satélites. A Figura 21 mostra a representação geográfica do critério na região em que está sendo realizado o estudo.

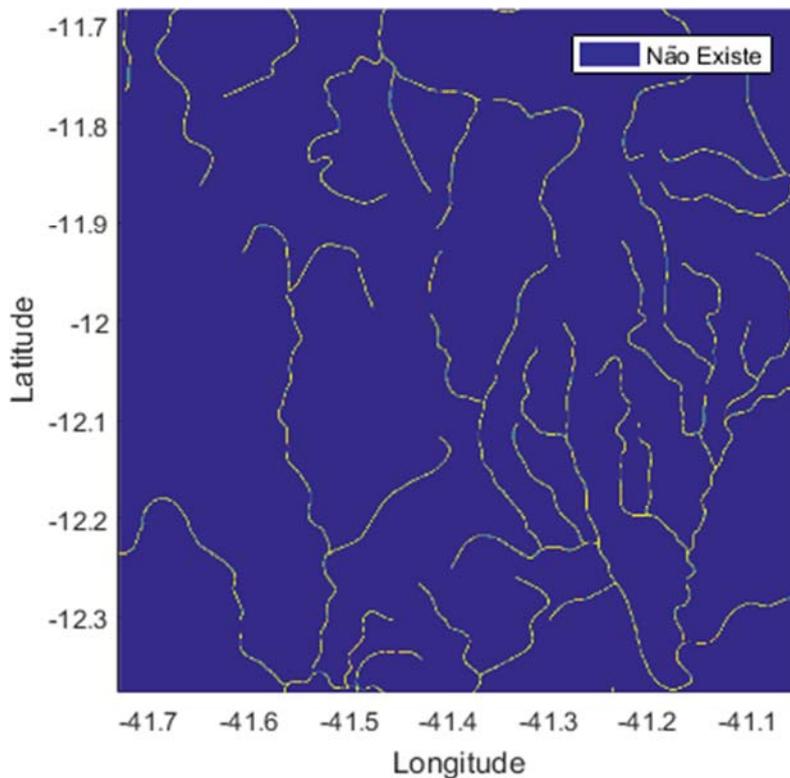


Figura 21 – Representação geográfica, *raster*, da hidrografia na região de estudo.

#### 5.2.1.6 Rios Navegáveis

O critério rios navegáveis, também denominados hidrovias, é importante pois existe uma distância mínima de segurança que deve ser respeitada para a construção de qualquer tipo de estrutura na sua proximidade. Essa distância é definida de acordo com as características e os tipos de embarcações (ABNT, 1985). Na área de estudo existem alguns rios navegáveis. As feições para este critério, na região de estudo, foram obtidas e delimitadas de acordo com as informações sobre hidrografia (PNLT, 2010). A Figura 22 mostra a representação geográfica do critério na região em que está sendo realizado o estudo (a região mais clara representa a existência de rios navegáveis).

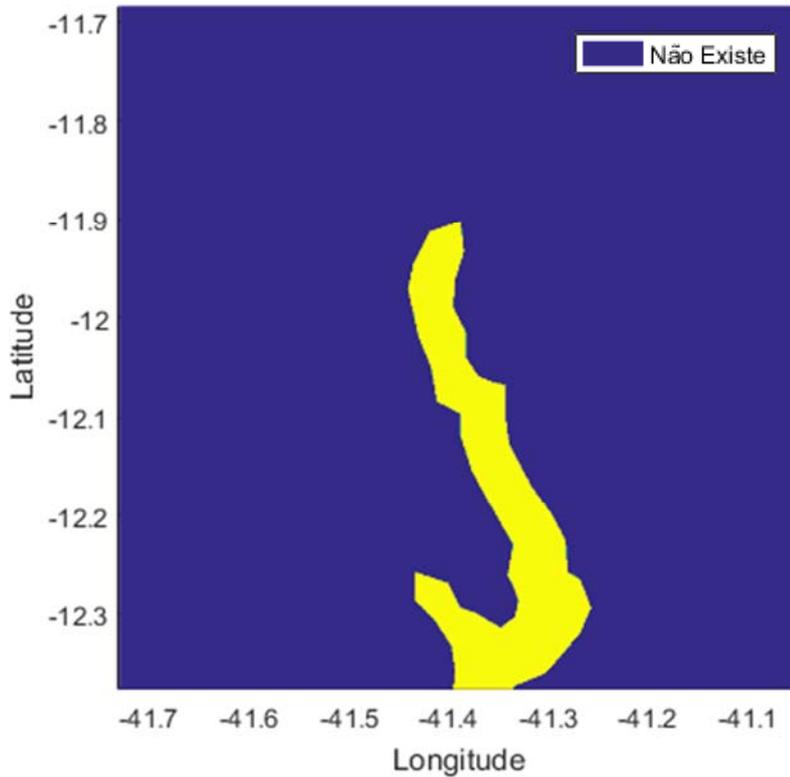


Figura 22 – Representação geográfica, *raster*, dos rios navegáveis na região de estudo.

#### 5.2.1.7 Rodovias

O critério de rodovias, de maneira semelhante ao critério anterior, é importante, pois existe uma distância mínima de segurança que deve ser respeitada para a construção de LT na sua proximidade (ABNT, 1985). Na área de estudo existem rodovias. As feições para este critério, na região de estudo, foram obtidas e delimitadas de acordo com as informações sobre rodovias (PNLT, 2010). A Figura 23 mostra a representação geográfica do critério na região em que está sendo realizado o estudo (a região mais clara representa a existência de rodovias).

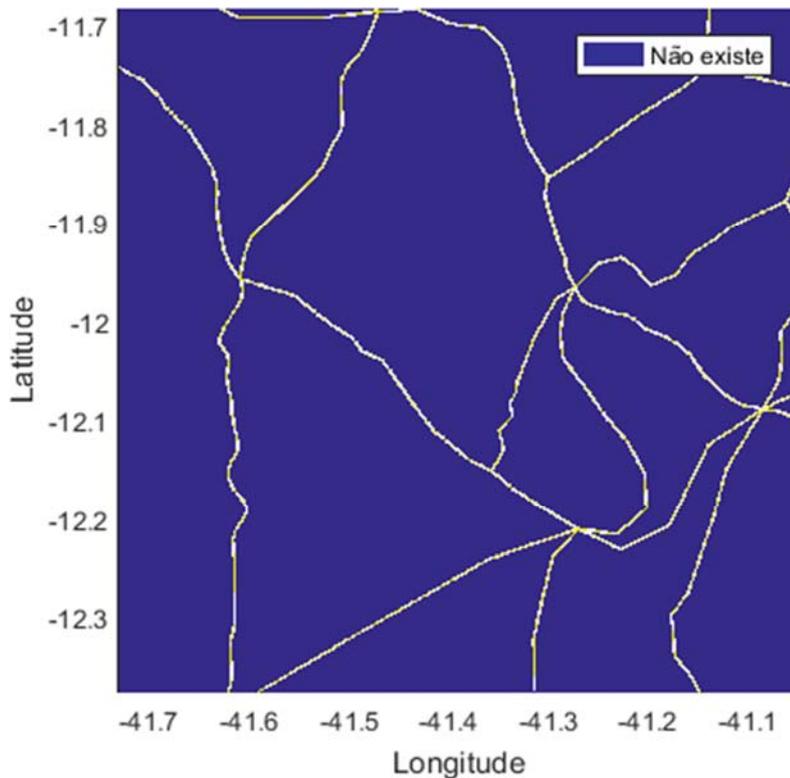


Figura 23 – Representação geográfica, *raster*, de rodovias na região de estudo.

#### 5.2.1.8 Sistema Interligado Nacional (SIN)

Este critério é tratado de maneira diferenciada com relação aos outros critérios considerados no estudo proposto. Os outros critérios avaliados são geradores de custo ou, em outras palavras, fatores que geram uma restrição à construção de uma LT. A Figura 24 apresenta a representação geográfica do SIN na região. O critério relacionado com LTs existentes é avaliado como sendo uma região preferencial para a instalação da LT, isso acontece devido à possibilidade de compartilhar a faixa de servidão e, além disso, ser possível utilizar os acessos que já foram implantados para a construção das LTs existentes.

Com relação aos acessos, principalmente rodovias, estudos mais refinados devem ser verificados quanto à possibilidade de compartilhar a faixa de segurança em que deverão ser ponderadas as vantagens de uma possível cobrança por tal compartilhamento. As feições geográficas deste critério foram obtidas pelo Portal de Geoprocessamento da ANEEL que reúne os dados geográficos do setor elétrico que constam nas bases de dados da agência (ANEEL, 2016).

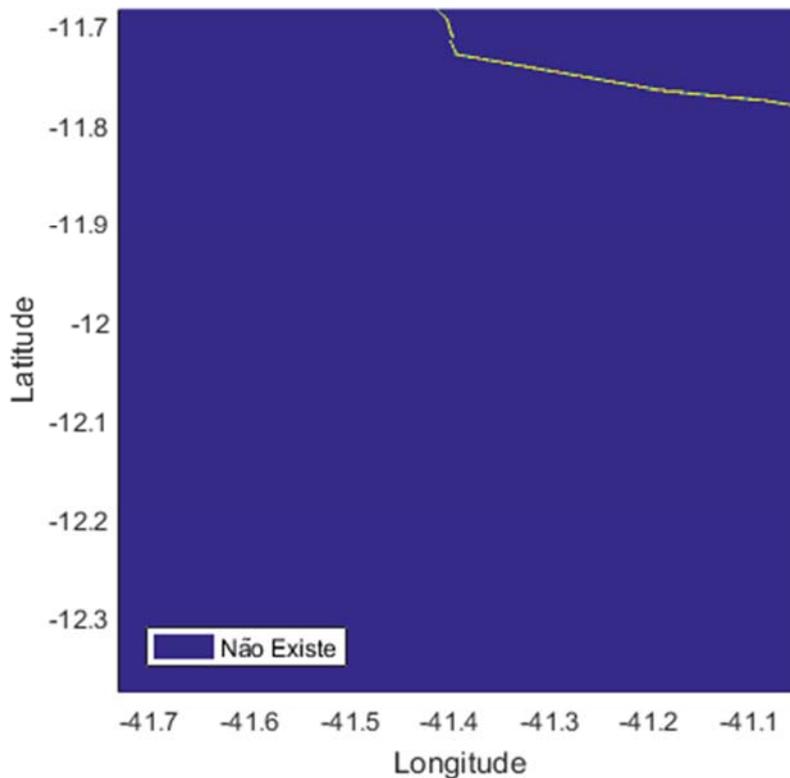


Figura 24 – Representação geográfica, *raster*, do Sistema Interligado Nacional (SIN) na região de estudo.

#### 5.2.1.9 Unidades de Conservação (UC)

No Brasil as unidades de conservação são determinadas em conformidade com a Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000, como sendo espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2000).

As dificuldades, ou custos, relacionados a passar por essas áreas são referentes ao processo de obter o licenciamento ambiental para construção da LT. Abordando o problema de maneira geral, o procedimento de planejar o traçado de uma LT deve ser realizado de maneira a evitar, ou minimizar, a interferência em UC. Entretanto, nos casos em que a interposição não pode ser evitada, é indispensável que sejam adotadas ações de maneira a mitigar e compensar a intervenção.

Um exemplo que pode ser citado é a utilização de técnicas de construção especiais para os trechos que irão sofrer com a interferência, implementando torres mais altas,

reduzindo assim a necessidade de desmatamento na área destinada à faixa de servidão da LT, pois, desta forma, é possível reduzir o desmatamento sendo necessária apenas a faixa de limpeza para que seja efetuado o lançamento de cabos.

Outrossim, deve ser considerado durante o processo de licenciamento do empreendimento a recomposição florestal de outra região com uma área equivalente ou maior do que a região que sofreu a supressão de vegetação em UC. Além disso, para o caso de UC federal de uso sustentável, a portaria interministerial nº 37 de 2014 (MP/MMA/MME, 2014) estabelece um valor fixo da cessão de uso onerosa tendo em vista o disposto no art. 12, § 2º, do Decreto nº 7.154 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2010), e na Portaria Interministerial nº 436 (MP/MMA, 2009).

Portanto, é muito importante conhecer previamente os limites das UCs durante o processo de planejamento para construção de uma LT. Além disso, os custos e impactos de travessia dessas regiões devem ser levados em consideração. A Figura 25 mostra a representação geográfica das Unidades de Conservação na região em que está sendo realizado o estudo. Essa área foi determinada com base em informações que estão disponíveis no Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014). Na imagem a região mais clara representa a existência de UC.

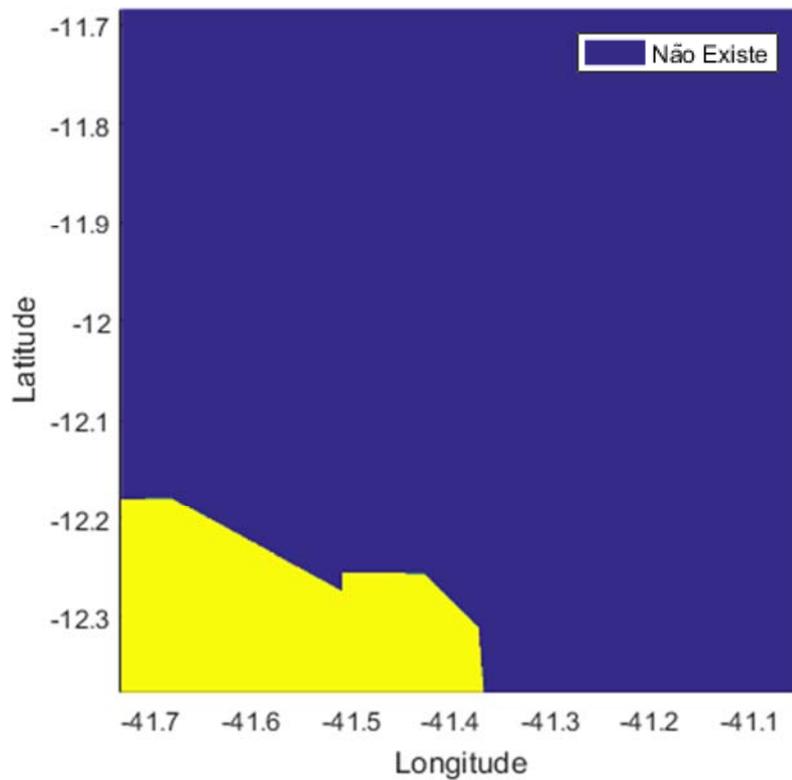


Figura 25 – Representação geográfica, *raster*, das Unidades de Conservação (UC) na região de estudo.

#### 5.2.1.10 Uso do Solo

O critério de uso do solo está relacionado, geralmente, aos custos de indenização gerados pela utilização de terras da faixa de servidão e, também, provenientes da limpeza da área e as regulamentações ambientais de recomposição da vegetação para as situações onde haja necessidade de remover porções florestais na faixa e construção de torres que possuam altura mais elevada, de maneira a reduzir os impactos ambientais. O presente trabalho considera quatro classes que estão relacionadas ao uso do solo: áreas urbanas, fragmentos florestais, vegetação rasteira e solo exposto. A Figura 26 apresenta a representação geográfica do uso do solo na região em que está sendo realizado o estudo.

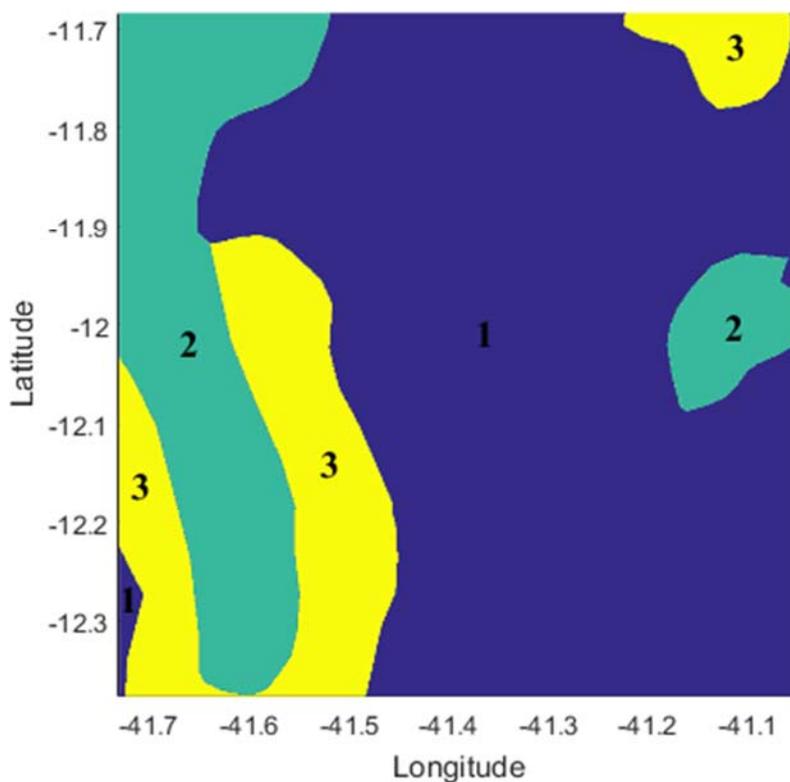


Figura 26 – Representação geográfica, *raster*, do Uso do Solo na região de estudo.

A Figura 26 apresenta as classes consideradas no critério Uso do Solo e na Tabela 7 é apresentada a classificação em relação aos números identificadores exibidos de acordo com as classes (Fragmentos Florestais, Solo Exposto e Vegetação Rasteira).

Tabela 7 – Classificação quanto aos números identificadores, Figura 26, das classes do critério Uso do Solo.

<b>Classe</b>	<b>Identificador</b>
<b>Fragmentos Florestais</b>	(2)
<b>Solo Exposto</b>	(1)
<b>Vegetação Rasteira</b>	(3)

Na Figura 27 são exibidos os pontos com áreas urbanas, também consideradas como classe no critério de Uso do Solo.

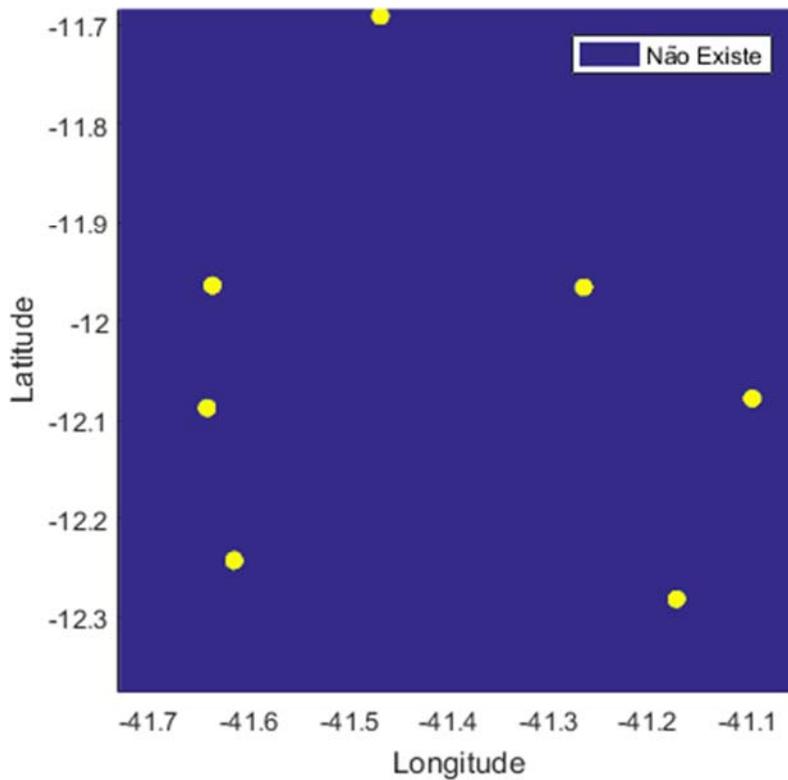


Figura 27 – Representação geográfica, *raster*, de áreas urbanas na região de estudo.

## 5.2.2 MÉTODO AHP (PESOS) E VALORES MONETÁRIOS

### 5.2.2.1 Pesos AHP

A metodologia de avaliação multicritério AHP foi utilizada para ponderar os critérios utilizados no trabalho. A Tabela 8 apresenta a matriz de comparações pareadas, e o autovetor de pesos normalizado (os pesos de cada um dos critérios considerados no estudo foram determinados pelo Método da Média Geométrica apresentado na seção 3.2.3.2). Cada critério deve ser ponderado em relação a todos os outros critérios utilizando uma escala de importância de 1-9 (vide 3.2.2). Além disso, os critérios avaliados foram numerados de maneira a facilitar a apresentação da matriz de comparações pareadas (os números em negrito da primeira linha e da primeira coluna da Tabela 8, não possuem qualquer relação com os pesos, trata-se apenas de um identificador dos critérios considerados).

Tabela 8 – Aplicação do método AHP, matriz de comparações pareadas.

<b>CRITÉRIOS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Pesos</b>
<b>1</b> SIN	1	1/9	1/2	1/2	1/9	1/2	1/4	1/4	1/2	1/9	2,03%
<b>2</b> Áreas Alagadas	9	1	4	9	1/2	3	1	2	9	1/2	15,77%
<b>3</b> Rodovias	2	1/4	1	1	1/6	1	1/2	1/2	2	1/7	4,09%
<b>4</b> Uso do Solo	2	1/9	1	1	1/9	1	1/3	1/3	1	1/9	3,04%
<b>5</b> Aeroportos	9	2	6	9	1	6	3	3	9	1/2	23,51%
<b>6</b> APP	2	1/3	1	1	1/6	1	1/2	1/2	1	1/9	3,83%
<b>7</b> UCs	4	1	2	3	1/3	2	1	1	1	1/2	8,40%
<b>8</b> Rios Navegáveis	4	1/2	2	3	1/3	2	1	1	2	1/4	7,84%
<b>9</b> Estruturas	2	1/9	1/2	1	1/9	1	1	1/2	1	1/9	3,29%
<b>10</b> Hidrografia	9	2	7	9	2	9	2	4	9	1	28,22%

Para esta matriz de comparações pareadas foi encontrado um  $CR = 3,12\%$ , o qual está abaixo do limite máximo (10%) determinado pelas literaturas citadas (vide 3.2.4). Essa matriz, indicada na Tabela 8, foi gerada a partir de um processo heurístico de otimização que busca reduzir o índice  $CR$ . O algoritmo utilizado para obter essa matriz foi criado com base no Enxame de Partículas (de acordo com ANEXO III), no próximo tópico é apresentada uma breve explicação do algoritmo. A Figura 28 apresenta a evolução do índice  $CR$  para cada iteração do algoritmo.

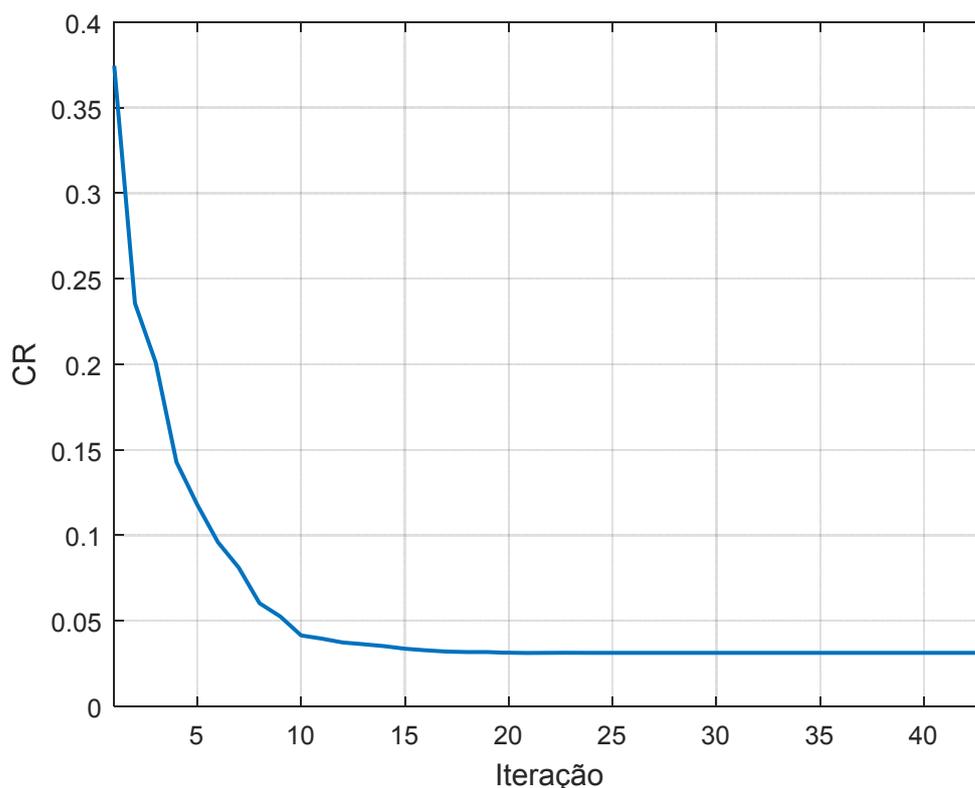


Figura 28 – Índice CR para cada iteração do processo.

Antes de encontrar o valor das comparações pareadas, foi predefinida uma classificação de prioridades dos critérios considerados, exibido na Tabela 9. Posteriormente, esses critérios foram organizados em ordem decrescente dos valores dos pesos (autovetor de pesos) de acordo com a classificação.

Tabela 9 – Classificação de prioridades dos critérios considerados.

<b>Item</b>	<b>Classificação dos Critérios</b>
<b>1</b>	Hidrografia
<b>2</b>	Aeroportos
<b>3</b>	Áreas Alagadas
<b>4</b>	UCs
<b>5</b>	Rios Navegáveis
<b>6</b>	Rodovias
<b>7</b>	APP
<b>8</b>	Estruturas
<b>9</b>	Uso do Solo
<b>10</b>	SIN

### 5.2.2.2 Enxame de Partículas

O método Enxame de Partículas é um método heurístico, que tenta imitar certos fenômenos da natureza (neste caso, dinâmica populacional). Esse método não possui prova matemática de convergência. Esse algoritmo por Kennedy e Eberhart (1995). É baseado no comportamento social de populações que divide as características em:

- ↑ Individualidade: ↑ Aumenta a chance de achar locais novos.  
↓ *Diminui a convergência.*
- ↑ Sociabilidade: ↑ Troca de conhecimentos entre indivíduos.  
↓ *Diminui a chance de achar locais novos.*

O processo iterativo é dado por:

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \quad (21)$$

Onde  $x_k^i$  é a posição da partícula  $i$  na iteração  $k$  e  $v_{k+1}^i$  é definida como:

$$v_{k+1}^i = \alpha v_k^i + \beta_1 r_1^i (P^i - x_k^i) + \beta_2 r_2^i (P^g - x_k^i) \quad (22)$$

A parcela  $\beta_1 r_1^i (P^i - x_k^i)$  representa a individualidade e  $\beta_2 r_2^i (P^g - x_k^i)$  representa a sociabilidade,  $k$  é o contador do processo iterativo,  $i$  é o  $i$ -ésimo indivíduo,  $\alpha$  é o fator de inércia,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são constantes empíricas,  $r \in U[0,1]$ , ou seja, é um número randômico entre 0 e 1,  $P^i$  é a melhor posição encontrada pelo indivíduo  $i$  e  $P^g$  é a melhor posição encontrada globalmente pela população.

A população durante todo o processo é gerada a partir dos contornos definidos, ou seja:

$$x = x_{min} + r(x_{max} - x_{min}) \quad (23)$$

Onde  $x_{max}$  e  $x_{min}$  são os limites máximo e mínimo, respectivamente, das variáveis. Além disso, o tamanho da população é empírico, em geral  $10 \times NUMVAR$ ,  $NUMVAR$  é o número de variáveis ou a dimensão do problema.

Este processo iterativo é repetido até que uma das tolerâncias de erro seja alcançada ou até o número máximo de iterações do processo. A tolerância é a norma da diferença dos vetores de  $x$  (população) na iteração atual e anterior, dada a seguir:

$$tol = \|pop_k - pop_{k-1}\| \quad (24)$$

Onde  $pop_k$  é o vetor de valores das variáveis na iteração atual e  $pop_{k-1}$  é o vetor de valores das variáveis na iteração anterior. O outro critério de parada do método é o número máximo de iterações:

$$k \leq kmax \quad (25)$$

Onde  $k$  é o número da iteração e  $kmax$  é o número máximo de iterações que o método fará independente da tolerância mencionada anteriormente. Este método funciona para funções multimodais e como não possui derivada pode ser usado para funções descontínuas. Porém, exige muitas avaliações da função objetivo.

### 5.2.2.3 Valores Monetários

A superfície de valores monetários obtida representa o custo, considerado como sendo real, de construção de uma LT relacionado a cada um dos critérios avaliados durante o estudo. A sua determinação foi realizada levando em consideração dois aspectos, que são: os custos estruturais básicos e os custos adicionais.

Os custos estruturais básicos estão associados ao custo material de construir a LT levando em conta condições normais. Ou seja, uma LT considerada ideal seria construída em regiões planas e sem qualquer tipo de restrição, como os critérios avaliados no presente trabalho, entre outros. Estes custos são representados pelo critério Estruturas (infraestruturas básicas de uma LT).

Já os custos adicionais englobam os custos complementares para travessia da superfície gerada pela soma ponderada dos dez critérios que foram avaliados no estudo. Os valores de custo dos critérios considerados foram definidos a partir de uma consulta a Base de Preços de Referência (ANEEL, 2017), de acordo com a Resolução

Homologatória N° 758 (ANEEL, 2009), levando em consideração as características técnicas específicas da LT e de cada componente da mesma.

### 5.2.3 *LEAST COST PATH*

#### 5.2.3.1 Superfície de Atrito

O primeiro passo para a aplicação da metodologia de otimização do traçado é a confecção das superfícies de custo em formato *raster*. Os critérios utilizados foram inicialmente obtidos em formato vetorial, mais especificamente no formato *shapefile*<sup>3</sup>(\* .shp), com exceção do arquivo de uso do solo, que foi gerado no formato *raster* (\* .tif). Uma característica importante a ser destacada é que os arquivos utilizados, associados a cada um dos critérios considerados, foram padronizados de acordo com um sistema de referência espacial. Utilizou-se como base uma resolução espacial (tamanho do pixel de cada raster utilizado no trabalho) de 90 m.

Com isso, para todos os critérios considerados, são gerados dois arquivos, com dados georreferenciados referentes à superfície de custo (ou superfície de atrito): um relacionado aos valores de custos monetários e outro associado aos pesos obtidos pelo método AHP. Por fim, os arquivos são unidos (álgebra de mapas), considerando um dos métodos citados, de maneira a se obter uma composição da superfície de custo.

#### 5.2.3.2 *Least Cost Path*

Durante essa etapa da metodologia desenvolvida, é realizada a aplicação do algoritmo elaborado. A superfície de atrito de cada um dos critérios considerados, o ponto inicial e o ponto final da LT são os dados de entrada do algoritmo que determinará a superfície de rugosidade da área de estudo e o traçado otimizado da linha. Cada pixel da superfície da área de estudo, arquivo georreferenciado, tem um valor que está associado ao custo de transposição, ou travessia, do mesmo. O traçado é gerado com base numa malha de pontos (centroides dos pixels) e o segmento entre eles. Os segmentos entre os pontos são gerados com base em regras de deslocamento possíveis entre pixels adjacentes (neste trabalho foi escolhido o padrão *Queen*).

---

<sup>3</sup> *shapefile* é um formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em formato vetorial usado por Sistemas de Informações Geográficas.

A Figura 29 mostra um exemplo de representação dos centroides e dos segmentos entre os pontos. O arquivo no formato *raster* utilizado como exemplo possui 216 pixels. Os pontos são os centroides que representam cada célula (pixel) e as linhas são os possíveis caminhos que o algoritmo pode percorrer de acordo com a regra do padrão Queen. Depois que a rede virtual é estabelecida, o algoritmo de DIJKSTRA (1959) pode ser aplicado para obter o caminho de menor custo acumulado e a distância entre os pontos inicial e final da LT. A estratégia desse algoritmo é examinar todos os nós adjacentes, de acordo com a regra de identificação, ao nó avaliado mais recentemente no caminho. Os pontos adjacentes ao nó inicial são avaliados primeiro, e os nós mais distantes são avaliados por último (YU et al., 2003).

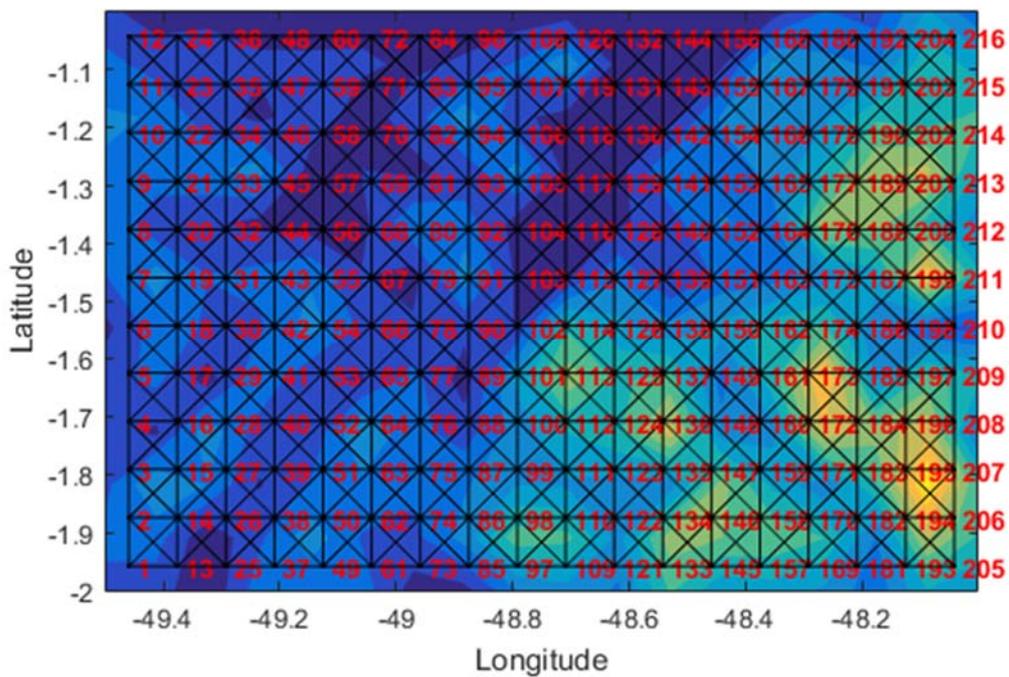


Figura 29 – Malha de pontos (centroides dos pixels) e segmentos entre os mesmos.

Para calcular os custos, existem duas equações para o padrão Queen (STAHL, 2005, YU et al., 2003). A equação (26) é usada para calcular os custos acumulados das quatro conexões diretas:

$$CC_{(O,P_i)} = \frac{(C_O + C_{P_i})}{2} \mu + CC_O, \quad \text{para } i = 2, 4, 5 \text{ e } 7 \quad (26)$$

A equação (27) é usada para calcular os custos acumulados das quatro conexões na diagonal:

$$CC_{(O,P_i)} = \frac{(C_O + C_{P_i})}{2} \mu \sqrt{2} + CC_O, \quad \text{para } i = 1, 3, 6 \text{ e } 8 \quad (27)$$

onde  $CC_{(O,P_i)}$  é o custo acumulado da célula  $O$  para a célula  $P_i$ ;  $C_O$  e  $C_{P_i}$  são os custos para cruzar (ou atravessar), respectivamente, as células  $C_O$  e  $C_{P_i}$  individualmente;  $\mu$  é a largura (ou resolução) de cada célula, ou pixel;  $CC_O$  é o custo acumulado na célula  $O$ . Portanto, as duas equações acima fornecem a base conceitual para desenvolver o algoritmo para determinar a rota de menor custo. A Figura 30 apresenta um exemplo de caminho de menor custo obtido através do algoritmo DIJKSTRA (1959) de acordo com o padrão Queen de identificação de células adjacentes. Os marcadores circulares representam os pontos (centroides dos pixels, ou células) selecionados.

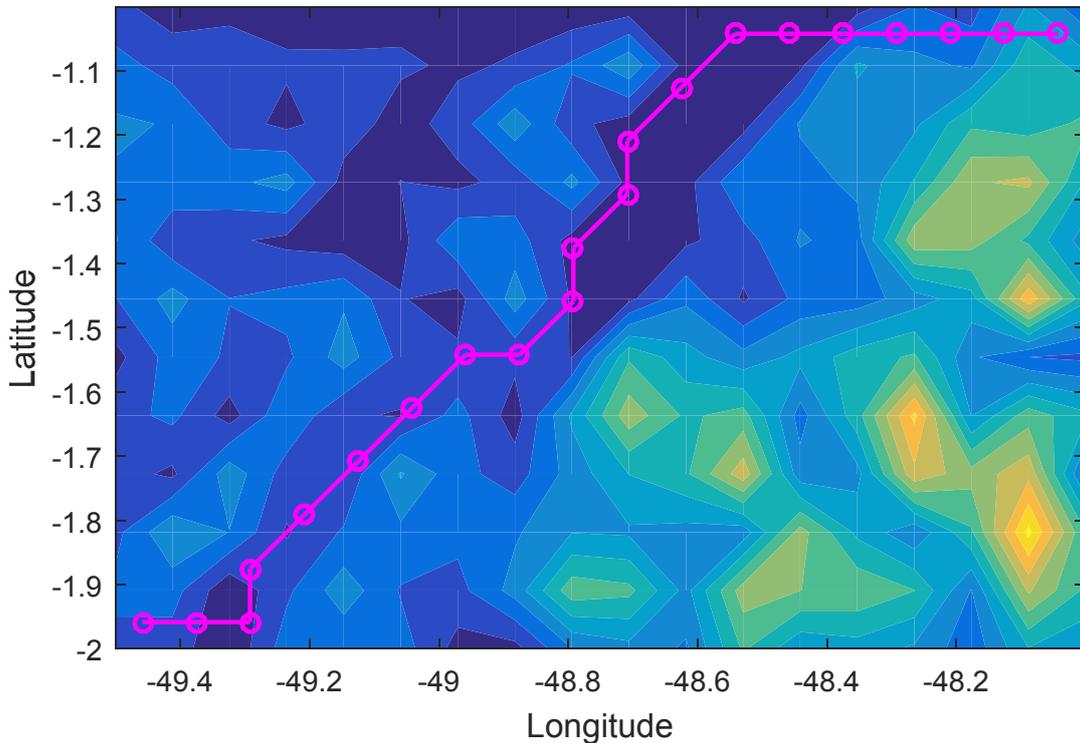


Figura 30 – Exemplo de caminho de menor custo.

O custo acumulado é calculado de acordo com as equações (26) e (27). Tendo como base a Equação (20), a distância para conexões diretas é definida como:

$$D_{(O,P_i)} = \mu = (x_o - x_i) = (y_o - y_i) \text{ para } i = 2, 4, 5 \text{ e } 7 \quad (28)$$

E a distância para conexões na diagonal é definida como:

$$D_{(O,P_i)} = \sqrt{2}\mu = \sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \text{ para } i = 1, 3, 6 \text{ e } 8 \quad (29)$$

onde  $x_o$  e  $y_o$  representam as coordenadas da célula  $O$ , ou seja, longitude e latitude, respectivamente, do centroide do pixel  $O$ ;  $x_i$  e  $y_i$  representam as coordenadas da célula  $P_i$ , ou seja, longitude e latitude, respectivamente, do centroide do pixel  $P_i$ .

Como a resolução do pixel é conhecida, e igual a 90 metros, e se sabe as coordenadas de cada ponto do traçado, o custo total do traçado da LT é calculado pelo somatório do custo incremental de cada segmento de reta correspondente a cada par de pontos. O comprimento total do caminho é calculado considerando o somatório dos comprimentos incrementais dos segmentos correspondentes a cada um dos pares de pontos. No próximo tópico, será apresentado com maiores detalhes o algoritmo de DIJKSTRA (1959).

### 5.2.3.3 Algoritmo DIJKSTRA (1959)

De acordo com NETTO (2011) este algoritmo é utilizado somente para grafos com valores positivos. Considera-se uma matriz de valores  $V(G) = [v_{ij}]$ . O conjunto de vértices é obtido a cada iteração gerando duas listas, que são:

- **F** (fechado): constituído pelos vértices para os quais já se conhece um caminho mínimo (caminho de menor distância entre dois pontos);
- **A** (aberto): constituído pelos vértices para os quais ainda não se conhece um caminho mínimo.

Para cada iteração realizada, um vértice é transferido da lista **A** para a lista **F**. Sem perder generalidade, é realizada a inicialização atribuindo o valor zero à origem **1** (ponto inicial), indicada na Figura 31, e fazendo estimativas pessimistas para as distâncias da origem aos demais vértices,  $v_i = +\infty, \forall i > 1$ . Com isso, o algoritmo tem a possibilidade de determinar as melhores opções, sempre que as mesmas existirem.

Na iteração  $k$ , um vértice  $r$  entra em  $F$  e existe uma estimativa (pessimista) para o valor do caminho de  $1$  até  $i \in A \cap N^+(r)$ ; então se compara essa estimativa com o valor do caminho percorrendo por  $r$ , de acordo com a Figura 31.

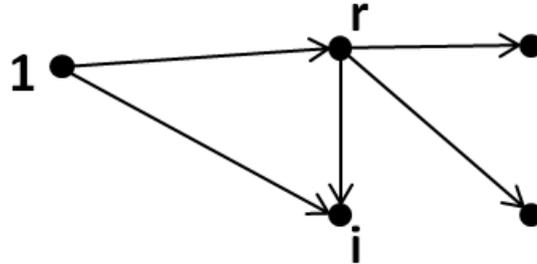


Figura 31 – Algoritmo de DIJKSTRA (1959).

A comparação é realizada da seguinte forma:

$$d_{1i}^k = \min[d_{1i}^{k-1}, (d_{1r} + v_{ri})] \forall i \in S, S = A \cap N^+(r) \quad (30)$$

onde  $S$  é atualizado a cada iteração do processo. O vértice  $r$  que é usado como base foi obtido de acordo com:

$$d_{1r}^k = \min_{i \in S^{k-1}} [d_{1i}^{k-1}] \quad (31)$$

para os elementos existentes no conjunto  $S$  na iteração anterior. O algoritmo que está sendo exibido engloba a determinação de um rótulo  $rot(i)$  que indica o vértice de  $F$  responsável pelo valor ótimo de  $d_{1i}$ , em outras palavras, pela distância verdadeira. Com isso, ao examinar o vetor  $rot$  é possível realizar um novo traçado dos caminhos que conectam a origem aos demais vértices.

Esse processo é executado até que  $A = \emptyset$  ou até que se determine o caminho mínimo da origem a um vértice  $y$  dado, sabendo que  $y \in F$ , caso esse seja o objetivo. Portanto, pode-se formular um algoritmo genérico da seguinte forma:

**Início**

$$\begin{aligned} d_{11} &\leftarrow 0; \\ d_{1i} &\leftarrow +10^6 \forall i \in V - \{1\}; \\ S &\leftarrow \{1\}; \end{aligned}$$

```

A ← V;
F ← ∅;
rot(i) ← 0 ∀i;
Enquanto A ≠ ∅ fazer
    Início
        r ← v ∈ V | d1r = mini∈A[d1i];

        F ← F ∪ {r}; A ← A - {r};
        S ← A ∩ N+(r);

        Para i ∈ S fazer
            Início
                p ← min[d1ik-1, (d1r + vri)];

                Se p < d1ik-1 então

                    Início
                        d1ik ← p;
                        rot(i) ← r;
                    Fim;
            Fim;
        Fim;
    Fim;
Fim;

```

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são demonstrados casos mais simples como exemplos para testar e analisar os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido. Os seis primeiros casos possuem o mesmo número de pontos (centroides de uma matriz quadrada que formam um grafo). No sétimo exemplo é apresentada uma comparação do traçado encontrado pelo programa implementado e o traçado gerado pelo programa ArcGIS. Não foram encontrados casos estudados na literatura com superfícies conhecidas impossibilitando assim a realização de comparações entre trabalhos (*benchmarking*).

No último caso são apresentados os resultados obtidos a partir de duas superfícies de atrito. Inicialmente, foi gerada uma superfície de atrito que considera apenas os custos monetários de cada critério e suas matrizes (obtidas a partir de um arquivo *raster*) são somadas diretamente. Depois, gerou-se uma superfície que soma as matrizes, de cada critério, considerando os pesos do método AHP. Para determinar a rota de menor custo em ambas às superfícies foi aplicado o algoritmo de DIJKSTRA (1959).

### 6.1 CASO 1

Neste primeiro caso é apresentada uma superfície que é projetada no plano e representada por uma matriz quadrada que contém 100 pontos (10x10). Esta condição representa uma situação em que todos os critérios considerados e pontos da matriz possuem o mesmo valor numérico, ou seja, possuem os mesmos pesos. Portanto, neste exemplo espera-se que o resultado de caminho de menor custo seja exatamente o caminho de menor distância possível entre os pontos de partida e chegada.

A Figura 32 apresenta a imagem da superfície com a barra de valores dos pontos (todos iguais a 1) e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do canto inferior esquerdo da matriz e o ponto final a célula do canto superior direito. Nota-se que o traçado encontrado foi a diagonal do quadrado que é o caminho de menor distância entre os dois pontos escolhidos. Portanto, o caminho de menor custo entre os pontos é o caminho de menor distância entre os pontos, como era esperado. Este resultado indica que a implementação do algoritmo de DIJKSTRA (1959) está correta.

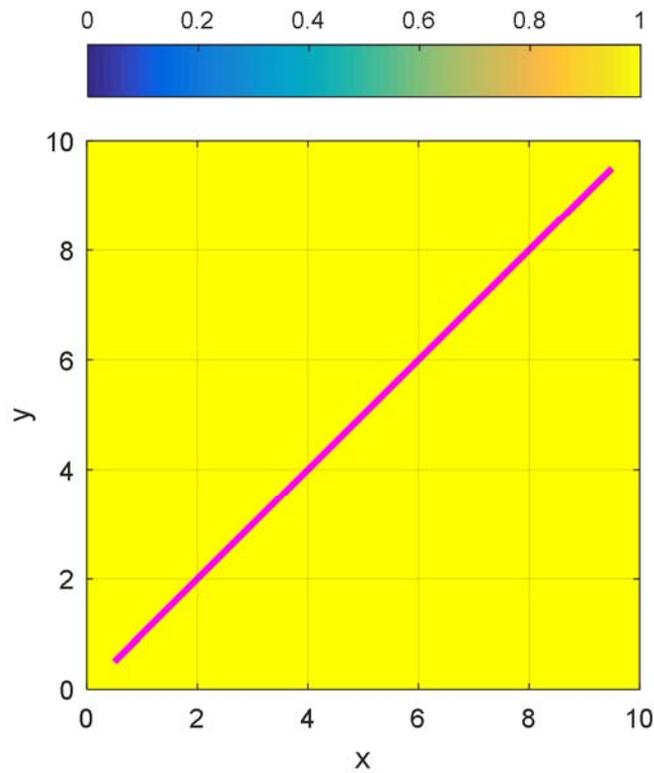


Figura 32 – Caso 1.

Na Tabela 10 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. Os dois valores ficaram iguais (como se esperava), pois os valores de custo de cada centroide é igual a 1.

Tabela 10 – Comprimento e custo Caso 1.

Comprimento	Custo
12,73	12,73

## 6.2 CASO 2

Neste caso a superfície também é definida por uma matriz com a mesma dimensão do caso anterior. Porém, neste caso, apenas os pontos relacionados aos centroides das células da borda inferior e da borda à direita possuem valores iguais a 1. Os demais pontos foram definidos com valores iguais a 5. Portanto, neste exemplo não se espera que o resultado de caminho de menor custo seja exatamente o caminho de menor distância possível entre os pontos de partida e chegada, como no caso anterior. Era esperado que o algoritmo evitasse passar pelos pontos com custos iguais a 5.

Na Figura 33 é apresentada a imagem da superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do canto inferior esquerdo da matriz e o ponto final a célula do canto superior direito. Nota-se que, no traçado encontrado, desviou-se dos pontos com maiores custos de travessia e, com isso, o caminho encontrado passou apenas por pontos com valores iguais a 1. O caminho obtido não foi, portanto, a diagonal do quadrado como no caso anterior. Conseqüentemente, o caminho de menor custo é diferente do caminho de menor distância.

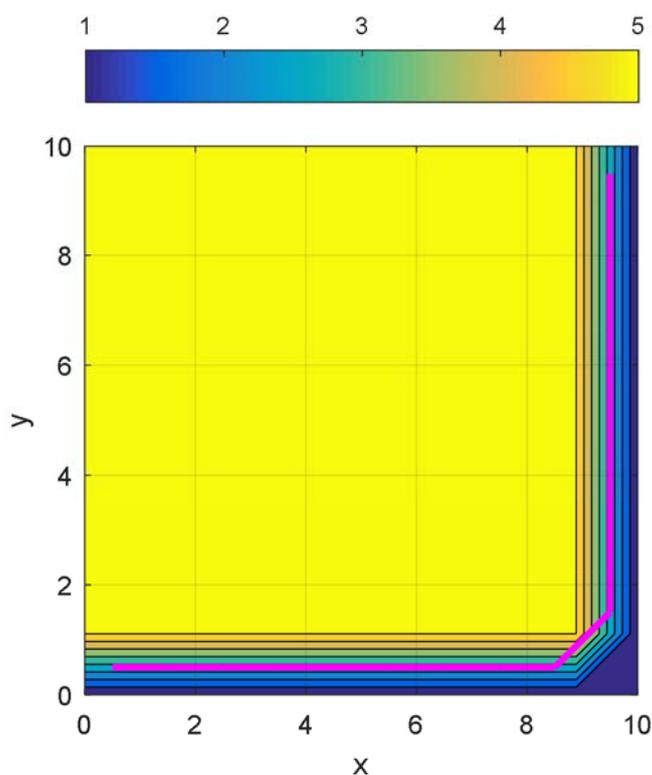


Figura 33 – Caso 2.

Na Tabela 11 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. Assim como no caso anterior, os dois valores ficaram iguais (como se esperava), pois os valores de custo nos pontos pertencentes ao caminho ótimo são iguais a 1.

Tabela 11 – Comprimento e custo Caso 2.

Comprimento	Custo
17,41	17,41

### 6.3 CASO 3

Para este caso, foram geradas duas superfícies cujas matrizes possuem as mesmas dimensões dos dois casos anteriores. Os pontos relacionados aos centroides das células da metade da matriz até a borda inferior possuem valores iguais a 1. Para os demais pontos foram definidos para a primeira e a segunda superfície valores iguais a 10 e 1000, respectivamente. Para esta situação era esperado que o algoritmo avaliasse se o caminho de menor distância é também o caminho de menor custo.

Na Figura 34 é apresentada a imagem da primeira superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do canto inferior esquerdo da matriz e o ponto final a célula do canto superior direito, como nos dois casos anteriores. Pode-se notar que o traçado encontrado é idêntico ao exibido no Caso 1. Sendo assim, nesta superfície o caminho ótimo obtido foi a diagonal do quadrado, ou caminho de menor distância, como no Caso 1. Portanto, para esta superfície, o caminho de menor distância é idêntico ao caminho de menor custo.

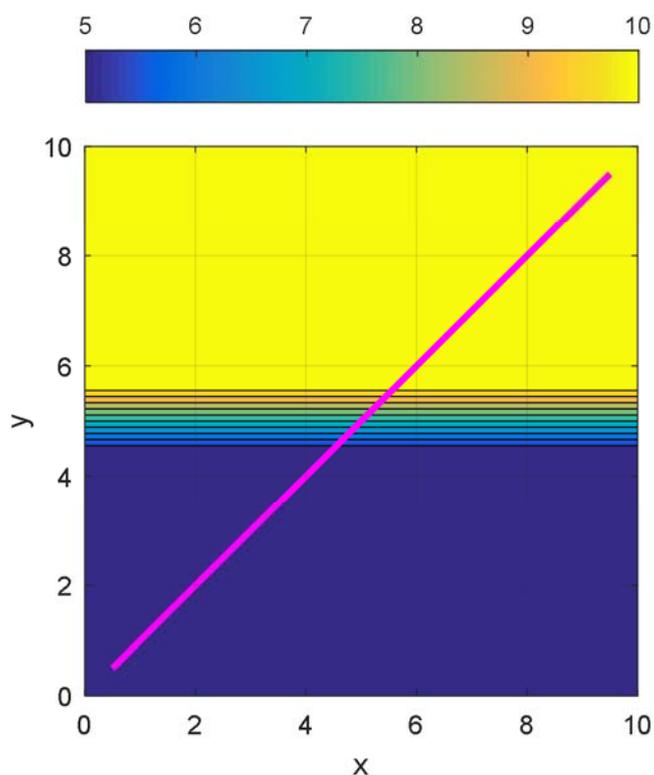


Figura 34 – Caso 3 superfície 1.

Na Tabela 12 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. Assim como no Caso 1 a distância percorrida pelo algoritmo para esse exemplo é a mesma. Entretanto, como existem pontos ao longo do caminho com valores de custo diferentes da unidade, o custo da rota é diferente do seu comprimento.

Tabela 12 – Comprimento e custo Caso 3 superfície 1.

<b>Comprimento</b>	<b>Custo</b>
12,73	95,46

Na Figura 35 é apresentada a imagem da segunda superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do canto inferior esquerdo da matriz e o ponto final a célula do canto superior direito, como nos casos anteriores. Pode-se notar que o traçado encontrado é diferente do exibido para a primeira superfície. Neste caso, o algoritmo, que considera tanto a distância quanto o custo, priorizou caminhar por pontos com valores de custo menores, reduzindo assim o número de incidências em pontos com valores elevados.

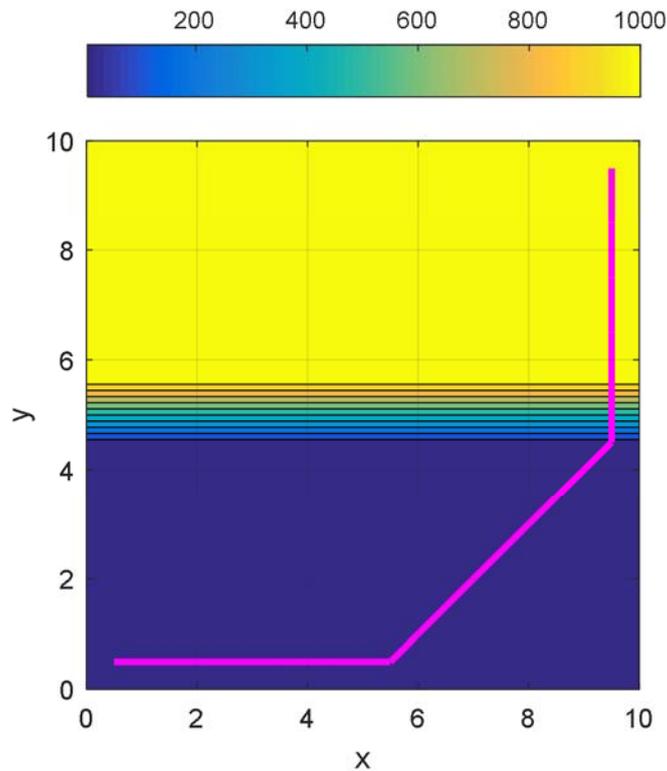


Figura 35 – Caso 3 superfície 2.

Na Tabela 13 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. O comprimento do caminho percorrido e o custo do percurso são diferentes de todos os exemplos anteriormente apresentados.

Tabela 13 – Comprimento e custo Caso 3 superfície 2.

Comprimento	Custo
15,66	$4,56 \times 10^3$

#### 6.4 CASO 4

Para este caso foram geradas duas superfícies cujas matrizes possuem as mesmas dimensões dos três casos anteriores. Para este caso foi gerada uma faixa vertical no meio da superfície com valores superiores a 1, representando a travessia de um rio que gera elevação nos custos. Adjacente a esta faixa, foi criado um bloco retangular com valores muito elevados, representando a travessia de uma montanha que elevaria o custo do traçado. Para esta situação era esperado que o algoritmo avaliasse por onde seria melhor percorrer de maneira a reduzir a travessia pelo rio e evitar passar pela montanha.

Na Figura 36 é apresentada a imagem da superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do canto inferior esquerdo da matriz e o ponto final a célula do canto superior direito, como nos casos anteriores. Pode-se notar que o algoritmo reduziu ao máximo o percurso pelo rio e evitou todos os pontos que simbolizam uma montanha.

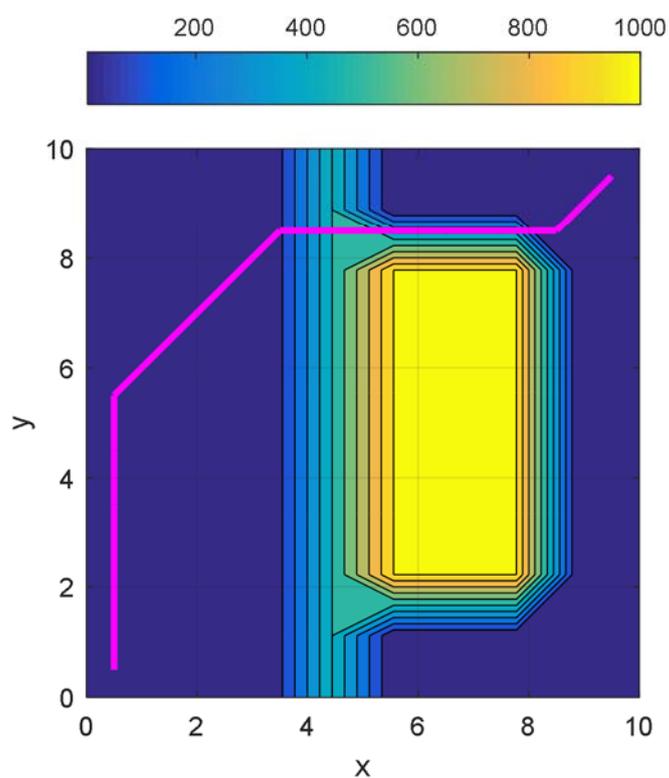


Figura 36 – Caso 4 superfície 1.

Na Tabela 14 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. Observa-se que o comprimento e o custo são totalmente diferentes, pois o traçado gerado pelo processo percorreu pontos com valores de custo diferentes de 1.

Tabela 14 – Comprimento e custo Caso 4 superfície 1.

Comprimento	Custo
15,66	573,28

Na Figura 37 é apresentada a imagem da superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do canto superior direito e o ponto final a célula do canto inferior esquerdo da matriz. Pode-se notar que, assim como na superfície anterior, o algoritmo reduziu ao máximo o percurso pelo rio e evitou todos os pontos que simbolizam uma montanha. Apesar do caminho ótimo parecer, por alguns pontos, diferente quando comparado à superfície anterior, é possível perceber que os caminhos de ida e volta são similares, porém não são idênticos.

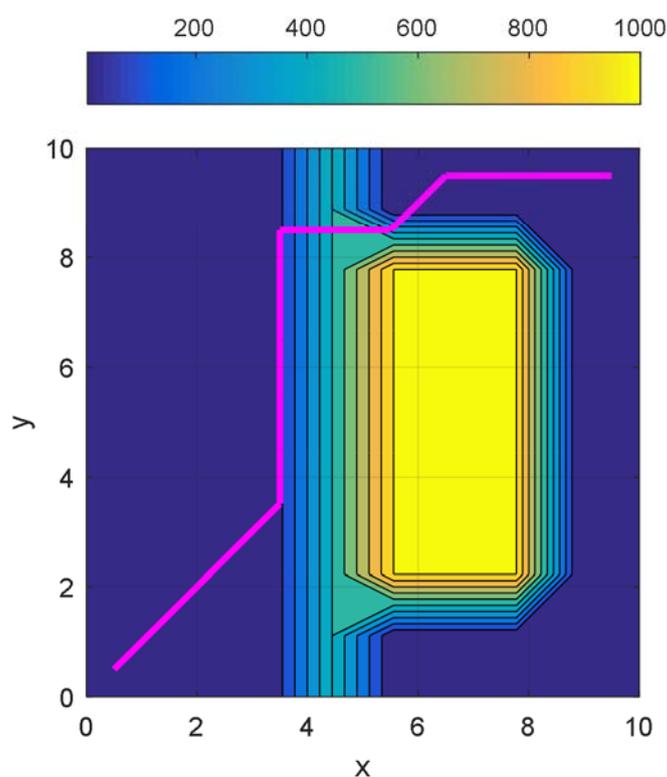


Figura 37 – Caso 4 superfície 2.

Na Tabela 15 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. Observa-se que o comprimento e o custo são exatamente iguais aos apresentados na Tabela 14.

Tabela 15 – Comprimento e custo Caso 4 superfície 2.

Comprimento	Custo
15,66	573,28

Na Figura 38 é apresentada a imagem da superfície comparando as duas rotas geradas. Observa-se que alguns pontos escolhidos para os traçados são diferentes, porém possuem o mesmo valor e são simétricos, ou seja, o custo e a distância são os mesmos em ambas as alternativas.

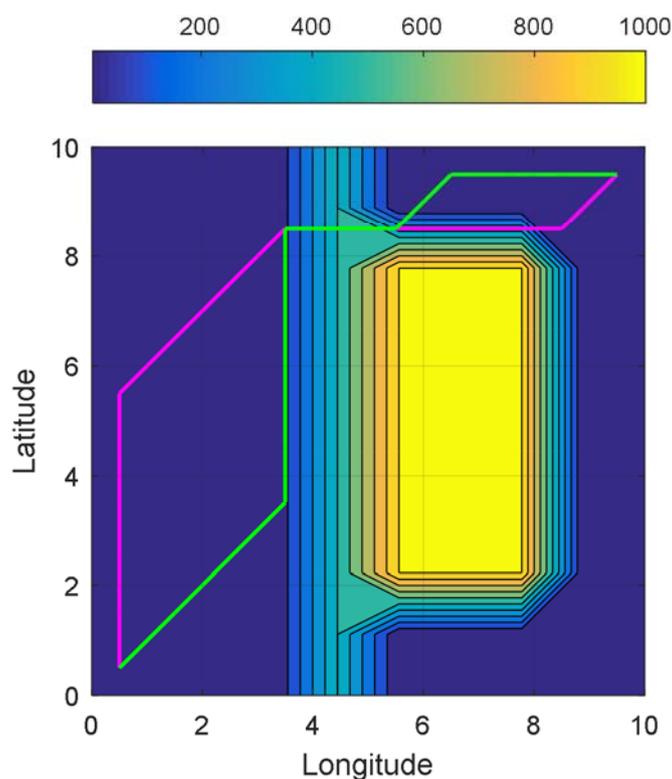


Figura 38 – Caso 4 superfície 1 x superfície 2.

Portanto, o algoritmo desenvolvido está preparado para avaliar não somente os pontos adjacentes, interconectados ao ponto da iteração atual, mas enxerga a superfície de maneira ampla, ou seja, o programa identifica o caminho de custo mínimo observando toda a superfície.

## 6.5 CASO 5

Para este caso foram geradas duas superfícies cujas matrizes possuem as mesmas dimensões dos casos anteriores. Nos dois casos, os pontos relacionados aos centroides das células que se parecem com um “H” na horizontal possuem valores diferentes de 1 e as bordas com duas entradas no meio, uma de cada lado, tem valores iguais a 1. Para a

primeira superfície os valores elevados são iguais a 10 e para a outra superfície são iguais a 5. Para esta situação era esperado que o algoritmo avaliasse se o caminho de menor custo é o que atravessa áreas com elevados valores ou se os evitaria.

Na Figura 39 é apresentada a imagem da primeira superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do lado esquerdo da imagem e o ponto final é o do lado direito da mesma. É possível observar que o algoritmo evitou percorrer pelos pontos que possuem valores elevados. Sendo assim, o processo contornou as regiões de custo mais elevado mesmo estando a uma distância pequena do ponto final do traçado. Neste caso, observa-se claramente que o caminho de menor custo não é o caminho de menor distância.

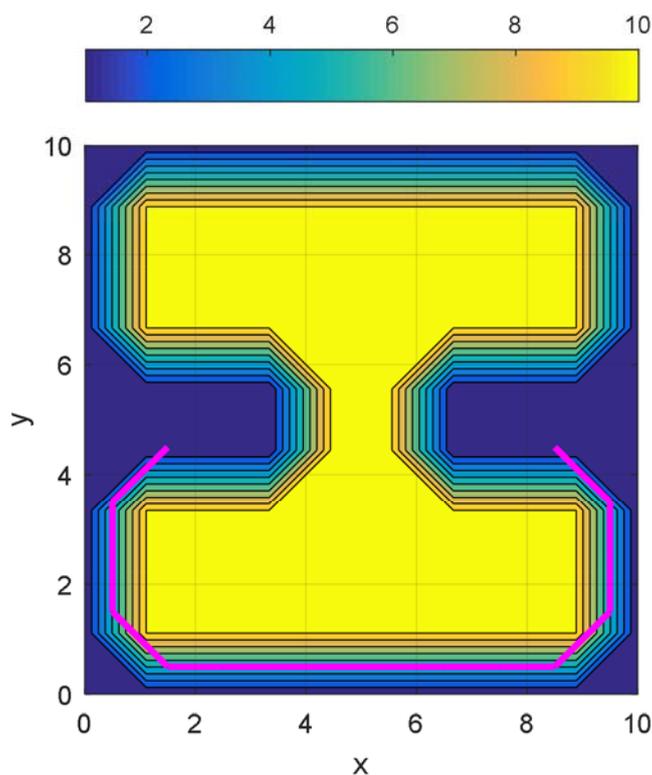


Figura 39 – Caso 5 superfície 1.

Na Tabela 16 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. Os valores são exatamente iguais porque da mesma forma como em alguns casos anteriores o traçado percorre apenas pontos com valores de custo iguais a 1.

Tabela 16 – Comprimento e custo Caso 5 superfície 1.

Comprimento	Custo
16,66	16,66

Na Figura 40 é apresentada a imagem da segunda superfície com a barra de valores dos pontos e o caminho de custo mínimo na mesma. O ponto de início da rota é o centroide que está relacionado à célula do lado esquerdo da imagem e o ponto final é o do lado direito da mesma. Para esta superfície, nota-se que o algoritmo decidiu atravessar os pontos com valores mais elevados. Nesta situação, o caminho encontrado foi o de menor distância.

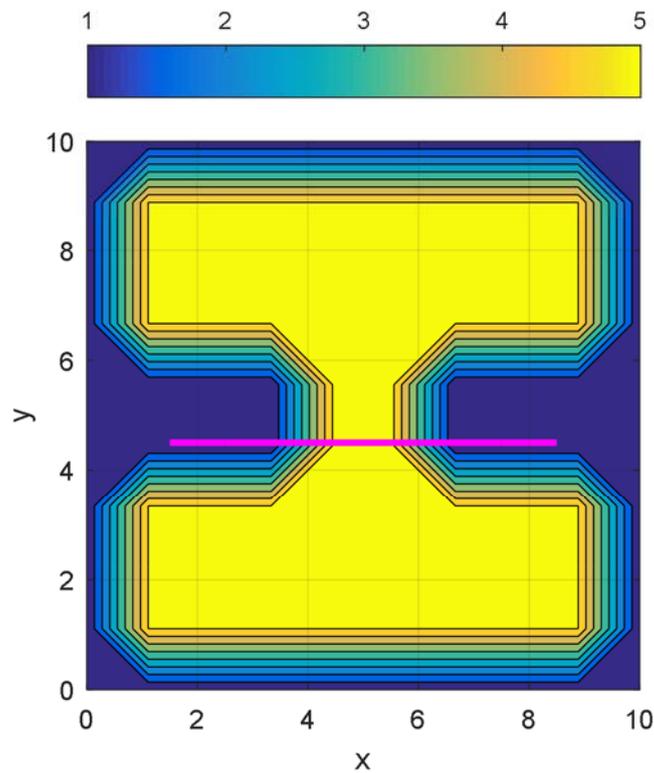


Figura 40 – Caso 5 superfície 2.

Na Tabela 17 são exibidos o comprimento e o custo do traçado encontrado pelo algoritmo. De maneira diferente da superfície anterior, nesta superfície, a distância percorrida e o custo do traçado são diferentes.

Tabela 17 – Comprimento e custo Caso 5 superfície 2.

Comprimento	Custo
7	15

Portanto, este caso mostra que o algoritmo desenvolvido está preparado para avaliar se o caminho de menor custo deve passar por pontos com valores elevados ou se é melhor evitá-los, de acordo com o valor dos mesmos e a distância que deverá ser percorrida para contornar os mesmos.

## 6.6 CASO 6

Este caso visa apresentar de maneira resumida e em uma escala menor como efetuar a análise completa para determinar o caminho de menor custo. Inicialmente é gerada a matriz de comparações pareadas. Para ajudar no preenchimento da matriz com valores que resultem em um índice CR menor que 10%, foi desenvolvido um algoritmo que produz uma combinação de pesos que reduz tal índice abaixo do tolerado (vide ANEXO III). A Tabela 18 apresenta um exemplo de matriz de comparações pareadas no início do processo e seu respectivo vetor de prioridades. Para essa matriz,  $CR = 14,81\%$  (este valor está acima da tolerância).

Tabela 18 – Matriz de comparações pareadas e o autovetor de pesos antes do algoritmo para minimizar o CR.

CRITÉRIO	A	B	C	D	E	Autovetor
A	1	5	4	3	0,333333	0,266126
B	0,2	1	3	5	0,2	0,131981
C	0,25	0,333333	1	1	0,333333	0,071387
D	0,333333	0,2	1	1	0,125	0,056111
E	3	5	3	8	1	0,474396

Com a aplicação do algoritmo implementado, é obtida uma nova matriz de comparações pareadas que atende a tolerância máxima do índice,  $CR = 1,04\%$ . Essa matriz é apresentada na Tabela 19. Pode-se notar que as proporções entre os pesos foram alteradas, porém isso não invalida os resultados. Se for necessário manter as proporções entre os pesos é necessário implementar restrições no algoritmo. A ordem de prioridades dos pesos (do mais ao menos importante), para os dois casos, é: E; A; B; C; e D.

Tabela 19 – Matriz de comparações pareadas e o autovetor de pesos depois do algoritmo para minimizar o CR.

CRITÉRIO	A	B	C	D	E	Autovetor
A	1	2	2	3	0,25	0,168313
B	0,5	1	2	2	0,2	0,112488
C	0,5	0,5	1	1	0,111111	0,065983
D	0,333333	0,5	1	1	0,111111	0,060843
E	4	5	9	9	1	0,592373

Na Figura 41 é apresentada a evolução do índice CR para cada iteração do algoritmo implementado. É possível perceber que, para a matriz encontrada, o índice CR encontra-se abaixo da tolerância máxima de 10%.

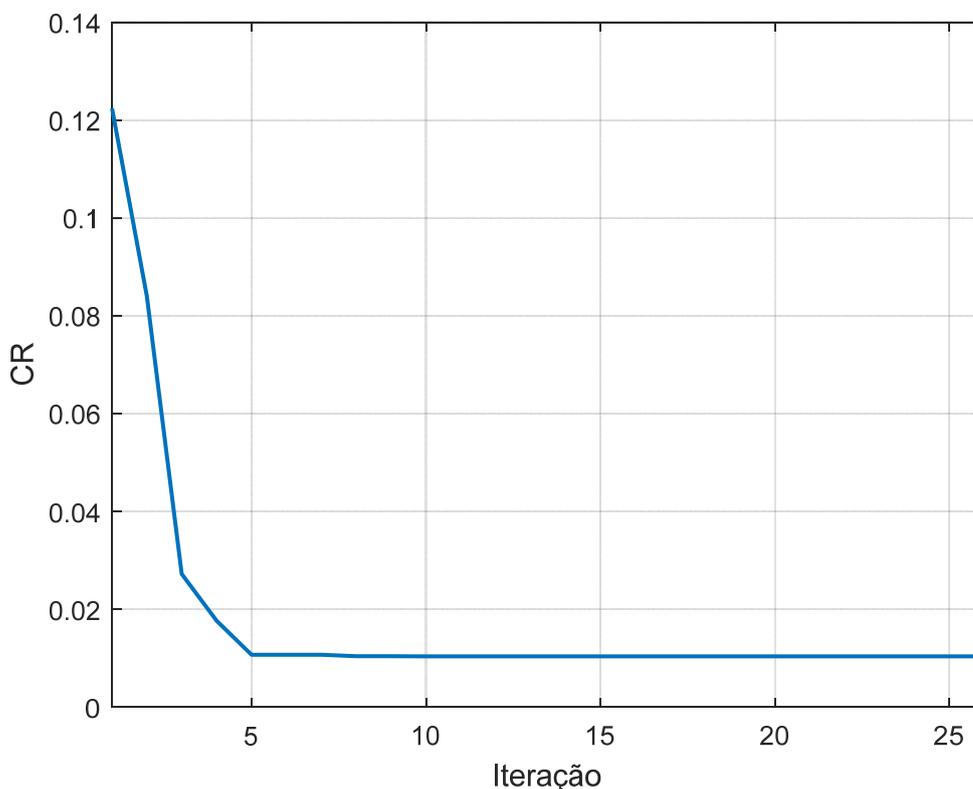


Figura 41 – Índice CR para cada iteração (Caso 6).

Com o vetor de prioridades, ou pesos, obtido é possível realizar a soma ponderada das matrizes que representam os cinco critérios considerados gerando uma única matriz. Após esta etapa, será aplicado, nessa última matriz, o algoritmo de DIJKSTRA (1959) para determinar o caminho de menor custo. Na Figura 42 é apresentada a matriz gerada pela ponderação dos critérios e o traçado otimizado resultante do algoritmo.

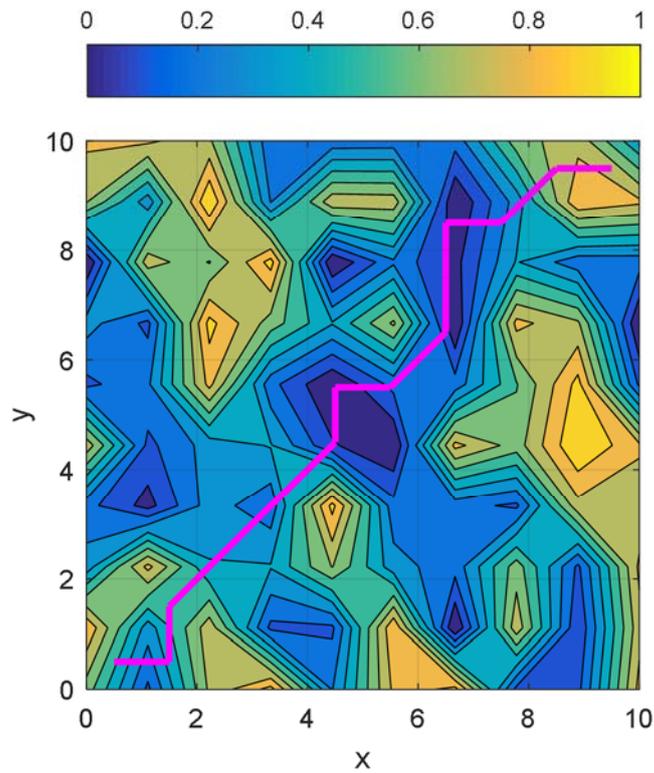


Figura 42 – Caso 6.

## 6.7 CASO 7

Este é um caso mais próximo a um estudo real. A superfície deste exemplo possui uma matriz de 246 linhas por 427 colunas e está compreendida entre os vértices inferior  $[-5,7856 ; -47,8619]$  e superior  $[-5,2444 ; -46,9225]$ . A Figura 43 apresenta os caminhos gerados do ponto inicial A para o ponto final B com a ferramenta para determinar o caminho de custo mínimo do programa ArcGIS®. O caminho verde considera o ponto A como início e o ponto B como fim. No caso do caminho azul o ponto inicial é o B e o final é o A.

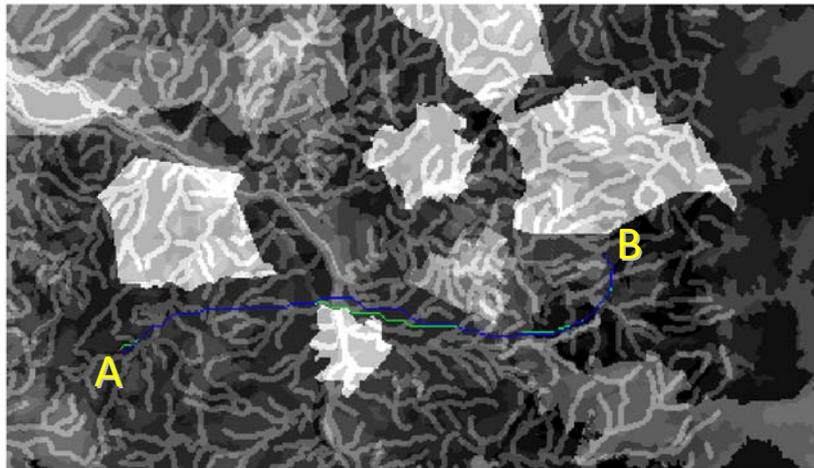


Figura 43 – Caso 7: caminho gerado pelo programa ArcGIS.

A Figura 44 apresenta o resultado obtido pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho para a mesma superfície. O ponto inicial do traçado é o A e o ponto final é o B.

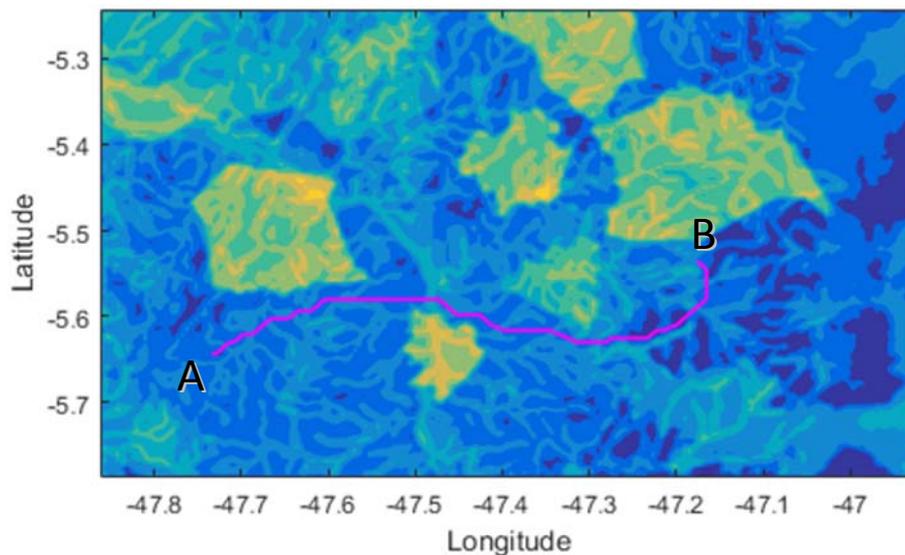


Figura 44 – Caso 7: caminho gerado pelo algoritmo desenvolvido, iniciando no ponto A e finalizando no ponto B.

Na Figura 45 é exibido o caminho obtido pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho para a mesma superfície. Porém, o ponto inicial do traçado é o B e o ponto final é o A.

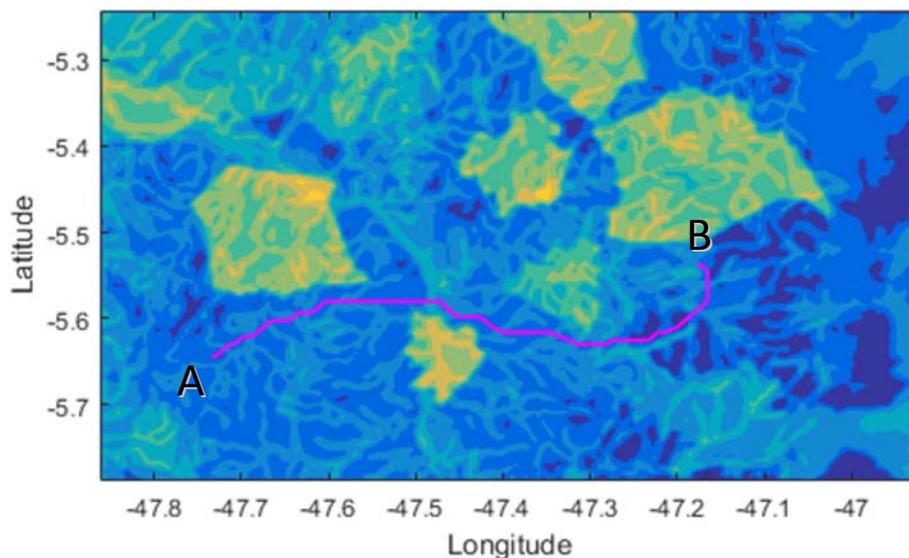


Figura 45 – Caso 7: caminho gerado pelo algoritmo desenvolvido, iniciando no ponto B e finalizando no ponto A.

Esse caso é uma comparação da ferramenta de *least cost path* do ArcGIS® e do programa implementado. Sendo assim, é possível perceber que os caminhos obtidos pelo programa ArcGIS® e pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho apresentaram resultados similares. Além disso, nota-se que os caminhos encontrados com o algoritmo de DIJKSTRA (1959) foram os mesmos independente do ponto de partida.

## 6.8 CASO REAL

Neste tópico do trabalho será apresentado um estudo considerando uma situação real onde se deseja determinar o traçado de uma nova LT para aerogeradores ao SIN.

### 6.8.1 Valores Monetários

#### 6.8.1.1 Torres e Fundações Utilizadas

Esse critério é importante devido à necessidade de compreender os tipos e as características das estruturas que foram utilizadas, bem como as fundações aplicadas nas torres. As torres de suspensão são projetadas de maneira a suportar os esforços verticais associados aos pesos dos cabos, ferragens e isoladores. Essas estruturas são classificadas em autoportantes e estaiadas. As estruturas estaiadas possuem fundação e peso comparativamente menores em relação às autoportantes.

As características específicas de cada uma das estruturas podem ser verificadas no capítulo 4. A seguir, serão definidas nomenclaturas de alguns tipos de estruturas utilizadas para a construção da linha de transmissão (ANEEL, 2017):

- DOVE – torre de aço estaiada convencional predominantemente utilizada para situações normais;
- DUCK – torre de aço autoportante de suspensão convencional, utilizada para algumas travessias específicas.

#### 6.8.1.2 Custos Estimados de LT por Tipo de Torre

Os custos de construção de LT para as torres do tipo DOVE e DUCK, apresentados na Tabela 20, foram estimados considerando valores de custos de terrenos e servidões, aquisição de materiais para cada tipo de torre, inspeção, canteiro de obras, construção, serviços técnicos, estudos de engenharia, ambientais, administração local e central e, por fim, custos eventuais. Os valores definidos servirão como base para determinar os custos relacionados a cada um dos critérios. Para maiores detalhes sobre como foram obtidos os valores de custos, ver ANEXO II.

Tabela 20 – Custo para construção de LT para cada tipo de torre.

<b>Tipo de Estrutura:</b>	<b>DOVE</b>	<b>DUCK</b>
<b>Valor (R\$/km):</b>	R\$ 329.260,58	R\$ 482.642,55

#### 6.8.1.3 Custos Estimados

Este tópico apresenta, de maneira resumida, os valores estimados dos custos de cada um dos critérios avaliados neste trabalho. Os valores dos critérios, bem como, de suas respectivas classes podem ser observados na Tabela 21. Uma explicação detalhada sobre como foram estimados cada um desses valores pode ser verificada nos tópicos que se seguem, sendo divididos de acordo com os critérios considerados.

Tabela 21 – Custos estimados para cada um dos critérios e suas respectivas classes.

<b>Critério</b>	<b>Classes</b>	<b>Custo (R\$/km)</b>
<b>Aeroportos</b>	Existe	R\$ 4.280.387,54
	Não Existe	R\$ -
<b>Áreas Alagadas</b>	Existe	R\$ 482.642,55
	Não Existe	R\$ -
<b>Áreas de Preservação Permanente (APP)</b>	Fragmentos florestais	R\$ 213.200,00
	Vegetação rasteira	R\$ 159.900,00
	Não Existe	R\$ -
<b>Estruturas</b>	-	R\$ 329.260,58
<b>Hidrografia</b>	Largura < 500m	R\$ 339.627,60
	500m < Largura < 900m	R\$ 346.438,98
	900m < Largura < 1800m	R\$ 684.288,76
	Largura > 1800m	R\$ 100.000.000.000,00
	Não Existe	R\$ -
<b>Rios Navegáveis</b>	Existe	R\$ 357.157,10
	Não Existe	R\$ -
<b>Rodovias</b>	Existe	R\$ 357.157,10
	Não Existe	R\$ -
<b>Sistema Interligado Nacional (SIN)</b>	Existe	- R\$ 10.433,80
	Não Existe	R\$ -
<b>Unidades de Conservação (UC)</b>	Existe	R\$ 213.200,00
	Não Existe	R\$ -
<b>Uso do Solo</b>	Áreas Urbanas	R\$ 251.784.000,00
	Fragmentos florestais	R\$ 126.427,60
	Solo exposto	R\$ 4.227,60
	Vegetação rasteira	R\$ 20.867,60

A classe que possui largura maior que 1800 m, do critério Hidrografia, tem um valor fixo com ordem de grandeza muito elevado em relação à ordem de grandeza dos custos dos outros critérios. A justificativa para estipular um valor alto é o de impedir que o algoritmo faça o traçado da LT nas regiões onde a hidrografia exceda a largura de 1800 m, de acordo com LIMA (2015). Para o caso do critério SIN (Sistema Interligado Nacional), foi considerado um valor negativo de maneira a atrair (gerando uma redução dos custos) o algoritmo de otimização do caminho da LT. Enquanto isso, os custos dos outros são positivos (gerando um aumento no custo).

#### 6.8.1.4 Estruturas

Para a implantação de estruturas foi especificado, considerando condições ideais, a utilização de torres de aço estaiada convencional, do tipo DOVE. Portanto, o valor considerado para este critério foi definido como fixo sendo igual ao valor de construção de tal estrutura que é R\$ 329.260,58 / km.

#### 6.8.1.5 Aeroportos

O valor do custo de travessia das feições relacionadas ao critério de aeródromos foi determinado considerando a utilização de LT subterrânea como alternativa. De acordo com ELIAS *et al.* (2014), o valor total desse tipo de intervenção pode ser 20 vezes mais caro que a implantação das linhas de transmissão aéreas. A Tabela 22 apresenta a relação de custos entre uma LT aérea e uma LT subterrânea, considerando a aplicação das mesmas em diferentes faixas de níveis de tensão de operação.

Tabela 22 – Relação de custos: LT aérea × LT subterrânea.

Faixa de Tensão: De 110 a 219 kV	• Custo de 5 a 10 vezes mais elevado
Faixa de Tensão: De 220 a 362 kV	• Custo de 9 a 16 vezes mais elevado.
Faixa de Tensão: De 363 a 764 kV	• Custo de 15 a 25 vezes mais elevado.

Fonte: ELIAS *et al.*, 2014.

Além disso, é determinada uma relação de custo médio. A Tabela 23 apresenta valores similares aos da Tabela 22 e especifica o custo médio de cada faixa de tensão. Para a determinação do traçado da LT foi definido um valor de tensão de operação para a mesma igual a 230 kV. Portanto, para essa classe foi adotado um valor de custo adicional treze vezes maior (de acordo com o valor apresentado na Tabela 23 para a faixa de tensão de 220-362 kV) que o custo de implantação de torres do tipo DOVE, ou seja, o custo foi definido como sendo igual a R\$ 4.280.387,54 / km.

Tabela 23 – Comparação de custos de construção: LT aérea × LT subterrânea.

<b>Faixa de Tensão (kV)</b>	<b>110 - 219 kV</b>	<b>220 - 362 kV</b>	<b>363 - 764 kV</b>
<b>Relação de Custo Médio</b>	7	13	18
<b>Faixa da Relação de Custo</b>	3,6 - 16	5,1 - 21,1	13,6 - 33,3

Fonte: GRANATA *et al.*, 2001.

#### 6.8.1.6 Áreas alagadas

O critério das áreas alagadas é uma condição fisiográfica que apresenta, em geral, tipos de solos constituídos de uma qualidade geotécnica baixa. Devido a isso, foi considerada a implantação de torres de aço autoportante convencional, do tipo DUCK. Portanto, para travessia dessas feições foi estimado um custo igual ao custo de uma LT construída com estruturas DUCK que é R\$ 482.642,55 / km. Então, o custo adicional de travessia deste critério, em relação a áreas com condições ideais que utilizam torres tipo DOVE, é de R\$ 153.381,97 / km.

#### 6.8.1.7 Áreas de Preservação Permanente

No caso da travessia das feições do critério APP foi estimado um custo aditivo ao custo de recomposição da vegetação. Para regiões com vegetação arbórea foi considerada uma área equivalente ao dobro da área de intervenção, enquanto que, para localidades com vegetação rasteira, foi considerada uma área equivalente a 1,5 vezes da área de intervenção. Logo, foi possível estimar os valores do custo de travessia das feições desse critério que são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Custo de travessia da feição APP.

<b>Classe de APP</b>	<b>Faixa de Limpeza (m)</b>	<b>Custos de Recomposição (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo (R\$/km)</b>
<b>APP com fragmentos florestais</b>	52	2,05	R\$ 213.200,00
<b>APP com vegetação rasteira</b>	52	2,05	R\$ 159.900,00

O custo de recomposição foi adotado como sendo igual a R\$ 2,05 /m<sup>2</sup>, de acordo com LIMA (2015). Este valor leva em consideração a recuperação florestal que está relacionada a atividades de plantio, controle de pragas e vegetação competidora após

plântio, custo do projeto, insumos limpeza do terreno, preparo do solo e replântios (LIMA, 2015).

A faixa de limpeza foi determinada de acordo com CELGPAR (2010). Portanto, visando determinar o uso e a ocupação da faixa de passagem da LT, deverão ser consideradas as seguintes áreas, definidas de acordo com seu grau de importância para operação, manutenção e segurança:

- área “A” – localizada ao redor das estruturas da LT e tem a função de permitir o acesso das equipes de manutenção com seus respectivos veículos e equipamentos, bem como servir para a instalação de proteção contra abalroamentos às estruturas.
- área “B” - faixa de terreno, excluída a área A, que envolve os cabos condutores ao longo da linha e destina-se a proporcionar maior segurança à linha e também a terceiros.
- área “C” - porção da faixa de passagem, excluindo-se as zonas A e B, cujos limites externos são definidos no projeto da linha de transmissão e têm a função de garantir os limites de campos elétricos e magnéticos, no limite da faixa de passagem, e a evitar acidentes devido a balanço de cabos condutores e para-raios.

A Figura 46 apresenta as áreas descritas acima. Para determinar a largura da faixa de limpeza foram somadas as larguras L2 e L3. Para CELGPAR (2010), a distância L3, para uma LT com tensão de operação de 230 kV, é igual a 6 m, enquanto que para a ANEEL (2017), a largura L2, considerando a torre de aço autoportante convencional tipo DUCK, é de 40 m. Portanto, a soma total das distâncias gera uma largura L, limites da faixa de passagem, de 52 m.

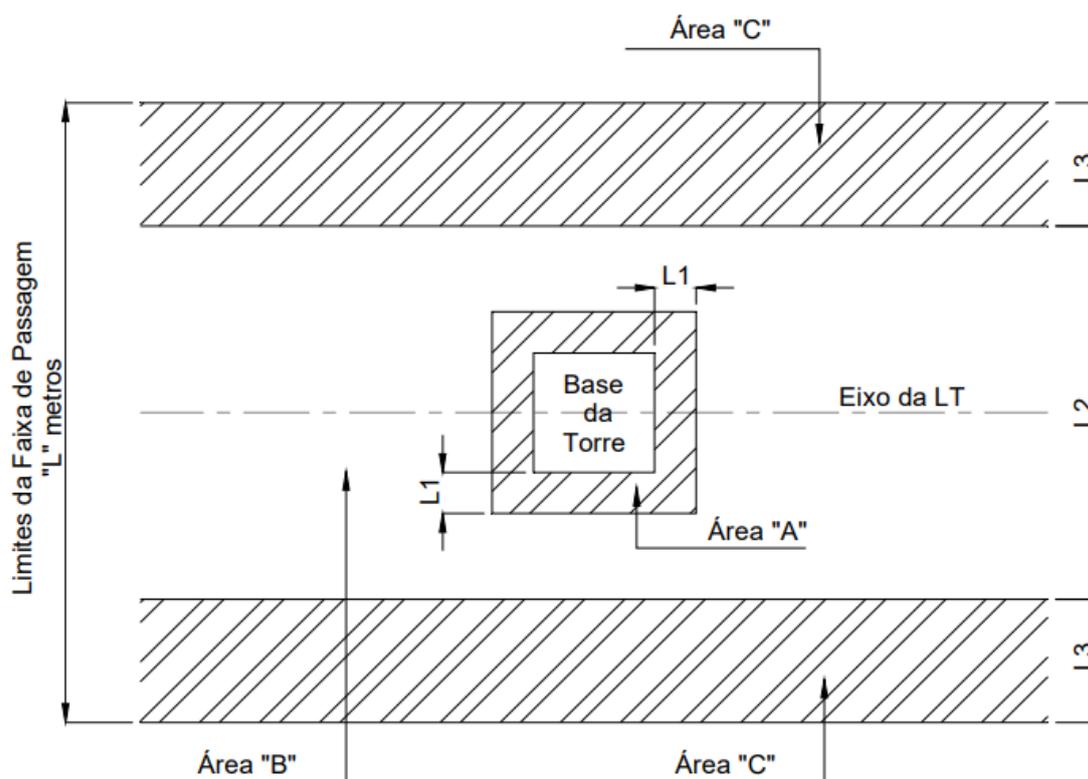


Figura 46 – Faixa de passagem de um LT.  
 Fonte: CELGP, 2010.

#### 6.8.1.8 Hidrografia

Para o critério de travessia de rios que possuam uma largura inferior a 500 metros foi considerada aplicação de torres de aço estaiadas convencionais do tipo DOVE, pois não existe nenhuma diferença na composição estrutural da torre para realizar a travessia de rios nessa faixa de largura. Entretanto, foi estimado como um custo adicional o valor da classe fragmento florestais, do critério Uso do Solo apresentado na Tabela 27, adicionado ao valor da classe de fragmentos florestais, do critério APP apresentado na Tabela 24. Este procedimento é justificado, pois, ao definir um valor nulo para esta classe, do critério Hidrografia, é gerado um caminho preferencial, de menor resistência, para a determinação da rota otimizada pelo algoritmo.

Para a faixa de largura compreendida entre 500 e 900 metros, foram aplicadas torres de aço autoportante convencionais do tipo DUCK. Além disso, o valor do custo tem um fator multiplicador de 1,4 para esta faixa. Isto ocorre devido à necessidade de utilizar torres de ancoragem, antes e após, instaladas nas proximidades das margens, para realizar a travessia de rios que possuam uma largura significativa, gerando assim custos adicionais (LIMA, 2015).

Para a largura compreendida 900 e 1800 metros, foi adotada a construção de torres na calha do rio. Esse tipo de estrutura é mais cara do que as convencionais. O valor do custo por km para esta classe foi considerado como sendo 1,5 vezes o custo de travessia para a feição com faixa de largura entre 500 e 900 metros (LIMA, 2015).

Por fim, uma largura de rio maior do que 1800 metros foi considerada uma alternativa a ser evitada pelo algoritmo de traçado ótimo. Por esse motivo, para esta situação, o custo de travessia tem uma ordem de grandeza mais elevada quando comparado com outros custos estimados. A seguir, na Tabela 25, estão indicados os custos adotados para travessia de cada uma das classes do critério Hidrografia (LIMA, 2015).

Tabela 25 – Custo de travessia da feição Hidrografia.

<b>Faixas de largura</b>	<b>Custo (R\$/km)</b>	<b>Custo adicional (R\$/km)</b>
<b>Menor que 500m</b>	R\$ -	R\$ 339.627,60
<b>500 – 900m</b>	R\$ 675.699,56	R\$ 346.438,98
<b>900 – 1800m</b>	R\$ 1.013.549,34	R\$ 684.288,76
<b>Maior que 1800m</b>	R\$ -	R\$ 100.000.000.000,00

O custo adicional, apresentado na Tabela 25, representa a diferença entre o custo de travessia das feições do critério Hidrografia e os custos de construção de uma LT considerando torres de aço estaiadas convencionais tipo DOVE.

#### 6.8.1.9 Rios Navegáveis

Para a travessia das feições deste critério foi necessário considerar uma altura de segurança para construção de linhas elétricas. Essa altura é determinada pelo tamanho das embarcações e em conformidade com a norma ABNT 5422 (1985). Esta norma especifica a distância mínima do condutor ao solo ou aos obstáculos em condições normais de operação. Pelo método convencional, a distância de segurança pode ser calculada pelas seguintes equações:

$$D = a + 0,01 \left( \frac{D_U}{\sqrt{3}} - 50 \right), \quad \text{se } U > 87 \text{ kV} \quad (32)$$

ou

$$D = a, \quad \text{se } U \leq 87 \text{ kV} \quad (33)$$

onde  $a$  é a distância básica,  $D_U$  é a distância, em metros, numericamente igual a  $U$  e  $U$  é a tensão máxima de operação da linha, valor eficaz fase-fase, em kV. A Tabela 26 apresenta o valor de  $a$  para águas navegáveis e não navegáveis.

Tabela 26 – Distâncias básicas.

Natureza da região ou obstáculo atravessado pela LT ou que se aproxime dela	Distância básica $a$ (m)
Águas Navegáveis	$H+2,0$
Águas não Navegáveis	6,0

Fonte: ABNT, 1985 (Adaptado).

De acordo com ABNT (1985), para calcular as distâncias dos condutores até a superfície de águas navegáveis o valor de  $H$  é correspondente à altura, em metros, do maior mastro e deve ser fixado pela autoridade responsável pela navegação na via considerada, considerando o nível máximo de cheia ocorrido nos 10 anos anteriores. A Figura 47 apresenta uma ilustração da distância (ABNT, 1985).

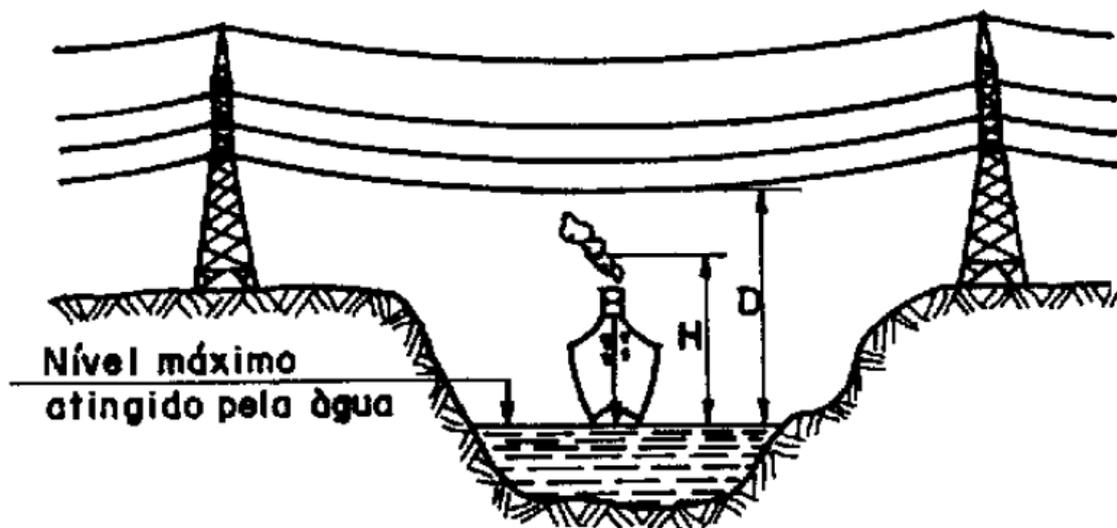


Figura 47 – Travessia de LT em águas navegáveis.  
Fonte: ABNT, 1985.

Para calcular o custo de elevação das torres foi definida a seguinte equação:

$$C_{NAVEGAÇÃO} = \left( \frac{C_{PADRÃO} \times D_{CORRIGIDA}}{D_{PADRÃO}} \right) \times 1,1 \quad (34)$$

onde  $C_{PADRÃO}$  é o custo padrão por km de uma LT (valor da estrutura DUCK, vide Tabela 20),  $D_{PADRÃO}$  é a altura padrão calculada em metros (considerando  $a = 6$ ) e  $D_{CORRIGIDA}$  é a altura corrigida calculada em metros (considerando  $a = H + 2$ , para  $H = 6$ ). Além disso, foi considerado um fator multiplicativo (de 1,1) na Equação (34) para evitar que o custo adicional seja subestimado, ou seja, o alteamento da estrutura produz maiores esforços que atuam na mesma e, por conseguinte, necessitam de torres que possuam estruturas e fundações mais reforçadas. Para este caso, o custo estimado foi de R\$ 686.417,68 /km. Portanto, o custo adicional calculado, considerando as estruturas do tipo DUCK (com modificações em sua estrutura) em relação ao custo das estruturas do tipo DOVE (sem modificações em sua estrutura), foi de R\$ 357.157,10 /km.

#### 6.8.1.10 Rodovias

Para a travessia das feições deste critério foi necessário considerar uma altura de segurança para construção de linhas elétricas. Essa altura é determinada de acordo com a norma ABNT 5422 (1985). Esta norma especifica a distância mínima do condutor ao solo ou aos obstáculos em condições normais de operação. As equações e metodologia aplicadas para determinar o custo deste critério são iguais ao critério anterior. A única diferença é a especificação da altura básica. Para o caso de travessias em rodovias, ruas e avenidas, esta distância foi considerada como sendo igual a 8 m. A Figura 47 apresenta uma ilustração da distância (ABNT, 1985).

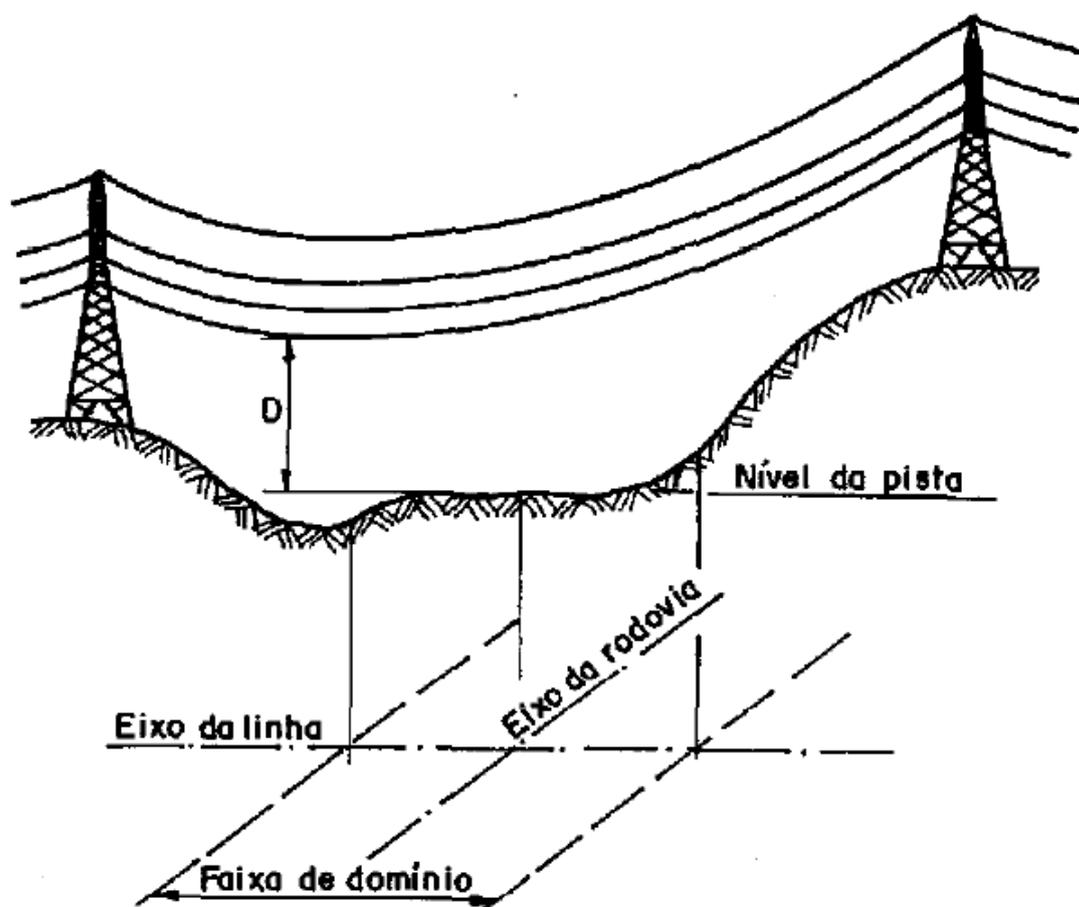


Figura 48 – Travessia de LT em rodovias.  
Fonte: ABNT, 1985.

Semelhantemente ao critério anterior, foi considerado um fator multiplicativo (de 1,1) na Equação (34) para evitar que o custo adicional seja subestimado. Para este caso, o custo estimado foi de R\$ 686.417,68 /km e o custo adicional calculado foi de R\$ 357.157,10 /km. O valor ficou igual ao anterior, pois a distância básica considerada no estudo foi a mesma utilizada para o critério de Rios Navegáveis.

#### 6.8.1.11 Sistema Interligado Nacional

Este critério, Sistema Interligado Nacional (SIN), está relacionado às linhas de transmissão já existentes na região onde está sendo realizado o estudo. Para esse caso, foi considerado que a existência das linhas do SIN resulta em uma redução dos custos de implantação de uma nova LT. Isso se deve ao fato de existir a possibilidade de compartilhamento de uma parcela da faixa de servidão que é dedicada a LT existente.

Portanto, o valor estimado de custo evitado foi calculado de acordo com o critério de Uso do Solo, considerando regiões que possuam vegetação rasteira, que corresponde

aos custos evitados para a limpeza da área e a indenização, pois a faixa de servidão da LT poderá ser compartilhada com uma linha que já está construída. O valor de custo estimado foi determinado como sendo 50% do valor da classe de vegetação rasteira, do critério de Uso do Solo, resultando em um valor igual a - R\$ 10.433,80 /km.

#### 6.8.1.12 Unidades de Conservação

Para estimar o custo de travessia das feições das classes de Unidades de Conservação, foram considerados três parâmetros. O primeiro parâmetro está relacionado com o custo incremental de utilização de torres diferenciadas, com alturas mais elevadas para reduzir a necessidade de realizar supressão de vegetação. O segundo está associado ao custo de recomposição de vegetação equivalente à área que sofreu intervenção devido à construção da LT, considerando uma faixa de limpeza da linha de 52 metros, caracterizando uma ação visando compensar a intervenção por causa da construção do empreendimento em áreas de Unidades de Conservação. O último parâmetro está relacionado ao custo da cessão de uso onerosa, de acordo com a especificação da Portaria Interministerial Nº 37 (MP/MMA/MME, 2014).

Os custos supracitados já estão sendo considerados no critério de Uso do Solo. A construção de estruturas diferenciadas está considerada na classe Vegetação Arbórea, do critério de Uso do Solo, pois as Unidades de Conservação são, em sua grande maioria, compostas por esse tipo de vegetação.

Para o caso do custo associado à cessão de uso onerosa este é, também, considerado no critério relativo ao Uso do Solo, de maneira a indenizar a área que sofreu intervenção por causa da faixa de servidão. No que tange à recomposição da vegetação como uma ação de compensação, os custos são estimados de maneira parcial no critério de Áreas de Preservação Permanente, para o caso da classe de vegetação arbórea, que leva em consideração a recomposição de uma área proporcional à área de intervenção.

Na questão das Unidades de Conservação foi determinada a recomposição equivalente ao dobro da área que sofreu intervenção devido à implantação do projeto. Isto é feito por causa do grau de importância ecológico das Unidades de Conservação e, por conseguinte, impacto mais considerável de intervenção nessas regiões. Portanto, o custo de recomposição, considerando uma faixa de limpeza de 52 metros, é de R\$

213.200,00 /km. Este foi o valor estimado de custo extra para travessia das feições do critério de Unidades de Conservação.

#### 6.8.1.13 Uso do solo

A travessia das feições do critério de Uso do Solo está relacionada, basicamente, ao custo para realizar a “indenização” (associado com a utilização de terras da faixa de servidão da LT), limpeza da faixa e as regulamentações para recompor a vegetação afetada nas situações em que ocorra supressão de parcelas florestais por causa da faixa de limpeza necessária. Para a faixa de servidão foi definida uma largura de 52 metros, de acordo com Terrenos e Servidões (ANEEL, 2017, CELGPAR, 2010). Essa faixa foi determinada da mesma forma como apresentada no item 6.8.1.7. No tocante ao valor de áreas urbanas e de solo exposto foi considerado limpeza de faixa, pois não existe este custo para estas regiões.

Os valores de custo de compensação para as classes de fragmentos florestais, solo exposto e vegetação rasteira foram determinados de acordo com a Base de Preços e Referência (ANEEL, 2017) para Orçamento de Linha de Transmissão, segundo a planilha de Terrenos e Servidões, enquanto que, para as zonas urbanas, o valor do custo para compensar está diretamente relacionado aos custos de desapropriação dos imóveis e a indenização das reparações. De acordo com FIPE (2018), o Índice FipeZap de Preços de Imóveis Anunciados é o primeiro indicador com abrangência nacional que acompanha os preços de venda e locação de imóveis no Brasil. Sendo assim, para áreas que possuam edificações em localidades residenciais, foi definido um valor de R\$ 4.842,00 /m<sup>2</sup> para o Estado onde está sendo realizado o estudo.

No que tange ao custo de limpeza, após a retirada de parte da vegetação para realizar a montagem dos cabos, para o caso de vegetação arbórea, foi determinado um valor de R\$ 2,35 /m<sup>2</sup> (LIMA, 2015). Para limpeza das áreas compostas por vegetação rasteira, foi considerado o custo de R\$ 0,32 /m<sup>2</sup>, segundo a Base de Preços de Referência para Limpeza de Faixa (ANEEL, 2017). Os custos relacionados à recomposição da vegetação são utilizados somente para a classe referente a fragmentos florestais, onde existe a necessidade de realizar a recomposição da vegetação suprimida. As dimensões da área que será utilizada para realizar a recomposição são definidas

durante o licenciamento de empreendimento. Essa área é definida de acordo com as características ambientais da região.

Para este trabalho foi considerado um valor de área com as mesmas dimensões da região, constituída por fragmentos florestais, que sofreu intervenção devido à construção do empreendimento. A Tabela 27 apresenta os valores de custos reais, por km, que foram estimados para cada uma das classes consideradas no critério Uso do Solo.

Tabela 27 – Custo de travessia da feição Uso do Solo.

<b>Classes</b>	<b>Faixa de limpeza (m)</b>	<b>Custo indenização (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo limpeza (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo por km (R\$/km)</b>
<b>Vegetação rasteira</b>	52	0,0813	0,32	R\$ 20.867,60
<b>Fragmentos florestais</b>	52	0,0813	2,35	R\$ 126.427,60
<b>Áreas urbanas</b>	52	4.842,00	-	R\$ 251.784.000,00
<b>Solo exposto</b>	52	0,0813	-	R\$ 4.227,60

## 6.8.2 PESOS AHP

Após a determinação dos pesos de cada um dos critérios e das suas classes, é necessário ajustar a escala dos pesos. Para os critérios considerados, os pesos foram mantidos na mesma escala em que foram obtidos pela aplicação do AHP, em que o somatório de todos os critérios resulta em 100%. Já os pesos determinados para as classes foram normalizados para uma escala de 0 a 1. Isso porque cada critério possui um número variável de classes e, se os pesos originais obtidos são utilizados, em que o somatório resulta em 100, os critérios com número de classes elevado assumem valores baixos para cada classe em relação aos de menor número de classes. Esta normalização, então, é feita fazendo a divisão das classes de um determinado critério pela classe de valor máximo. O peso final de cada classe é obtido pela multiplicação do peso do critério pelo peso da classe.

A Tabela 28 apresenta os pesos finais aplicados em cada uma das classes e dos critérios considerados. Dentre os critérios avaliados o que tem o maior valor é o que está

associado à hidrografia, pois a travessia dessas feições possui altos custos, especialmente quando é preciso construir estruturas nas margens dos rios.

Tabela 28 – Resultado dos pesos pelo método AHP, ver Tabela 8.

Critério	Classes	Pesos AHP			
		Peso da variável (PV) <sup>4</sup>	Peso	Peso da classe (PC)	PESO FINAL (PV*PC)
<b>Aeroportos</b>	Existe	0,24	1	1,00	0,24
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Áreas alagadas</b>	Existe	0,16	1	1,00	0,16
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Áreas de Preservação Permanente</b>	Fragmentos florestais	0,04	0,8	1,00	0,04
	Vegetação rasteira		0,2	0,25	0,01
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Estruturas</b>	Estruturas	0,03	1	1,00	0,03
	Menor que 500m		-	-	0,05
<b>Hidrografia</b>	500-900m	0,28	0,15	0,18	0,05
	900-1800m		0,85	1,00	0,28
	Maior que 1800m		-	-	100,00
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Rios Navegáveis</b>	Existe	0,08	1	1,00	0,08
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Rodovias</b>	Existe	0,04	1	1,00	0,04
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Sistema Interligado Nacional</b>	Existe	-0,02	1	1,00	-0,02
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Unidades de Conservação</b>	Existe	0,08	1	1,00	0,08
	Não existe		0	0,00	0,00
<b>Uso do Solo</b>	Áreas urbanas	0,03	0,62	1,00	0,03
	Fragmentos florestais		0,24	0,39	0,01
	Solo exposto		0,05	0,08	$2 \times 10^{-3}$
	Vegetação rasteira		0,09	0,15	$4 \times 10^{-3}$

<sup>4</sup> Valores da coluna “Pesos” da Tabela 8.

O segundo critério que possui maior peso é o relacionado às áreas de aeroportos. No que tange à travessia dessas feições é preciso construir linhas subterrâneas, tornando-se assim, uma variável significativa no que concerne aos fatores financeiros.

O terceiro critério mais importante é o de áreas alagadas que considera a construção de fundações específicas para essas regiões. Além desses critérios, podem ser citadas, por ordem de prioridade ou peso, as unidades de conservação, rios navegáveis, rodovias, áreas de preservação permanente, estruturas, uso do solo e, por fim, o Sistema Interligado Nacional (SIN).

A coluna Peso da Classe (PC) foi definida com base em uma escala que varia de 0 e 1. Os valores do Peso Final foram encontrados pela multiplicação direta do valor PV pelo peso definido para cada uma das classes (PC). Este procedimento tem a função de prevenir que os pesos finais obtidos venham a ser subestimados para o caso de critérios que são compostos por várias classes.

No tocante à classe com largura menor que 500 m, existente no critério Hidrografia, o valor do peso foi definido como sendo igual ao somatório dos pesos das classes de Fragmentos Florestais dos critérios Uso do Solo e Áreas de Preservação Permanente. Para esta classe a largura não demanda alterações nas estruturas da LT. Portanto, não é gerado um custo adicional de travessia dessas feições. Porém não foi atribuído um valor de peso nulo, pois se isso fosse feito o algoritmo interpretaria essas feições como um caminho preferencial. Além disso, as margens do critério Hidrografia são Áreas de Preservação Permanente que, na maioria das vezes, são compostas por vegetação arbórea.

Para a classe com largura maior que 1800 m, existente no critério Hidrografia, o valor do peso foi predefinido com uma ordem de grandeza muito superior em relação aos outros critérios. Isto foi realizado de maneira a considerar que essas feições se configuram em uma travessia proibida.

O critério relacionado à existência do Sistema Interligado Nacional (SIN) foi considerado como sendo um caminho preferencial produzindo uma redução dos custos de implantação. Portanto, para esse critério, foi atribuído um valor negativo, enquanto que para os demais foram considerados valores positivos.

### 6.8.3 OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADO - *LEAST COST PATH*

Os traçados de LT encontrados para as superfícies de atrito são apresentados na Figura 49 e na Figura 50. Essas superfícies foram geradas através da soma dos arquivos (no formato *raster*) de todos os critérios, considerando cada metodologia (itens 6.1 e 6.8.2). Na superfície gerada pelo método de pesos AHP nota-se que as manchas de existência de aeródromos estão mais destacadas, enquanto que, para o caso da superfície criada a partir de custos, as áreas urbanas estão em maior evidência. Essa observação demonstra as diferenças dos métodos de avaliação multicritério.

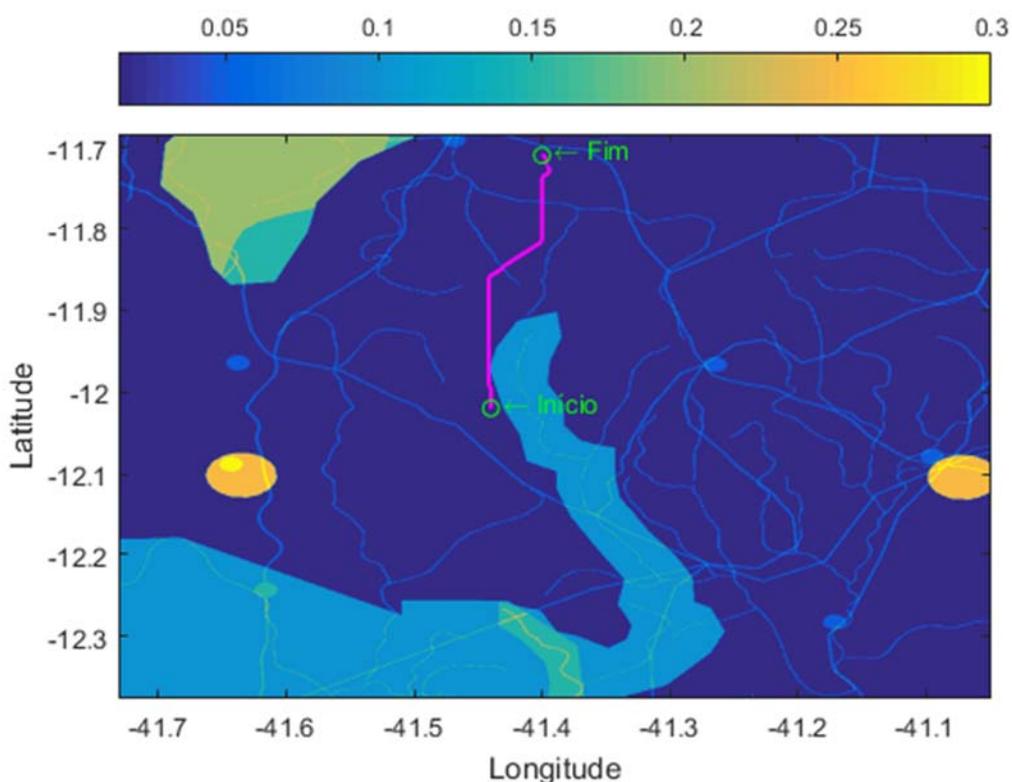


Figura 49 – Rota gerada pelo algoritmo DIJKSTRA (1959) utilizando a superfície de atrito criada pelo método AHP.

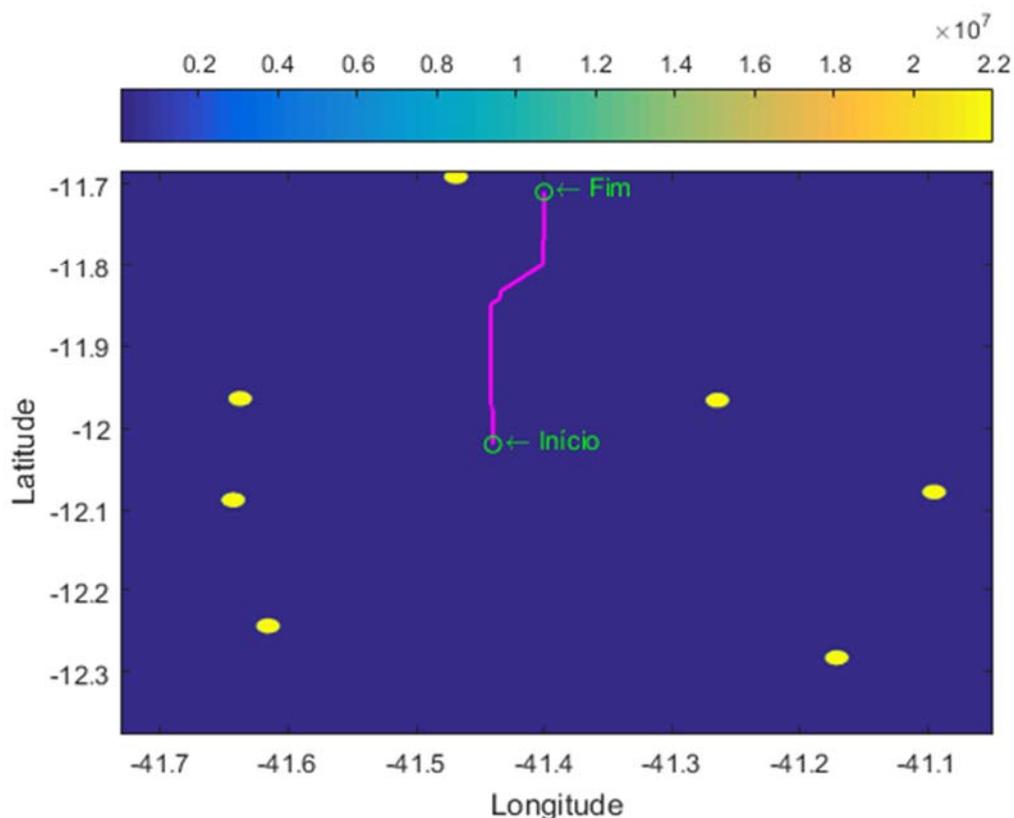


Figura 50 – Rota gerada pelo algoritmo DIJKSTRA (1959) utilizando a superfície de atrito criada pelo método de custo.

É possível notar que os traçados gerados pelo algoritmo para as duas superfícies obtidas (Valores monetários e Pesos AHP) apresentaram caminhos parecidos. Além disso, as rotas da LT encontradas pelo processo são comparadas no que diz respeito ao custo total (obtido através da sobreposição das superfícies de valor monetário de cada um dos critérios considerados e, conseqüentemente, avaliado o custo acumulado do caminho) e ao comprimento total da LT. Essas informações estão apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Comparação das rotas obtidas pelo algoritmo de DIJKSTRA (1959).

Traçado de LT	Comprimento (km)	Custo (R\$)
AHP	47,475	R\$ 1.426.177.128,36
Valores Monetários	47,347	R\$ 1.424.866.909,16

Os resultados apresentados mostram que traçado da LT realizado utilizando a superfície de valores monetários teve um custo e um comprimento levemente menores

do que os resultados gerados utilizando a superfície do método AHP. Além disso, a Figura 51 exibe as duas rotas otimizadas encontradas pelo algoritmo.

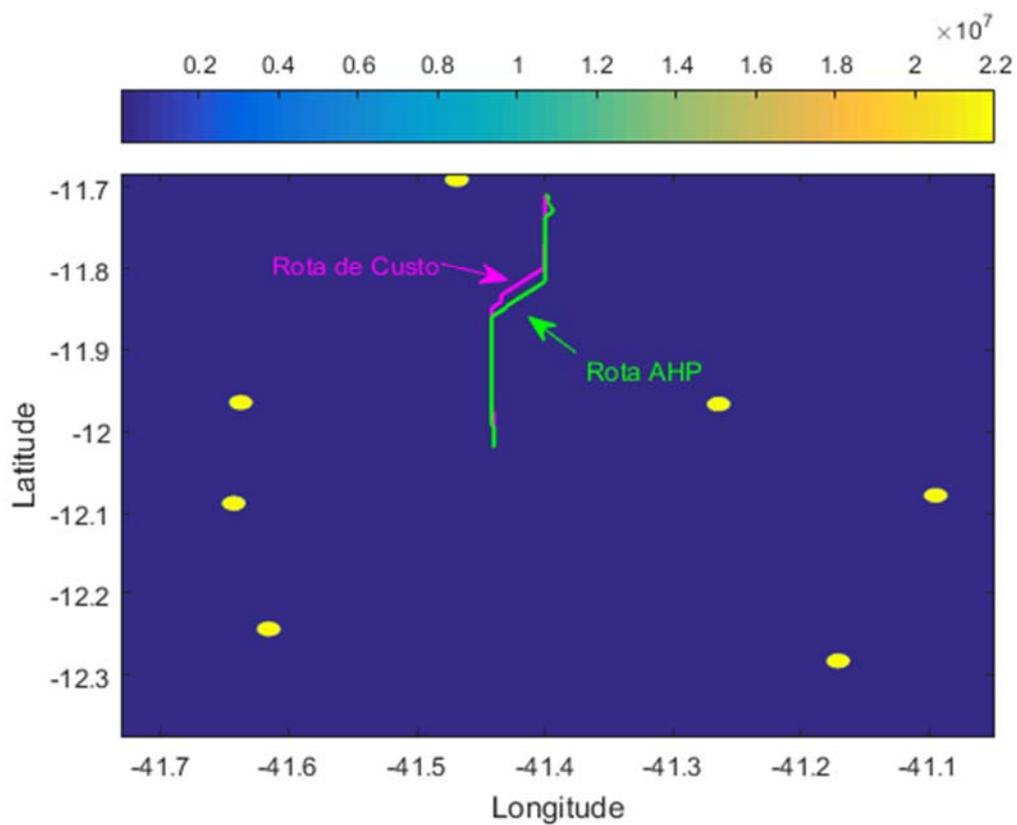


Figura 51 – Comparação das rotas geradas pelo algoritmo DIJKSTRA (1959).

A linha mais clara representa a rota gerada utilizando o método AHP, enquanto que a linha mais escura está relacionada com o traçado obtido pelos valores monetários.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia que resolveu o problema referente a determinar um caminho para a construção de uma LT. O traçado obtido pelo presente trabalho é o caminho ótimo, de menor custo, considerando alguns critérios técnicos e socioambientais, tais como: Áreas Alagadas, Áreas de Preservação Permanente, Aeroportos, Estrutura, Hidrografia, Rios Navegáveis, Rodovias, Sistema Interligado Nacional, Unidades de Conservação e Uso do Solo. Para determinar o traçado foram definidos dois pontos que representam o início e o fim da construção da LT, estes pontos são determinados pelo tomador de decisões que define dois empreendimentos que deseja interligar (subestações, grupos geradores de energia, centros de carga e linhas de transmissão).

A metodologia desenvolvida utilizou o método AHP, para definir os pesos dos critérios de maneira subjetiva, e o método dos Valores Monetários, que determina a importância dos critérios de maneira quantitativa. Para cada um dos métodos, encontrou-se uma superfície de custos que é a soma ponderada, de pesos (AHP) ou custos (Valores Monetários), dos critérios considerados neste trabalho. Por fim, algoritmo de DIJKSTRA (1959) foi aplicado nas superfícies para determinar o caminho de menor custo.

O método AHP apresentou uma eficácia um pouco menor com relação à representatividade da influência de cada um dos critérios se comparado com o método dos Valores Monetários. Este fato pode ser observado essencialmente nos critérios que são altamente influentes na determinação do traçado da LT, como é o caso das Áreas Urbanas. Além disso, o AHP possui uma incapacidade de caracterizar altos pesos, ou seja, os pesos obtidos por este método apresentam uma tendência de se aproximarem da média. Com isso, não produzem uma representação mais significativa dos critérios com elevada importância. Portanto, o método dos Valores Monetários demonstrou resultados mais atrativos no que tange à determinação do traçado da LT, pois representa melhor a relevância de cada critério e possui a vantagem de produzir valores teoricamente mais próximos à realidade do custo de construir efetivamente uma LT. Entretanto, a utilização deste método necessita de uma maior complexidade técnica para definir os custos dos critérios.

De maneira geral, a otimização da rota da LT realizada pela metodologia que foi proposta demonstrou-se eficiente. Os dois traçados de LT obtidos pelo algoritmo de DIJKSTRA (1959), métodos AHP e Valores Monetários, geraram valores tanto de custo quanto de comprimento bem próximos. Nota-se também uma semelhança no formato das rotas resultantes do processo, demonstrando assim, a capacidade e o benefício de aplicar a metodologia proposta para a construção de uma LT quando comparadas com o desenvolvimento de estudos de construção a partir de análises visuais e manuais de figuras geográficas relevantes. Além disso, no processo de análises visuais e manuais não existe a utilização de uma metodologia que produza uma avaliação multicritério nem mesmo ferramentas de georreferenciamento mais elaboradas.

A utilização da metodologia que o presente trabalho propõe se faz necessária na etapa em que é desenvolvido o planejamento, que ocorre anteriormente à produção do projeto executivo, onde são levados em consideração informações numa proporção abrangente por toda a região. É possível destacar também a utilidade da metodologia proposta para realizar uma avaliação para variadas alternativas de traçado de LT, gerando uma comparação dos resultados obtidos e avaliando os custos totais com diversas rotas geradas. Sendo assim, é uma ferramenta muito útil para os tomadores de decisões responsáveis pela definição de estimativa de valor para leilões de LT e determinação da atratividade do lote.

Durante o desenvolvimento do algoritmo de DIJKSTRA (1959) foram encontradas algumas dificuldades, pois foi necessário realizar alguns ajustes no mesmo de maneira a gerar a rota de caminho ótimo em um grafo com características específicas (*raster*). Outra dificuldade encontrada durante a elaboração do presente trabalho foi determinar os custos do método de Valores Monetários para todos os critérios avaliados.

Para trabalhos futuros, existem outros critérios que não foram avaliados neste trabalho e que podem ser relevantes para outras regiões de estudo, dentre os quais podem ser citados: áreas indígenas e regiões onde existam povos quilombolas, que são importantes do ponto de vista ambiental, cultural e social. Outra melhoria pode ser estudada no algoritmo de DIJKSTRA (1959) aplicando técnicas de processamento mais sofisticadas. Além dessas melhorias, pode ser desenvolvido na metodologia o posicionamento de construção das estruturas da LT. No estudo de locação das torres da linha as informações (como por exemplo, sondagem e hidrografia) são avaliadas com maiores detalhes para dimensionar as estruturas.

Além disso, destaca-se que é possível utilizar estudos e mapas geotécnicos mais específicos para área de interesse. No que diz respeito a esse fator, no presente trabalho, foram considerados valores médios para determinar os custos das fundações, de acordo com a Base de Preços de Referência 06/2017 - Orçamento de Linhas de Transmissão. Com isso, é fortemente indicado que, para projetos futuros e mais particulares, sejam realizados estudos sobre o mapeamento geotécnico e que esses sejam considerados como critério na metodologia para determinar o traçado da LT. Assim, é possível gerar e garantir estimativas mais fiéis e realistas dos custos totais de implantação da linha, evitando também locais onde as características geotécnicas são ruins.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABNT, 1985, **NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 1996, **NBR 6122 - Projeto e execução de fundações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2003, **NBR 8681 - Ações e Segurança nas Estruturas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2004, **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ADAMCSEK, E., 2008, **The Analytic Hierarchy Process and its Generalizations**. Thesis, Eötvös Loránd University.
- AGUILERA, J. R. F., 2007, **Estruturas Treliçadas Esbeltas sob Ação do Vento**. Dissertação de M.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: [http://www.civ.puc-rio.br/wp-content/view/down\\_pdf.php?pdf=../pdf/22.pdf](http://www.civ.puc-rio.br/wp-content/view/down_pdf.php?pdf=../pdf/22.pdf). Acesso em: 03 jul. 2018.
- ALONSO, J. A., LAMATA, M. T., 2006, **CONSISTENCY IN THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A NEW APPROACH**. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. v. 14, n. 4, pp. 445–459.
- ANEEL, 2003, **Resolução nº 652**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura\\_arquivo/arquivos/res2003652.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura_arquivo/arquivos/res2003652.pdf). Acesso em: 16 jul. 2019.
- ANEEL, 2009, **Resolução Homologatória Nº 758**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/atreh2009758.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2018.
- ANEEL, 2011, **Nota Técnica Nº 0075/2011-SRD/ANEEL**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em:

<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica\\_0075\\_DANIEL\\_SRD.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0075_DANIEL_SRD.pdf)>. Acesso em: 12 jul. 2018.

ANEEL, 2017, **Base de Preços de Referência 06/2017 - Orçamento de Linhas de Transmissão**. Agência Nacional de Energia Elétrica.

ANEEL, 2016, **SIGEL - Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>>. Acesso em: 01 abr. 2019.

ANEEL, 2019, **Banco de Informações de Geração (BIG) – Capacidade de Geração do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

ARANTES, C. S., LOBATO, G. C., GUIMARÃES, M. S., OLIVEIRA, M. L. R., TAYETTE, R. V. N., 2016, **Análise conceitual de linhas de transmissão operando em regime permanente senoidal**. ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 4, n. 2, e00206.

ATKINSON, D. M., DEAFMAN, P., DUDYCHA, D., TRAYNOR, S., 2005, **Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road**. Applied Geography. 25, pp. 287-307.

BAGLI, S., GENELETTI, D., ORSI, F., 2011, **Routing of Power Lines through Least-Cost Path Analysis and Multicriteria Evaluation to Minimize Environmental Impacts**. Environmental Impact Assessment Review. 31, pp. 234-239.

BEMMELEN, J. van, QUAK, W., HEKKEN, M. van, OOSTEROM, P. van, 1993, **Vector vs. Raster-based Algorithms for Cross Country Movement Planning**. In Proceedings of Auto Carto 11. pp. 304–317.

BRUNELLI, M., 2015, **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. New York, Springer.

- CAMBRIDGE, 2018, **Dictionary**. Cambridge University Press. Disponível em: <<https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/raster>>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A. M. V., 2001, **Introdução à Ciência da Geoinformação**. INPE, São José dos Campos, Brasil. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- CAMPOS, P. B. R., 2014, **Modelagem de Corredores Ótimos para Linhas Aéreas de Transporte de Energia Elétrica**. Dissertação de M.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/IGCM-9JMMQN/disserta\\_o\\_pedrocampos.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/IGCM-9JMMQN/disserta_o_pedrocampos.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 15 mai. 2018.
- CELGPAR, 2010, **Especificação Técnica para Limitação do Uso de Faixa de Linhas de Subtransmissão e Transmissão da CELG PAR - 69 kV, 138 kV e 230 kV**. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicao.com.br/go/documentos/ET-LTP.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 2018.
- CHOO, E. U., WEDLEY, W. C., 2004, **A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices**. Computers & Operations Research, 31(6):893–908.
- COLLISCHONN, W., PILAR, J. V., 2000, **A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals**. International Journal of Geographical Information Science. v. 14, n. 4, pp. 397-406.
- CORREA, S. M. B. B., 2003, **Probabilidade e Estatística**. 2 ed. PUC-Minas.
- COWEN, D. J., JENSEN, J. R., HENDRIX, C., HODGSON, M. E., SCHILI, S. R., 2000, **A GIS-Assisted Rail Construction Econometric Model that Incorporates LIDAR Data**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. v. 66, n. 11, pp. 1323-1328, November. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

- CRAWFORD, G., WILLIAMS, C., 1985, **A note on the analysis of subjective judgment matrices**. Journal of Mathematical Psychology 29, pp. 387–405.
- CUNHA, L., 2010, **Padrões Brasileiros**. Portal – O Setor Elétrico. Edição 49. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/padroes-brasileiros/>>. Acesso em: 22 mai. de 2018.
- DEDEMEN, Y., 2013, **A Multi-Criteria Decision Analysis Approach to Gis-Based Route Selection for Overhead Power Transmission Lines**. M.Sc. Dissertation. Disponível em: <<http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12615992/index.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2018.
- DEMIRCAN, S., AYDIN, M., DURDURAN, S. S., 2011, **Finding optimum route of electrical energy transmission line using multi-criteria with Q-learning**. Expert Systems with Applications, 38, pp. 3477–3482.
- DIJKSTRA, E. W., 1959, **A Note on Two Problems in Connexion with Graphs**. Numerische Mathematik 1. pp. 269–271.
- DOUGLAS, D. H., 1994, **Least-cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and SlopeLines**. Cartographica. v. 31, n. 3, pp. 37-51.
- ELETROBRÁS, 2005, **Relatório do Programa de Orçamento de Linhas de Transmissão – OLT**. Divisão de Engenharia de Transmissão, ELETROBRÁS S/A. Fevereiro. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes\\_administrativas/Documentos/ANEXO%203%20-%20Diretrizes%20para%20elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20or%C3%A7amentos%20de%20Linhas%20de%20Transmiss%C3%A3o.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes_administrativas/Documentos/ANEXO%203%20-%20Diretrizes%20para%20elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20or%C3%A7amentos%20de%20Linhas%20de%20Transmiss%C3%A3o.pdf)>. Acesso em: 25 dez. de 2018.
- ELIAS, K. M., FAKURY, R. H., GONTIJO, C. R., ARAÚJO, A. H. M., 2014, **Torre de Transmissão: Novo Design e os Desafios da Inserção no Contexto Urbano**. Construmetal 2014 – Congresso Latino-Americano da Construção Metálica. São Paulo, SP, Brasil.

- EROĞLU, H., AYDIN, M., 2015. **Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS**. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23, pp. 1418-1430.
- ETHERINGTON, T. R., 2012, **Least-cost modelling on irregular landscape graph**. Landscape Ecology, 27, pp. 957 – 968.
- FIPE, 2018, **FipeZAP - Índice Fipezap de Preços De Imóveis Anunciados**. Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. Disponível em: <<http://www.fipe.org.br/pt-br/indices/fipezap/#indice-mensal>>. Acesso em: 16 ago. 2018.
- FORMAN, E. H., 1990, **Random indices for Incomplete Pairwise Comparison Matrices**. European Journal of Operational Research 48, pp. 153-155.
- FUCHS, R. D., 1977, **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. Vol.1. Rio de Janeiro, Brasil. LTC/EFEI.
- GARCIA, O. C., 2005, **Influência da Qualidade da Compactação dos Reaterros na Capacidade de Carga de Fundações Submetidas a Esforços de Tração**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc\\_download&gid=1692&Itemid=>](http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=1692&Itemid=>)>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- GOLDEN, B. L., WASIL, E. A., HARKER, P. T., 1989, **The Analytic Hierarchy Process Applications and Studies**. Berlin , Springer-Verlag.
- GOODCHILD, M. F., 1977, **An Evaluation of Lattice Solutions to the Problem of Corridor Location**. Environment and Planning A, v. 9, pp. 727-738.
- GRANATA, C. A. V., MACEDO, A. B. R., NOGUEIRA, M. M., 2001, **Inovações Tecnológicas na Manutenção de Sistemas de Transmissão Subterrânea**. ANEEL. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/Citenel2001/>>>. Acesso em: 02 ago. 2018.
- GRASSI, S., FRIEDLI, R., GRANGIER, M., RAUBAL, M., 2014, **A GIS-Based Process for Calculating Visibility Impact from Buildings During Transmission**

**Line Routing.** Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing Switzerland.

GRIGSBY, L. L., 2007, **Electric Power Generation, Transmission, and Distribution.**

Electric Power Engineering Handbook. Ed. 2. Boca Raton. CRC Press.

HAILONG LI, DIHUA LI, TING LI, QING QIAO, JIAN YANG, HEMIN ZHANG, 2010, **Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake-Case study of Wolong Nature Reserve in China.** Ecological Modelling, 221, pp. 944-952.

HOSSEINI, M., BAHMANI, H. F., 2011, **Evaluation and Routing of Power Transmission Lines by Using AHP Method and Genetic Algorithm.** IEEE Symposium on Computers & Informatics.

HUSAIN, F., SULAIMAN, N. A., HASHIM, K. A. SAMAD, A. M., 2012, **Multi-Criteria Selection for TNB Transmission Line Route Using AHP and GIS.** IEEE, International Conference on System Engineering and Technology. Bandung, Indonesia.

JAGA, R. M. N., SUNDARAM, A., NATARAJAN, T., 1993, **Wasteland development using Geographic Information System techniques.** International Journal of Remote Sensing. v. 14, n. 17, pp. 3249-3257.

KAVOURAS, M., STEFANAKIS, E., 1995a, **On the determination of the optimum path in space.** Proceedings of the European Conference on Spatial Information Theory, COSIT 95, Semmering, Austria. Springer-Verlag.

KAVOURAS, M., STEFANAKIS, E., 1995b, **Determination of the Optimum Path on the Earth's Surface.** Proceedings of the 17th International Cartographic Association Conference, Barcelona, Spain.

KENNDY, J., EBERHART, R., 1995, **Particle Swarm Optimization.** Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia, Australia.

- KIESSLING, F., NEFZGER, P., NOLASCO, J. F., KAJNTZYK, U., 2003, **Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction**. Springer – Verlag Berlin Heidelberg.
- LA RUE, M. A., NIELSEN, C. K., 2008, **Modelling potential dispersal corridors for cougars in Midwestern North America using least-cost path methods**. Ecological Modelling. 212, pp. 372-381.
- LEE, J., STUCKY, D., 1998, **On applying viewshed analysis for determining least-cost path on digital elevation models**. International Journal of Geographical Information Science. v. 12, n. 8, pp. 891-905.
- LIMA, R. M., 2015, **Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. Dissertação de M.Sc., UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/156>>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- MAMEDE, J. F., 2005, **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3 ed. Rio de Janeiro, LTC.
- MELO, M. V. E. S., 2016, **Linhas de Transmissão e Descargas Atmosféricas: Análise de Avarias, Perdas Técnico-Financeiras e Sistemas de Proteção**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, Brasil.
- MELO, S. R. F. C., 2018, **Modelagem de Topologia de Redes de Distribuição com Algoritmos Genéticos em Ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas)**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016, **ICA 96-1**. Comando da Aeronáutica, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Disponível em: <<https://www.decea.gov.br/?i=atividades&p=cartografia-aeronautica>>. Acesso em: 14 jun. 2018.

- MIRANDA, E. E. (Coord.), 2005, **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 17 Mai. 2018
- MIRANDA, J. I., 2010, **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 2 ed. Brasília, DF, Embrapa Informação Tecnológica.
- MORETTIN, P. A., BUSSAB, W. O., 2004, **Estatística Básica**. 5 ed. Saraiva.
- MMA, 2011. **Portaria nº 421**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://oads.org.br/leis/3542.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2018.
- MMA, 2014, **i3Geo – Download de dados geográficos**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 28 jun. 2018.
- MME-EPE, 2017, **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. MME/EPE. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026\\_versao\\_para\\_publicacao\\_08dez2017.pdf/f5d8f999-566d-4f5b-9167-d80b6ea8924e](http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026_versao_para_publicacao_08dez2017.pdf/f5d8f999-566d-4f5b-9167-d80b6ea8924e)>. Acesso em: 17 mai. 2018.
- MONTEIRO, C.; RAMÍREZ-ROSADO, I.; MIRANDA, V.; ZORZANO-SANTAMARÍA, P. J.; GARCÍA-GARRIDO, E.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, L. A. , 2005, **GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization**. IEEE Transactions on Power Delivery. v. 20, n. 2.
- MP/MMA, 2009, **Portaria Interministerial Nº 436**. Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão/Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/assuntos/patrimonio-da-uniao/legislacao/portaria-interministerial-436-2009-entrega-de-areas-de-uniao-em-uc-ao-mma.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.
- MP/MMA/MME, 2014, **Portaria Interministerial Nº 37**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão/Ministério do Meio Ambiente/Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <[122](http://www.planejamento.gov.br/assuntos/patrimonio-da-</a></p></div><div data-bbox=)

[uniao/legislacao/07\\_portaria-interministerial-37-2014-transmissao-energia-elet-unid-cons.pdf](http://uniao/legislacao/07_portaria-interministerial-37-2014-transmissao-energia-elet-unid-cons.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2018.

NETTO, P. O. B., 2011, **Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos**. 5 ed. revista e ampliada. Blucher.

NISHIZAWA, K., TAKAHASHI, I., 2009, **Weighted and Logarithmic Least Square Methods for Mutual Evaluation Network System Including AHP and ANP**. Journal of the Operations Research, Society of Japan. v. 52, n. 3, pp. 221-244.

ONS, 2018, **Sistema Interligado Nacional (SIN)**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://ons.org.br/>>. Acesso em: 17 mai. 2018.

PNLT, 2010, **Base de Dados Georreferenciada**. Plano Nacional de Logística e Transportes. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/2822-base-de-dados-georreferenciados-pnlt-2010.html>>. Acesso em: 14 jun. 2018.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 1988, **Decreto N° 97.280**. Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1980-1989/D97280.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D97280.htm)>. Acesso em: 12 jul. 2018.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2000, **Lei N° 9.985**. Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9985.htm)>. Acesso em: 28 jun. 2018.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2010, **Decreto N° 7.154**. Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7154.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7154.htm)>. Acesso em: 28 jun. 2018.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2012, **Lei N° 12.651**. Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm)>. Acesso em: 15 jun. 2018.

- ROY, B., 1991, **The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods**. Theory and Decision, v. 31, pp. 49-73. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00134132>>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- RUONING, X., XIAOYAN, Z., 1996, **Fuzzy logarithmic least squares ranking method in analytic hierarchy process**. Fuzzy Sets and Systems. v. 77, n. 2, pp. 175-190.
- SAATY, T.L., 1980, **The Analytic Hierarchy Process**. New York.
- SAATY, R. W., 1987, **The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used**. Pergamon Journals Ltd, Mathematical Modelling, Vol. 9, n. 3-5, pp. 161-176. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738>>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- SAATY, T. L., 1990, **How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process**. European Journal of Operational Research, v. 48, pp. 9-29, North-Holland. Disponível em: <<https://www.ida.liu.se/~TDDD06/literature/saaty.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- SAATY, T. L., 1999, **Fundamentals of the Analytic Network Process**. International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. Kobe, Japan, August 12-14.
- SAATY, T. L., VARGAS, L. G., 1984, **Comparison of eigenvalue, logarithmic least squares and least squares methods in estimating ratios**. Mathematical Modelling, v. 5, pp. 309-324.
- SCHMIDT, A. J., 2009, **Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines**. Papers in Resource Analysis. v. 11, 17pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. Winona, MN.
- SHU, J., WU, L., LI, Z., SHAHIDEHPOUR, M., ZHANG, L., Han, B., 2012, **A New Method for Spatial Power Network Planning in Complicated Environments**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, v. 27, n. 1.

- SILVA, M. T. F., 2011, **Projeto & Desenvolvimento de um padrão para Alta Tensão em Corrente Contínua na Faixa de 1 kV a 50 kV**. Dissertação de M.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=17889@1](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=17889@1)>. Acesso em: 21 mar. 2018.
- SPIEGEL, M. R., 1978, **Probabilidade e Estatística**. McGraw-Hill.
- STAHL, C. W., 2005, **Accumulated Surfaces & Least-Cost Paths: GIS Modeling for Autonomous Ground Vehicle (AGV) Navigation**. M.Sc. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- STEVENSON, W. D. J., 1986, **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2 ed. São Paulo, McGraw-Hill.
- VELOZO, L. T., 2010, **Metodização do Estudo das Fundações para Suportes de Linhas de Transmissão**. Tese de D.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=16178@1](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=16178@1)>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- HASENACK, H., WEBER, E., 1998, **Análise de alternativas de traçado de um gasoduto utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG**. GIS-Brasil 98 – IV Congresso e feira para usuários de geoprocessamento. Anais. Curitiba/PR.
- XU, Y., PATNAYAKUNI, R., WANG, H., 2013, **Logarithmic Least Squares Method to Priority for Group Decision Making with Incomplete Fuzzy Preference Relations**. Applied Mathematical Modelling. v. 37, n. 4, pp. 2139–2152.
- YU, C., LEE, J., MUNRO-STASIUK, M. J., 2003, **Extensions to Least-Cost Path Algorithms for Roadway Planning**. Int. J. Geographical Information Science. v. 17, n. 4, pp. 361-376.

## ANEXO I – ALGORITMO PARA DETERMINAR O RI

A seguir é apresentado o algoritmo desenvolvido em Python 3 para determinar os valores de RI:

```
from numpy import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

vetor_RI = []

RItxt = open('RI.txt','a')

ordem_min = 2
ordem_max = 51

for n in range(ordem_min,ordem_max): #ordem da matriz

    RI=[]

    CI_aux = 0

    numero_testes = 100000

    for k in range(0,numero_testes):

        Matrix = [[0 for x in range(n)] for y in range(n)]

        for i in range(0,n):

            for j in range(0,n):

                if i==j:

                    Matrix[i][j] = 1

                else:

                    nrand = random.randint(1,3)
                    arand = random.randint(1,10)

                    if nrand==1:

                        Matrix[i][j] = 1/arand

                        Matrix[j][i] = arand
```

```

elif nrand==2:
    Matrix[i][j] = arand
    Matrix[j][i] = 1/arand

autovalor,autovetor = linalg.eig(Matrix)
autovalor = reshape(autovalor,(1,len(autovalor)))
autovalor_max = [max(autovalor[ii]) for ii in range(0, len(autovalor))]
CI = (autovalor_max[0]-n)/(n-1) + CI_aux
CI_aux = CI
RI = CI/numero_testes

RItxt.write(str('{}\n'.format(RI.real)))
vetor_RI.append([RI.real])
plt.scatter(n, RI.real, s=60, c='red') #, marker='^'
print('Ordem da Matriz:',n)
print('Random Index:',RI)
print('#####')

plt.plot(np.arange(ordem_min, ordem_max, 1),vetor_RI)
RItxt.close()
plt.show()

```

## **ANEXO II – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE LT PARA CADA TIPO DE ESTRUTURA**

Este anexo visa apresentar de maneira resumida os custos para construção de LTs, levando em consideração dois tipos de estruturas. No tocante aos valores obtidos no presente trabalho, foram consideradas algumas características gerais de acordo os seguintes itens (ELLETROBRÁS, 2005):

- **Regiões** – este parâmetro visa atender às diferenças entre as regiões do país, dentre as quais podem ser destacadas: clima, relevo, vegetação, solo, transporte, mão de obra e etc. Essas diferenças acarretam na aplicação de critérios de projetos diferentes e são representados por parcelas de custos distintas. Portanto, como a localidade do projeto encontra-se no estado da Bahia a região escolhida é a Nordeste;
- **Tipo de Corrente** – o orçamento da LT foi computado considerando como Corrente Alternada (CA);
- **Classe de Tensão** – a classe de tensão considerada é 230 kV (CA);
- **Tipo de Circuito** – para estimar o valor da LT no presente trabalho, foi considerado Circuito Simples (CS);
- **Estruturas** – as estruturas consideradas foram do tipo Aço Autoportante Convencional e Aço Estaiada Convencional;
- **Fundação** – a fundação considerada foi do tipo Grelha;
- **Cabo Condutor** – os cabos condutores utilizados nas estimativas de custo da LT padronizada são do tipo Condutor de Alumínio com Alma de Aço (CAA);
- **Cabo Para-Raios** – foi considerado o cabo Alumoweld;
- **Configuração das Cadeias de Isoladores** – a configuração da cadeia de isoladores escolhida, considerando uma LT em CA, foi do tipo III;

Com os dados gerais apresentados, foram selecionadas dois tipos de estruturas que serviram como base para realizar a estimativa do custo de construção da LT. Portanto, a estrutura autoportante foi DUCK e a estrutura estaiada foi DOVE. A seguir são apresentados os custos da LT para ambas as torres consideradas.

## AÇO AUTOPORTANTE CONVENCIONAL (CÓDIGO: DUCK)

Os custos de construção de LT considerando estrutura em aço autoportante convencional, denominada de DUCK, foram obtidos de acordo com a Base de Preços de Referência 06/2017 - Orçamento de Linhas de Transmissão (ANEEL, 2017). O Custo Direto para implantação da LT foi subdividido em: Custo Direto Básico, Estudos de Engenharia, Custos Ambientais e Administração Local. A seguir, na Tabela 30, são apresentados os itens considerados para compor o Custo Direto Básico.

Tabela 30 – Custo direto básico, para estrutura em aço autoportante convencional (DUCK).

Item	Descrição	R\$/km
1	Terrenos e Servidões	R\$ 36.029,55
2	Aquisição de Materiais	
2.1	Estruturas em Aço	R\$ 83.843,13
2.2	Fundação em Grelha	R\$ 20.203,11
2.3	Cabo Condutor	R\$ 72.119,45
2.4	Cabo Para-Raios Convencional	R\$ 8.148,47
2.5	Isoladores	R\$ 13.935,02
2.6	Ferragens e Acessórios	
2.6.1	Conjunto de Suspensão do Cabo Condutor	R\$ 4.507,66
2.6.2	Conjunto de Ancoragem do Cabo Condutor	R\$ 1.243,29
2.6.3	Conjunto de <i>Juniper</i> do Cabo Condutor	R\$ 152,29
2.6.4	Conjunto de Suspensão do Cabo Para-Raios	R\$ 158,43
2.6.5	Conjunto de Ancoragem do Cabo Para-Raios	R\$ 9,23
2.6.6	Amortecedores do Cabo Condutor	R\$ 1.609,04
2.6.7	Amortecedores do Cabo Para-Raios	R\$ 114,93
2.7	Aterramento	R\$ 3.289,69
2.8	Outros Acessórios <sup>1</sup>	R\$ 628,00
3	Inspeção de Material <sup>2</sup>	R\$ 2.939,46
4	Canteiro de Obras <sup>3</sup>	R\$ 5.836,94
5	Construção	
5.1	Limpeza de Faixa	R\$ 12.700,67
5.2	Execução de Fundações	
5.2.1	Escavação	R\$ 5.465,21
5.2.2	Montagem de Grelhas	R\$ 23.114,48
5.2.3	Concretagem	R\$ 58.783,13
5.3	Montagem das Estruturas: Aço Autoportante <sup>4</sup>	R\$ 22.973,02
5.4	Instalação do Cabo Condutor <sup>5</sup>	R\$ 17.669,27
5.5	Instalação do Cabo Para-Raios Convencional <sup>6</sup>	R\$ 5.923,94
5.6	Instalação de Aterramento <sup>7</sup>	R\$ 3.668,01

<b>5.7</b>	Construção de Acessos	R\$	8.102,41
<b>6</b>	Serviços Técnicos		
<b>6.1</b>	Serviços de Topografia	R\$	4.009,61
<b>6.2</b>	Serviços de Geologia/Sondagem	R\$	5.419,02
<b>TOTAL</b>		<b>R\$</b>	<b>422.596,45</b>

Notas:

- 1 – 0,3% sobre a Aquisição de Materiais (2.1-2.7);
- 2 – 1,4% sobre a Aquisição de Materiais (2.1-2.8);
- 3 – 2,78% (obras *Greenfield*) sobre a Aquisição de Materiais (2.1-2.8);
- 4 – 27,4% sobre a aquisição de Estruturas de Aço;
- 5 – 24,5% sobre a aquisição do Cabo Condutor;
- 6 – 72,7% sobre a aquisição do Cabo Para-Raios Convencional;
- 7 – 111,5% sobre a aquisição dos Materiais utilizados no Aterramento.

Os custos relacionados a Estudos de Engenharia, Custos Ambientais e Administração Local são exibidos na Tabela 31.

Tabela 31 – Estudos de Engenharia, Custos Ambientais e Administração Local, para estrutura em aço autoportante convencional (DUCK).

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>R\$/km</b>
<b>1</b>	<b>ESTUDOS DE ENGENHARIA</b>	
<b>1.1</b>	Projeto Básico <sup>1</sup>	R\$ 5.916,35
<b>1.2</b>	Projeto Executivo <sup>2</sup>	R\$ 11.410,10
<b>2</b>	<b>CUSTOS AMBIENTAIS<sup>3</sup></b>	R\$ 5.282,46
<b>3</b>	<b>ADMINISTRAÇÃO LOCAL<sup>4</sup></b>	R\$ 11.410,10
<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 34.019,01</b>

Notas:

- 1 – 1,4% sobre o Custo Direto Básico (Tabela 30);
- 2 – 2,7% sobre o Custo Direto Básico (Tabela 30);
- 3 – 1,25% (obras *Greenfield*) sobre o Custo Direto Básico (Tabela 30);
- 4 – 2,7% sobre o Custo Direto Básico (Tabela 30).

Além disso, foram considerados Custos Indiretos para implantação da LT sendo divididos como: Administração Central e Custos Eventuais. Os Custos Indiretos são mostrados na Tabela 32.

Tabela 32 – Custos indiretos, para estrutura em aço autoportante convencional (DUCK).

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>R\$/km</b>
<b>1</b>	<b>ADMINISTRAÇÃO CENTRAL<sup>1</sup></b>	R\$ 12.328,62
<b>2</b>	<b>EVENTUAIS<sup>2</sup></b>	R\$ 13.698,46
<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 26.027,08</b>

Notas:

- 1 – 2,7% sobre o Custo Direto (Tabela 30 e Tabela 31);

2 – 3% sobre o Custo Direto (Tabela 30 e Tabela 31).

O valor do custo de construção por quilômetro de uma LT considerando estrutura em aço autoportante convencional, tipo DUCK, é obtido com a soma dos totais parciais apresentados (Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32). Portanto, o valor do custo estimado é de R\$ 482.642,55 / km.

### **AÇO ESTAIADA CONVENCIONAL (CÓDIGO: DOVE)**

Os custos de construção de LT considerando estrutura em aço estaiada convencional, denominada de DOVE, foram obtidos de acordo com a Base de Preços de Referência 06/2017 - Orçamento de Linhas de Transmissão (ANEEL, 2017). O Custo Direto para implantação da LT foi subdividido em: Custo Direto Básico, Estudos de Engenharia, Custos Ambientais e Administração Local. A seguir, na Tabela 33, são apresentados os itens considerados para compor o Custo Direto Básico.

Tabela 33 – Custo direto básico, para estrutura em aço estaiada convencional (DOVE).

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>R\$/km</b>
<b>1</b>	Terrenos e Servidões	R\$ 34.228,07
<b>2</b>	Aquisição de Materiais	
<b>2.1</b>	Estruturas em Aço	R\$ 52.659,37
<b>2.2</b>	Estaiamento	R\$ 7.524,81
<b>2.3</b>	Fundação em Grelha	R\$ 424,44
<b>2.4</b>	Hastes de Âncora/Tirantes	R\$ 233,21
<b>2.5</b>	Cabo Condutor	R\$ 64.550,85
<b>2.6</b>	Cabo Para-raios Convencional	R\$ 8.148,47
<b>2.7</b>	Isoladores	R\$ 9.724,22
<b>2.8</b>	Ferragens e Acessórios	
<b>2.8.1</b>	Conjunto de Suspensão do Cabo Condutor	R\$ 3.984,28
<b>2.8.2</b>	Conjunto de Ancoragem do Cabo Condutor	R\$ 1.099,83
<b>2.8.3</b>	Conjunto de Jumper do Cabo Condutor	R\$ 133,45
<b>2.8.4</b>	Conjunto de Suspensão do Cabo Para-raios	R\$ 145,88
<b>2.8.5</b>	Conjunto de Ancoragem do Cabo Para-raios	R\$ 8,51
<b>2.8.6</b>	Amortecedores do Cabo Condutor	R\$ 1.422,84
<b>2.8.7</b>	Amortecedores do Cabo Para-raios	R\$ 50,89
<b>2.9</b>	Aterramento	R\$ 3.289,69
<b>2.10</b>	Outros Acessórios <sup>1</sup>	R\$ 460,20
<b>3</b>	Inspeção de Material <sup>2</sup>	R\$ 2.154,05
<b>4</b>	Canteiro de Obras <sup>3</sup>	R\$ 4.277,33

<b>5</b>	<b>Construção</b>		
<b>5.1</b>	Limpeza de Faixa	R\$	12.065,64
<b>5.2</b>	Execução de Fundações		
<b>5.2.1</b>	Escavação	R\$	574,14
<b>5.2.2</b>	Montagem de Grelhas	R\$	485,60
<b>5.2.3</b>	Instalação de Hastes/Tirantes	R\$	35,93
<b>5.2.4</b>	Concretagem	R\$	17.877,34
<b>5.3</b>	Montagem das Estruturas: Aço Estaiada <sup>4</sup>	R\$	19.799,92
<b>5.4</b>	Instalação do Cabo Condutor <sup>5</sup>	R\$	15.814,96
<b>5.5</b>	Instalação do Cabo Para-raios Convencional <sup>6</sup>	R\$	5.923,94
<b>5.6</b>	Instalação de Aterramento <sup>7</sup>	R\$	3.668,01
<b>5.7</b>	Construção de Acessos	R\$	8.102,41
<b>6</b>	<b>Serviços Técnicos</b>		
<b>6.1</b>	Serviços de Topografia	R\$	4.009,61
<b>6.2</b>	Serviços de Geologia/Sondagem	R\$	5.419,02
	<b>TOTAL</b>	<b>R\$</b>	<b>288.296,90</b>

Notas:

- 1 – 0,3% sobre a Aquisição de Materiais (2.1-2.9);
- 2 – 1,4% sobre a Aquisição de Materiais (2.1-2.10);
- 3 – 2,78% (obras *Greenfield*) sobre a Aquisição de Materiais (2.1-2.10);
- 4 – 27,4% sobre a aquisição de Estruturas de Aço;
- 5 – 24,5% sobre a aquisição do Cabo Condutor;
- 6 – 72,7% sobre a aquisição do Cabo Para-Raios Convencional;
- 7 – 111,5% sobre a aquisição dos Materiais utilizados no Aterramento.

Os custos relacionados a Estudos de Engenharia, Custos Ambientais e Administração Local são exibidos na Tabela 34.

Tabela 34 – Estudos de Engenharia, Custos Ambientais e Administração Local, para estrutura em aço estaiada convencional (DOVE).

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>R\$/km</b>
<b>1</b>	<b>ESTUDOS DE ENGENHARIA</b>	
<b>1.1</b>	Projeto Básico <sup>1</sup>	R\$ 4.036,16
<b>1.2</b>	Projeto Executivo <sup>2</sup>	R\$ 7.784,02
<b>2</b>	<b>CUSTOS AMBIENTAIS<sup>3</sup></b>	R\$ 3.603,71
<b>3</b>	<b>ADMINISTRAÇÃO LOCAL<sup>4</sup></b>	R\$ 7.784,02
	<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 23.207,90</b>

Notas:

- 1 – 1,4% sobre o Custo Direto Básico (Tabela 33);
- 2 – 2,7% sobre o Custo Direto Básico (Tabela 33);
- 3 – 1,25% (obras *Greenfield*) sobre o Custo Direto Básico (Tabela 33);
- 4 – 2,7% sobre o Custo Direto Básico (Tabela 33).

Além disso, foram considerados Custos Indiretos para implantação da LT sendo divididos como: Administração Central e Custos Eventuais. Os Custos Indiretos são mostrados na Tabela 35.

Tabela 35 – Custos indiretos, para estrutura em aço estaiada convencional (DOVE).

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>R\$/km</b>
<b>1</b>	ADMINISTRAÇÃO CENTRAL <sup>1</sup>	R\$ 8.410,63
<b>2</b>	EVENTUAIS <sup>2</sup>	R\$ 9.345,14
	<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 17.755,77</b>

Notas:

1 – 2,7% sobre o Custo Direto (Tabela 33 e Tabela 34);

2 – 3% sobre o Custo Direto (Tabela 33 e Tabela 34).

O valor do custo de construção por quilômetro de uma LT considerando estrutura em aço estaiada convencional, tipo DOVE, é obtido com a soma dos totais parciais apresentados (Tabela 33, Tabela 34 e Tabela 35). Portanto, o valor do custo estimado é de R\$ 329.260,58 / km.

## **DESCRIÇÃO DOS ITENS**

A seguir são apresentadas as descrições dos itens considerados na estimativa do custo da LT (ELETROBRÁS, 2005).

### **1 Custo Direto**

Parcela que representa a soma dos custos dos subitens a seguir:

#### **1.1 Terrenos e Servidões**

Contempla as despesas relativas à composição da servidão administrativa da faixa, eventuais aquisições e desapropriações de terreno na localidade em que será construída a LT, incluindo despesas legais, judiciais e impostos.

Portanto, o valor do custo unitário, fornecido por quilômetro de linha (considerando como base a área definida pelo comprimento da linha com a largura de faixa de segurança recomendada para o nível de tensão), representa os diversos tipos de custos que constituem este critério.

## 1.2 Materiais

### 1.2.1 Aquisição

Contempla todas as despesas com a aquisição dos diferentes materiais, de acordo com os seguintes subitens:

#### 1.2.1.1 Estruturas

No que tange o custo de aquisição de estruturas metálicas treliçadas, autoportantes, o mesmo é obtido em função do peso do aço estrutural por quilômetro de linha. Enquanto que, para o caso das linhas com estruturas estaiadas, o peso do aço estrutural está relacionado à média equivalente obtida entre os pesos das estruturas estaiadas e autoportantes usadas na LT.

#### 1.2.1.2 Estaiamento

Este item é computado apenas quando forem utilizadas estruturas metálicas estaiadas. É composto pelo cabo de aço e pelo conjunto de estaiamento. O custo total para a aquisição obtém-se em função das quantidades de materiais (cabos e ferragens associadas) por quilômetro de LT.

#### 1.2.1.3 Fundações

Representa o custo de aquisição das fundações metálicas em grelha, cantoneira de ancoragem, e hastes de âncora/tirantes, de acordo com os tipos de estruturas e fundações envolvidas.

O valor resultante é representativo dos seguintes componentes:

- Custo das grelhas ou cantoneiras de ancoragem, tomado com base no peso do aço estrutural por quilômetro de LT;
- Custo médio dos vários tipos de hastes de âncora/tirantes tomado por quilômetro de LT.

#### 1.2.1.4 Cabo Condutor

O custo de aquisição deste item está relacionado com a quantidade de material (peso do cabo) por quilômetro de LT que varia de acordo com o tipo, área da seção transversal e formação do cabo usado e com o número de subcondutores por fase .

#### 1.2.1.5 Cabo Para-Raios Convencional

De maneira semelhante ao item anterior, o custo de aquisição está relacionado com a quantidade de material (peso do cabo) por quilômetro de LT, que varia em função do tipo, bitola ou área da seção transversal e formação do cabo usado e o número de cabos para-raios considerados.

#### 1.2.1.6 Isoladores

O custo de aquisição deste item é baseado na quantidade de isoladores utilizada por quilômetro de LT, variando de acordo com o tipo de isolador, características eletromecânicas e tipo de arranjo de cadeia.

#### 1.2.1.7 Ferragens e Acessórios

O custo total de aquisição está associado com as quantidades dos seguintes materiais, dependentes de classe de tensão, por quilômetro de LT: conjuntos de ferragens componentes das cadeias de isoladores dos cabos condutores e fixação dos cabos para-raios (grampo de suspensão, grampo de ancoragem, balancins, manilhas, etc...), amortecedores, espaçadores, espaçadores-amortecedores, acessórios de cabos (luvas de emenda, luva de reparo, armaduras, etc...), acessórios de sinalização e identificação (placas de identificação, sinalização, advertência, esferas de sinalização, balizadores, etc...).

#### 1.2.1.8 Aterramento

Este item representa o custo de aquisição do fio contrapeso e seus acessórios, constante para todas as classes de tensão, por quilômetro de LT.

#### 1.2.1.9 Outros Acessórios

Calculado através da aplicação de um índice percentual ao somatório dos custos de aquisição dos materiais supracitados.

#### 1.2.2 Inspeção

Calculado através da aplicação de um índice percentual ao somatório dos custos de aquisição dos materiais (item 1.2.1).

#### 1.2.3 Canteiro de Obras

Calculado através da aplicação de um índice percentual ao somatório dos custos de aquisição dos materiais (item 1.2.1).

### 1.3 Construção

#### 1.3.1 Limpeza de Faixa

O custo deste item está relacionado às despesas de supressão de vegetação, limpeza de faixa da linha e corte seletivo da vegetação. O custo unitário dado por quilômetro de LT em função das dimensões da faixa (largura x comprimento da LT) é representativo dos serviços envolvidos.

#### 1.3.2 Execução de Fundações

Este parâmetro é dependente da classe de tensão e, bem como, dos tipos de estrutura e fundação escolhidos. O custo é o resultado da composição dos diversos serviços envolvidos, dentre os quais podem ser destacados:

- Escavação, concretagem e reaterro: obtidos com base em volumes totais por quilômetro de LT;
- Montagem das grelhas ou cantoneiras de ancoragem: em função do peso de aço estrutural por quilômetro de LT;

- Instalação dos conjuntos de fixação de estais e hastes de âncora/tirantes para estaiamento - obtidos através da quantidade de estruturas por quilômetro de linha.

No tocante a concretagem é considerado o fornecimento e confecção das armaduras, fôrmas e desfôrmas e, também, o fornecimento e aplicação do concreto.

### 1.3.3 Montagem das Estruturas

O custo de montagem das estruturas metálicas treliçadas é determinado em função da quantidade de aço estrutural por quilômetro de LT, variando de acordo com a classe de tensão e tipo de estrutura.

Para o caso de LT com aplicação de estruturas estaiadas, o peso do aço estrutural por quilômetro leva em consideração também o peso das estruturas autoportantes, e o custo total de montagem inclui o custo relativo à instalação dos estais, cabos de aço para fins estruturais e respectivas ferragens.

Além disso, esse item contempla o custo da instalação de placas de identificação, advertência e pintura de torres.

### 1.3.4 Instalação do Cabo Condutor

Determinado de maneira global por quilômetro de LT, contempla o lançamento, nivelamento e grampeamento do cabo, a instalação das cadeias de isoladores e outros acessórios (amortecedores, espaçadores-amortecedores, conjuntos de emenda, luvas de reparo e outros).

### 1.3.5 Instalação de Cabos Para-Raios Convencional

Idem ao item anterior. Além disso, contempla o custo da instalação de esferas de sinalização aérea.

### 1.3.6 Instalação de Aterramento

Este custo é baseado na quantidade de material (comprimento do fio contrapeso) instalado por quilômetro de LT, incluindo ainda o custo da medição de resistência de aterramento.

### 1.3.7 Abertura de Acessos

O custo deste critério está relacionado a abertura de estradas e caminhos de acesso às torres e representa todos os serviços envolvidos nesta atividade (regularização do terreno, construção de obras de arte, desvio de águas) e está expresso por quilômetro de LT.

### 1.3.8 Serviços de Topografia

Este custo está associado aos serviços realizados para implantação do traçado, levantamento topográfico, locação das estruturas no campo e cadastramento das propriedades públicas e particulares. Este custo é determinado em termos globais por quilômetro de LT.

### 1.3.9 Serviços de Geologia

O custo deste item está relacionado aos serviços de sondagem e classificação de solos. Além disso, abrange o custo da atividade de medição de resistividade do solo, por sua peculiaridade. Medido em termos globais por quilômetro de LT.

### 1.3.10 Estudos de Engenharia

Este custo refere-se aos estudos de viabilidade econômica, projeto básico e executivo. É determinado pela aplicação de um índice percentual sobre o total correspondente ao Custo Direto Básico.

### 1.3.11 Meio Ambiente

Essa parcela destinada a cobrir os custos dos estudos ambientais e medidas mitigadoras decorrentes da construção da LT. A parcela de compensação ambiental mínima de 0,5% do custo total do empreendimento, exigida pela legislação ambiental, já está contemplada neste item.

### 1.3.12 Administração Local

As despesas deste parâmetro referem-se às atividades de fiscalização e resultam da aplicação de um índice percentual sobre o Custo Direto Básico.

## **2 Custo Indireto**

Compreende o total das despesas não alocáveis diretamente à execução da obra.

### **2.1 Administração Central**

Compreende todas as despesas referentes.

## **3 Eventuais**

Este custo é calculado aplicando-se um índice percentual sobre o Custo Direto, destinado a cobrir imprevistos que virtualmente possam ocorrer durante a execução do projeto ou construção (gastos com indenizações de danos causados aos proprietários de terrenos ao longo da faixa de passagem da linha, desvios de estradas, relocação de LT e redes de distribuição ou telecomunicações, etc).

## ANEXO III– ALGORITMO ENXAME DE PARTÍCULAS

A seguir é apresentado o algoritmo desenvolvido em Matlab R2016a para encontrar a matriz de comparações pareadas:

- **Arquivo principal:**

```
%-----  
-----  
%           UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - COPPE  
%           PROGRAMA DE ENGENHARIA MECANICA  
%  
%  
%           METODO DO ENXAME DE PARTICULAS  
%  
%           Aluno: Igor Jasmim da Nóbrega  
%  
%           Professor: D. Sc., Marcelo José Colaço  
%  
%  
%           Rio de Janeiro  
%  
%-----  
-----  
%           INÍCIO DA ROTINA  
%-----  
-----  
%Fechar todas as janelas abertas:  
close all;  
%Limpar variáveis do Workspace:  
clearvars;  
%Limpar Command Window:  
clc;  
%Formato numérico dos números:  
format long;  
%-----  
-----  
  
n = 10;  
w = [1/9 1/8 1/7 1/6 1/5 1/4 1/3 1/2 1 2 3 4 5 6 7 8 9];  
  
% definicoes gerais:  
tic; %inicia temporizador  
rng('shuffle');  
  
alpha=0.0;  
beta=2.0;  
nobj = 0; %contador de chamadas de função objetivo  
k = 0; %contador do processo iterativo  
kmax = 100; %número máximo de iterações  
numvar = ((n^2)-n)/2; %length(ponto1); %número de variáveis  
do problema  
npop = 50*numvar; %tamanho da populacao  
  
ponto1 = ones(1,numvar)*1/9; %limite mínimo  
ponto2 = ones(1,numvar)*9; %limite máximo
```

```

% definindo dimensoes das variáveis:
POP = zeros(npop,numvar);
Fpop = zeros(1,npop);
%Fazendo a iteração 0:
% gerando a populacao inicial:
for j=1:npop          %variando o individuo da populacao
    for i=1:numvar    %variando a dimensao do problema
        r=randi([1,length(w)]);
        POP(j,i)=w(r);%ponto1(i)+(ponto2(i)-ponto1(i))*r;
    end

    [nobj,Fpop(j)] = funcao(nobj,POP(j,:),n);
end

indice_min = find(min(Fpop) == Fpop);
Pbest = POP(indice_min,:);
Fbest = min(Fpop);

% processo iterativo
POPtemp = POP;      %atribui POP a variavel POPtemp
POPini = POP;       %armazena POPini
Ftemp = Fpop;       %atribui Fpop a variavel Ftemp

%Tolerância norma da diferença entre pop e pop_anterior:
tol=1;

while k<kmax && tol>1e-12
    k=k+1;
    for j=1:npop
        for i=1:numvar
            r1=rand();
            r2=rand();
            % move o passaro (ou a partícula):
            POPtemp(j,i)=POPtemp(j,i)+beta*r1*(POP(j,i)-
POPtemp(j,i))+...
                                beta*r2*(Pbest(i)-POPtemp(j,i));

            % verifica/forca os passaros a ficarem dentro dos
contornos
            [c,indice] = min(abs(w-POPtemp(j,i)));
            POPtemp(j,i) = w(indice);
        end

        % calculando a nova funcao de cada passaro (ou a partícula):
        [nobj,Ftemp(j)] = funcao(nobj,POPtemp(j,:),n);
    end
    %Tolerância norma da diferença entre x1 e x0:
    tol=norm(POP-POPtemp);

    % verificando se as posicoes mudaram para cada passaro
    for j=1:npop
        if Ftemp(j)<Fpop(j)
            POP(j,:)=POPtemp(j,:);
        end
        % verificando se o melhor desta nova iteracao eh melhor que o
% melhor de todos:

```

```

        if Ftemp(j)<Fbest
            Fbest=Ftemp(j);
            Pbest=POP(j,:);
        end
    end

    melhores_valores(k) = Fbest;
    melhores_pops(k,:) = Pbest;
end

figure;
plot(1:k,melhores_valores,'LineWidth',1.5);
xlim([1 k])
grid on;
xlabel('Iteração');
ylabel('CR');

figure;
plot(1:k,melhores_pops,'LineWidth',1.5);
xlim([1 k])
grid on;
xlabel('Iteração');
ylabel('Variáveis');

[nobj,F,W_normalizado,A] = funcao(nobj,Pbest,n);

arquivo = 'J:\Trabalho Final\Texto\tabelas.xlsx';
xlswrite(arquivo,A,'AHP_Igor','C2');
xlswrite(arquivo,W_normalizado,'AHP_Igor','L2')

```

- **Função função.m:**

```

function [nobj,F,W_normalizado,A] = funcao(nobj,x,n)
nobj=nobj+1;
A = eye(n);
cont = 1;
for i=1:n-1
    for j=i+1:n
        A(i,j)=x(cont);
        A(j,i)=1/x(cont);
        cont=cont+1;
    end
end
end
RI = [
0.0
0.0
0.49200528002273936
0.8287188895925992
1.0366184493127042
1.1701281627469533
1.2597299379749987
1.3183472345918485
1.3650535079458919
1.3979753088393982
1.4257689468000705
1.44719305452559
1.4651692700814596

```

```

1.4801888236638374
1.492477181075288
1.5045362919126541
1.513738868926564
1.5224459522607154
1.5300448222655767
1.5363651258662994
1.5430759215418426
1.5482483977388475
1.5533886188474824
1.5577129883626393
1.5617854433909892
1.5660088898850681
1.569486943769864
1.572733091388779
1.5758207497505414
1.578599909215631
1.5812581584947976
1.58346576919367
1.5859334299047356
1.5879749964216048
1.5898979799092825
1.5918619841168082
1.5938957959542088
1.5953683114945534
1.5968941957114868
1.5988566701954956
1.6000518483537889
1.6014909904131995
1.6030017760848847
1.6044246755894898
1.6053041389485299
1.6066129853857207
1.6074381447339678
1.6087260691875744
1.60978771608959
1.6105356554630275];

% Autovetor de Pesos:
fator_normalizador = 0;
for i=1:size(A,1)
    W(i) = geomean(A(i,:)) ;
    fator_normalizador = fator_normalizador + W(i);
end
W_normalizado = W./fator_normalizador;
lambda_max = max(eig(A));           % autovalor máximo
n = length(A);                       % ordem da matriz
CI = (lambda_max-n)/(n-1);           % Consistency Index
CR = CI/RI(n);                       % Consistency Ratio
F=CR;
end

```

## ANEXO IV – ALGORITMO DIJKSTRA

A seguir é apresentado o algoritmo DIJKSTRA desenvolvido em Matlab R2016a e suas funções:

- **Arquivo principal:**

```
%-----  
-----  
% INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM  
ENGENHARIA  
%  
%                               COPPE/UFRJ  
%                               PROGRAMA DE ENGENHARIA MECÂNICA  
%  
%                               TRABALHO FINAL - DISSERTAÇÃO  
%  
%                               ALGORITMO DIJKSTRA  
%  
%                               Aluno: Igor Jasmim da Nóbrega  
%  
%                               Orientador: D. Sc., Marcelo José Colaço  
%  
%                               Rio de Janeiro  
%                               Maio, 2018.  
%  
%-----  
-----  
%                               INÍCIO DA ROTINA  
%-----  
-----  
%Fechar todas as janelas abertas:  
close all;  
%Limpar variáveis do Workspace:  
clearvars;  
%Limpar Command Window:  
clc;  
%Formato numérico dos números:  
format long;  
  
%-----  
-----  
[matriz,R] = superficie_atrito(3);  
matriz = double(matriz);  
geoshow(matriz,R,'DisplayType','surface');  
disp('Superfície Lida!');  
% Alocando espaço na memória para as variáveis das coordenadas:  
[Lmax, Cmax]=size(matriz);  
y = zeros(1,Lmax);  
x = zeros(1,Cmax);  
matriz_tmp = matriz;  
for i = 1:1:Lmax  
    matriz(i,:) = matriz_tmp(Lmax+1-i,:);  
end  
% Inciando os valores das coordenadas (xmin e ymin):  
Ext_Lat = abs((R.LatitudeLimits(1)-R.LatitudeLimits(2))/(Lmax));
```

```

y(1) = R.LatitudeLimits(1) + Ext_Lat/2;
yy = linspace(R.LatitudeLimits(1),R.LatitudeLimits(2),Lmax);

Ext_Lon = abs((R.LongitudeLimits(1)-R.LongitudeLimits(2))/(Cmax));
x(1) = R.LongitudeLimits(1) + Ext_Lon/2;
xx = linspace(R.LongitudeLimits(1),R.LongitudeLimits(2),Cmax);

% Encontrando os pontos em x e y:
for i=2:1:Lmax
    y(i) = y(i-1) + Ext_Lat;
end
for i=2:1:Cmax
    x(i) = x(i-1) + Ext_Lon;
end
num_pontos = Lmax*Cmax;
pontos = zeros(num_pontos,5);
k=1;
for j=1:1:Cmax
    for i=1:1:Lmax
        pontos(k,:) = [k x(j) y(i) i j];
        k = k+1;
    end
end

% Determinando os pontos de início e fim do traçado:
[~, finish_id]=min(sqrt((pontos(:,2)-(-41.4)).^2 + (pontos(:,3)-(-11.71)).^2));
[~, start_id]=min(sqrt((pontos(:,2)-(-41.44)).^2 + (pontos(:,3)-(-12.02)).^2));

h = figure;
contourf(xx,yy,matriz, 'LineColor', 'none');
colorbar('NorthOutside');
xlabel('Longitude');
ylabel('Latitude');
hold on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% MAIN FUNCTION - DIJKSTRA'S ALGORITHM

% Inicializações
[num_map_pts,cols] = size(pontos);
table = sparse(num_map_pts,2);
shortest_distance = Inf(num_map_pts,1);
settled = zeros(num_map_pts,1);
path = num2cell(NaN(num_map_pts,1));
col = 2;
pidx = find(start_id == pontos(:,1));
shortest_distance(pidx) = 0;
table(pidx,col) = 0;
settled(pidx) = 1;
path(pidx) = {start_id};
while_cmd = 'settled(zz) == 0';
zz = find(finish_id == pontos(:,1));
disp('Iniciando Dijkstra!');
while eval(while_cmd)
    table(:,col-1) = table(:,col);

```

```

table(pidx,col) = 0;
neighbor_ids = neighbors(pidx,Lmax,Cmax);
% calcula as distâncias para os nós vizinhos:
for k = 1:length(neighbor_ids)
    cidx = find(neighbor_ids(k) == pontos(:,1));
    if ~settled(cidx)
        d = sqrt(sum((pontos(pidx,2:3) - pontos(cidx,2:3)).^2));
        Co = matriz(pontos(pidx,4),pontos(pidx,5));
        Cp = matriz(pontos(cidx,4),pontos(cidx,5));
        CCop = ((Co+Cp)/2)*d;
        if (table(cidx,col-1) == 0) || ...
            (table(cidx,col-1) > (table(pidx,col-1) + CCop))
            table(cidx,col) = table(pidx,col-1) + CCop;
            tmp_path = path(pidx);
            path(cidx) = {[tmp_path{1} neighbor_ids(k)]};
        else
            table(cidx,col) = table(cidx,col-1);
        end
    end
end
end
% encontra o valor mínimo diferente de zero na tabela:
nidx = find(table(:,col));
ndx = find(table(nidx,col) == min(table(nidx,col)));
if isempty(ndx)
    break
else
    pidx = nidx(ndx(1));
    shortest_distance(pidx) = table(pidx,col);
    settled(pidx) = 1;
end
end
dist = shortest_distance(zz);
path = path(zz);
path = path{1};

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%

% Apresenta o resultado (caso exista):
figure(h)
dist_real = 0;
CCo = 0;
dx = R.RasterSize(2)*90/Cmax;
dy = R.RasterSize(1)*90/Lmax;
dxy = sqrt((dx^2)+(dy^2));
for k = 2:length(path)
    m = find(pontos(:,1) == path(k-1));
    n = find(pontos(:,1) == path(k));
    plot([pontos(m,2) pontos(n,2)],[pontos(m,3) pontos(n,3)], 'm-
', 'LineWidth',1.5);
    d = sqrt(sum((pontos(m,2:3) - pontos(n,2:3)).^2));
    Co = matriz(pontos(m,4),pontos(m,5));
    Cp = matriz(pontos(n,4),pontos(n,5));

    if d == Ext_Lon
        dist_real = dist_real + dx;
        CCop = ((Co+Cp)/2)*dx;
    else
        dist_real = dist_real + dxy;
        CCop = ((Co+Cp)/2)*dxy;
    end
end

```

```

end
CCo = CCop+CCo;
end
xlabel('Longitude');
ylabel('Latitude');
hold off

```

- **Função superficie\_atrito.m:**

```

function [superficie,R_uso_solo] = superficie_atrito(opcao)
% ARQUIVO DE LEITURA DOS CRITÉRIOS.
% 1 - Superfície de atrito de custo;
% 2 - Superfície de atrito método AHP;

AHP = [0.235057605143341,0.157737491914252,0.0295464498792012,...
0.050464016920778,0.0783525350477803,0.0408616712189949,...
-0.0202651724531577,0.0839761677866557,0.00238277821606462,...
0.0114373354371102,0.00428900078891631,0.0382641924545272,...
0.0095660481136318,0.0329208697752994];
Monetario = [4280387.54,482642.55,251784000.00,339627.60,357157.10,...
357157.10,-
10433.80,213200.00,4227.60,126427.60,20867.60,...
106600.00,159900.00,329260.58]*0.09;
AHP_Monetario = AHP.*Monetario;
if opcao==1
    custos = AHP;
elseif opcao==2
    custos = Monetario;
elseif opcao==3
    custos = AHP_Monetario;
end

custo_aeroportos = custos(1);
custo_areas_alagadas = custos(2);
custo_area_urbana = custos(3);
custo_hidrografia = custos(4);
custo_rios_navegaveis = custos(5);
custo_rodovias = custos(6);
custo_sin = custos(7);
custo_unid_cons = custos(8);
custo_us_solo_exposto = custos(9);
custo_us_frag_florest = custos(10);
custo_us_veget_raster = custos(11);
custo_frag_florest = custos(12);
custo_veget_raster = custos(13);
custo_estruturas = custos(14);

%% CRITÉRIO AEROPORTOS:
aeroportos = 'aerodromo.tif';
[matriz_aeroportos,R_aeroportos] = geotiffread(aeroportos);
matriz_aeroportos = double(matriz_aeroportos);
matriz_aeroportos = matriz_aeroportos*custo_aeroportos;

%% CRITÉRIO ÁREAS ALAGADAS:
areas_alagadas = 'alagados.tif';
[matriz_areas_alagadas,R_areas_alagadas] =
geotiffread(areas_alagadas);
matriz_areas_alagadas = double(matriz_areas_alagadas);

```

```

matriz_areas_alagadas = matriz_areas_alagadas*custo_areas_alagadas;

%% CRITÉRIO ÁREA URBANA:
area_urbana = 'area_urbana.tif';
[matriz_area_urbana,R_area_urbana] = geotiffread(area_urbana);
matriz_area_urbana = double(matriz_area_urbana);
matriz_area_urbana = matriz_area_urbana*custo_area_urbana;

%% CRITÉRIO HIDROGRAFIA:
hidrografia = 'rios.tif';
[matriz_hidrografia,R_hidrografia] = geotiffread(hidrografia);
matriz_hidrografia = double(matriz_hidrografia);
matriz_hidrografia(matriz_hidrografia==256)=0;
matriz_hidrografia = matriz_hidrografia*custo_hidrografia;

%% CRITÉRIO RIOS NAVEGÁVEIS:
rios_navegaveis = 'rios_naveg.tif';
[matriz_rios_navegaveis,R_rios_navegaveis] =
geotiffread(rios_navegaveis);
matriz_rios_navegaveis = double(matriz_rios_navegaveis);
matriz_rios_navegaveis = matriz_rios_navegaveis*custo_rios_navegaveis;

%% CRITÉRIO RODOVIAS:
rodovias = 'rodovias.tif';
[matriz_rodovias,R_rodovias] = geotiffread(rodovias);
matriz_rodovias = double(matriz_rodovias);
matriz_rodovias(matriz_rodovias==256)=0;
matriz_rodovias = matriz_rodovias*custo_rodovias;

%% CRITÉRIO SIN:
sin = 'sin.tif';
[matriz_sin,R_sin] = geotiffread(sin);
matriz_sin = double(matriz_sin);
matriz_sin = matriz_sin*custo_sin;

%% CRITÉRIO UNIDADES DE CONSERVAÇÃO:
unid_cons = 'ucas.tif';
[matriz_unid_cons,R_unid_cons] = geotiffread(unid_cons);
matriz_unid_cons = double(matriz_unid_cons);
matriz_unid_cons = matriz_unid_cons*custo_unid_cons;

%% CRITÉRIO USO DO SOLO:
uso_solo = 'uso_solo.tif';
[matriz_uso_solo,R_uso_solo] = geotiffread(uso_solo);
matriz_uso_solo = double(matriz_uso_solo);
matriz_uso_solo(matriz_uso_solo==1)=custo_us_solo_exposto;
matriz_uso_solo(matriz_uso_solo==2)=custo_us_frag_florest;
matriz_uso_solo(matriz_uso_solo==3)=custo_us_veget_raster;

%% CRITÉRIO APP - VEGETAÇÃO RASTEIRA:
veget_raster = 'veget_raster.tif';
[matriz_veget_raster,R_veget_raster] = geotiffread(veget_raster);
matriz_veget_raster = double(matriz_veget_raster);
matriz_veget_raster = matriz_veget_raster*custo_veget_raster;

%% CRITÉRIO APP - FRAGMENTO FLORESTAL:
frag_florest = 'frag_florest.tif';
[matriz_frag_florest,R_frag_florest] = geotiffread(frag_florest);

```

```

matriz_frag_florest = double(matriz_frag_florest);
matriz_frag_florest = matriz_frag_florest*custo_frag_florest;

%% CRITÉRIO ESTRUTURAS:
matriz_estruturas = ones(size(matriz_frag_florest))*custo_estruturas;

%% ENCONTRANDO A SUPERFÍCIE DE ATRITO:

superficie = matriz_aeropostos + matriz_areas_alagadas + ...
    matriz_area_urbana + matriz_hidrografia + matriz_rios_navegaveis +
    ...
    matriz_rodovias + matriz_sin + matriz_unid_cons + matriz_uso_solo
+...
    matriz_veget_raster + matriz_frag_florest + matriz_estruturas;
figure;
geoshow(superficie,R_uso_solo,'DisplayType','surface');
title('superfície');
xlabel('Longitude');
ylabel('Latitude');

end

```

- **Função neighbors.m:**

```

function neighbor_ids = neighbors(pidx,Lmax,Cmax)

    if pidx==1
        neighbor_ids = [pidx+1 , pidx+Lmax+1,...
                        pidx+Lmax];

    elseif pidx==Lmax
        neighbor_ids = [          pidx+Lmax,...
                        pidx-1 , pidx+Lmax-1];

    elseif pidx==Lmax*(Cmax-1)+1
        neighbor_ids = [pidx-Lmax+1 , pidx+1 ,...
                        pidx-Lmax          ];

    elseif pidx==Lmax*Cmax
        neighbor_ids = [pidx-Lmax ,          ...
                        pidx-Lmax-1 , pidx-1];

    elseif pidx>1 && pidx<Lmax
        neighbor_ids = [pidx+1 , pidx+Lmax+1,...
                        pidx+Lmax,...
                        pidx-1 , pidx+Lmax-1];

    elseif pidx>Lmax*(Cmax-1)+1 && pidx<Lmax*Cmax
        neighbor_ids = [pidx-Lmax+1 , pidx+1,...
                        pidx-Lmax          ,...
                        pidx-Lmax-1 , pidx-1];

    elseif rem(pidx,Lmax)==1
        neighbor_ids = [pidx-Lmax+1 , pidx+1 , pidx+Lmax+1,...
                        pidx-Lmax          ,          pidx+Lmax];

```

```
elseif rem(pidx,Lmax)==0
    neighbor_ids = [pidx-Lmax      ,      pidx+Lmax,...
                   pidx-Lmax-1 , pidx-1 , pidx+Lmax-1];

else
    neighbor_ids = [pidx-Lmax+1 , pidx+1 , pidx+Lmax+1,...
                   pidx-Lmax   ,      pidx+Lmax,...
                   pidx-Lmax-1 , pidx-1 , pidx+Lmax-1];
end

end

end
```