

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

Rodolfo Mendes de Lima

Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de
avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas
(SIG)

Itajubá – MG

Junho/2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

Rodolfo Mendes de Lima

Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de
avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas
(SIG)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Planejamento e gestão de sistemas energéticos

Orientador: Prof. Afonso Henriques Moreira Santos, DSc

Itajubá – MG

Junho/2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

Rodolfo Mendes de Lima

Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de
avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas
(SIG)

Dissertação aprovada por banca examinadora em 13 de abril de 2015,
conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia de Energia**.

Banca examinadora:

Dr. Thiago Guilherme Ferreira Prado

Prof. Dr. Anderson Rodrigo de Queiroz

Profa. Dra. Nívea Adriana Dias Pons

Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos

Itajubá – MG

Junho/2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, me dar base e condições de realizar este trabalho.

Agradeço minha família, principalmente meus pais, Floriza e Reginaldo, e minha irmã Fabiane, pelo apoio, essencial não apenas a este trabalho. A Camila, pelo carinho, apoio e incentivo, além de orientações na escrita e revisão dos estudos.

Aos colegas da iX Estudos e Projetos, Reinaldo, Gerson, Barbara, Camilo, Thiago Batista, Thiago Balisa, especialmente a Maíra Dzedzej e Reinis Osis, além de grandes amigos foram essenciais ao desenvolvimento técnico deste trabalho.

Ao professor Afonso Henriques Moreira Santos.

Aos membros da banca, professor Anderson Rodrigo de Queiroz, professora Nívea Adriana Dias Pons e Thiago Guilherme Ferreira Prado.

Às empresas que financiaram o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento PD-2651-0008/2013, do qual faz parte este trabalho, com destaque para Eden Luiz Carvalho, Luiz Czank, Aron Bastos membros da equipe da TBE (Transmissoras Brasileiras de Energia), empresa gestora do projeto, e Leandro Silva, auditor do projeto.

À CAPES pela concessão de bolsa de mestrado.

RESUMO

O Brasil possui cerca de 134 GW de potência instalada relativa aos empreendimentos de geração elétrica em operação e apenas os empreendimentos já outorgados representam um incremento de cerca de 37GW neste valor. Em um horizonte de longo prazo estima-se incremento de cerca de 71 GW de potência instalada de 2013 até 2023. Esta expansão da geração demanda construção de novas linhas de transmissão para interligação dos novos empreendimentos ao SIN (Sistema Interligado Nacional), além da necessidade de reforços de conexões já existentes em função do aumento de carga. Nesse contexto, estima-se um incremento de cerca de 68,8 mil quilômetros de linhas de transmissão de 2013 até 2023. Esta expansão na transmissão, traduzida em investimentos, resulta em cerca de R\$ 50 milhões. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de otimização de traçados de linhas de transmissão (LT) em relação a custos de implantação. Os estudos foram realizados utilizando-se como área piloto uma região do Pará, mais especificamente, local onde se encontra a LT de 230kV Vila do Conde – Castanhal, com 125 km de extensão. A otimização foi feita com a utilização de um conjunto de ferramentas SIG (Sistema de Informações Geográficas) para simulação de rotas de menor custos (*least cost path*) do software QGIS 2.6.0. Foi utilizado um critério técnico de estruturas e mais oito critérios selecionados de acordo com as particularidades do local: aeroportos; áreas alagadas; áreas de preservação permanente; hidrografia; rios navegáveis; sistema interligado nacional, unidades de conservação; uso do solo. Aos critérios foram atribuídos pesos por duas abordagens. A primeira foi a determinação dos custos reais (valores monetários, em R\$/km) de travessia das feições relativas a cada um dos critérios por uma LT com as mesmas características das LT Vila do Conde – Castanhal. A segunda abordagem foi a determinação de pesos pelo método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Devidamente ponderados, os critérios foram integrados por meio de álgebra de mapas e ferramentas *least cost path* foram aplicadas para determinação das rotas otimizadas. Para análise dos resultados obtidos, os pesos determinados pelas duas abordagens foram normalizados em uma mesma escala, o que possibilitou uma comparação entre eles. O conjunto de valores monetários apresentou maior coeficiente de variação de Pearson, o que indicou uma boa representatividade dos critérios com influência muito significativa ao custo de transposição por uma LT. Já os pesos determinados pelo método AHP apresentaram menor faixa de pesos e, por esse motivo, aqueles critérios de importância muito alta não foram tão bem representados. Em relação as rotas geradas, a rota obtida com a utilização de pesos AHP apresentou comprimento total e custo maiores que a rota gerada pelos valores de custo, mas ambas com menor comprimento e custo que a LT Vila do Conde – Castanhal. Isso indica a potencialidade da metodologia de otimização proposta em relação ao método tradicional de definição de traçado, que é realizada pela avaliação manual das feições geográficas mais importantes, sem a utilização de métodos de avaliação multicritério quantitativas e ferramentas SIG mais avançadas.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Sistema de Informações Geográficas, otimização de traçados, avaliação multicritério.

ABSTRACT

Brazil has around 134GW of installed capacity relative to power generation projects in operation and only the granted power plants represent an increase of 37GW in this capacity. In a long-term perspective, it is estimated an increase of about 71GW in the installed power capacity, for the period between 2013 and 2023. This increase demands the construction of new transmission lines (TL) to connect the new power stations to the National Interconnected System (SIN – Sistema Interligado Nacional), in addition to the need of a capacity improvement of existing transmission lines according to the increase of power load. In this context, it is estimated an increase of about 68,8 thousand kilometers of transmission lines from 2013 to 2023. This increment on transmission lines, translated in investment, results in about R\$ 50 millions. Given this scenario, this work aims to develop an optimization methodology for routing transmission lines regarding implantation costs. This study was carried based on a region in Pará state, Brazil, where a transmission line with 125km length is already implemented (TL 230KV Vila do Conde – Castanhal). Routes tracing optimization was made by using least cost path GIS (Geographic Information Systems) tools from QGIS 2.6.0 software and it was applied a technical structural criteria in addition to eight more criteria selected regarding the singularities of the study area, such as airports; wetlands; permanent preservation natural areas; rivers; navigable rivers; existing transmission lines; conservation areas and land use. A weight was set to each criteria using two approaches. The first one was applied through the determination of the real costs (monetary cost, in R\$/km) of crossing the features of each criteria, by a transmission line of 230kV with the same technical features of the Vila do Conde – Castanhal transmission line. The second approach was to weight each criteria through the AHP method. Properly weighted, the criteria were integrated by map algebra and the optimized routes were obtained by the application of least cost path tools. For the analysis of the results, in order to allow the comparison between the weights obtained on both approaches, the weight values were normalized by dividing the weights by the maximum weight value. The set of monetary values presented higher Pearson's coefficient of variation, which indicated a good representation of the criteria with very significant influence at the cost of the TL implementation. On the other hand, the weights determined by the AHP method had a small range, and therefore, the criteria with high importance were not well represented. Regarding the obtained routes, the route generated with the weights retrieved from the AHP method had the length and total cost greater than the route generated by using the real costs values. However, both routes had smaller total cost and length than the Vila do Conde - Castanhal transmission line, indicating the potential of the proposed methodology in comparison to the traditional methodology used to plan transmission line routes, which is made by manual evaluation of the significant geographic features without using quantitative multicriteria evaluation and more advanced SIG tools.

Keywords: Transmission lines, Geographic Information Systems, least cost path, multicriteria evaluation.

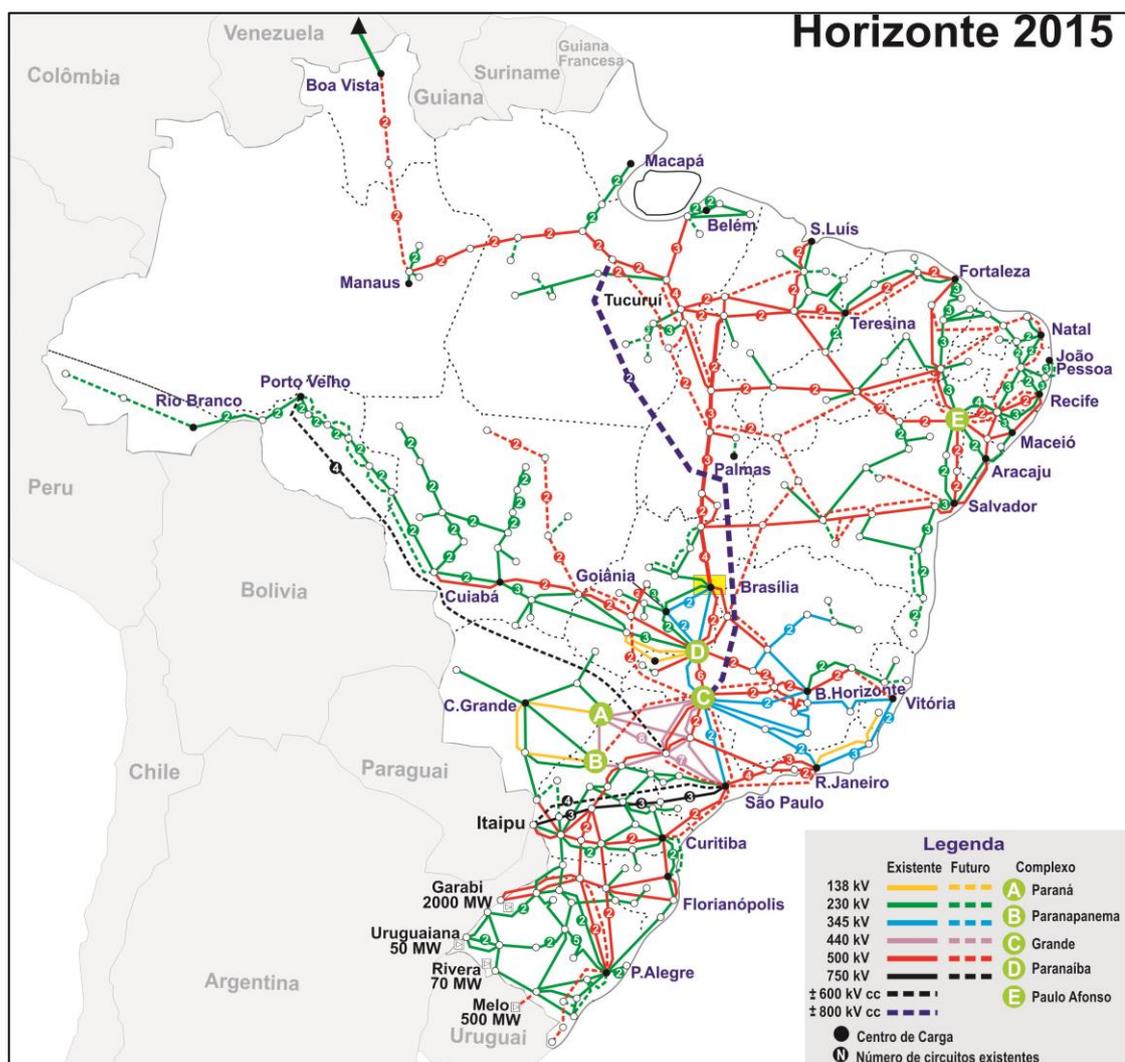
SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Objetivo geral	13
2.2.	Objetivos específicos	13
3.	REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1.	Conceitos básicos em linhas de transmissão	14
3.1.1.	Corrente e tensão	14
3.1.2.	Principais componentes de uma linha de transmissão	15
3.2.	<i>Analytic Hierarchy Process</i> AHP	18
3.2.1.	Aplicação do método	19
3.2.2.	Determinação da inconsistência	22
3.3.	Sistema de Informações Geográficas (SIG)	23
3.4.	Determinação de rotas otimizadas em plataforma SIG – <i>least cost path</i>	25
3.4.1.	Superfície de custo	25
3.4.2.	Superfície de custo acumulado e caminho de menor custo	26
4.	METODOLOGIA	29
4.1.	Critérios: Descrição e aquisição dos dados	32
4.1.1.	Aeroportos	32
4.1.2.	Áreas Alagadas	33
4.1.3.	Hidrografia	35
4.1.4.	Rios navegáveis	36
4.1.5.	Sistema Interligado Nacional	37
4.1.6.	Unidades de Conservação	38
4.1.7.	Áreas de Preservação Permanente	33

4.1.8. Uso do Solo.....	39
4.1.9. Estruturas	40
4.2. Avaliação multicritério: Determinação dos valores monetários e pesos pelo método AHP	40
4.2.1. Determinação dos valores monetários	40
4.2.2. Determinação dos pesos AHP	41
4.3. Otimização de traçado – <i>least-cost-path</i>	43
4.3.1. Obtenção da superfície de rugosidade	43
4.3.2. Determinação dos caminhos de menor custo.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1. Valores monetários	45
5.1.1. Tipos de torres e fundações utilizadas na LT Vila do Conde-Castanhal	45
5.1.2. Estimativa dos custos de implantação de LT por tipo de torre.....	46
5.1.3. Estimativa de custos para os critérios utilizados	47
5.2. Pesos AHP	52
5.3. Comparação dos valores de rugosidade.....	53
5.4. Otimização de traçado - <i>least cost path</i>	55
6. CONCLUSÕES	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
8. ANEXOS	68
8.1. Anexo I: Custo de implantação de fundações ocorrentes na L.T. Vila do Conde-Castanhal.....	68
8.2. Anexo II: Custos de implantação de LT para cada tipo de torre	70

1. INTRODUÇÃO

A geração e distribuição de energia elétrica no Brasil é dividida entre o Sistema Interligado Nacional – SIN (Figura 1) e pequenos sistemas isolados. Estes últimos atendem apenas aproximadamente 1,7% da demanda de energia elétrica do país (ONS, 2015) e são localizados principalmente na região amazônica. O SIN é formado basicamente pelas transformadoras (centrais de geração elétrica, pela transformação de energia de diversas fontes em energia elétrica, por exemplo, as centrais térmicas, hidrelétricas, eólicas, solares e nucleares); pelas linhas de transmissão (LTs), utilizadas para conexão de centrais de geração aos sistemas de distribuição, assim como, para conexão entre sistemas de transmissão; e as redes de distribuição, que distribuem a energia aos consumidores individuais, ou determinadas localidades (KIESSLING et al., 2003).



Fonte: ONS, 2015.

Figura 1: Representação espacial da rede de transmissão do Sistema Interligado Nacional.

De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG), o Brasil possuía em 2015 3.612 empreendimentos de geração elétrica em operação, o que resulta em 134 GW de potência instalada (ANEEL, 2015). A previsão é de que este valor seja incrementado em 37 GW, relativos à conclusão de 202 empreendimentos em construção e mais de 582 outorgados (ANEEL, 2015). O Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 (MME-EPE, 2014) indica que serão agregados ao SIN cerca de 71 GW de potência instalada para o horizonte decenal de 2013 a 2023. Neste cenário, apenas a região Norte e Nordeste são responsáveis por 30,5 GW e 20,1 GW respectivamente, enquanto que a região Sudeste/Centro Oeste e Sul são responsáveis por 14,0 GW e 6,4 GW respectivamente. Esta expansão da geração demanda a construção de novas linhas de transmissão para interligação dos novos empreendimentos ao SIN. Além disso, o aumento do consumo energético, diretamente relacionado ao crescimento econômico, também demanda reforços de trechos onde já existe interligação.

Nesse contexto, apenas no mês de dezembro de 2014 foram incorporadas 915 km de linhas de transmissão ao SIN. Para 2015 tem-se a previsão de entrada em operação de cerca de 11.000 km de linhas e mais 13.000 km em 2016 (MME, 2014). Considerando um cenário de longo prazo (MME-EPE, 2014) estima-se incremento de cerca de 69,8 mil quilômetros de linhas de transmissão e aumento de 162,9 MVA na capacidade de transformação (subestações) até 2023, considerando o cenário inicial para o ano de 2013, com 112,6 mil quilômetros de linhas e 288,9 MVA de capacidade de transformação. Esta evolução física do sistema, traduzida em investimentos, resulta em R\$49,8 bilhões em linhas de transmissão e mais R\$28,2 bilhões em subestações (MME-EPE, 2014). Esta expansão, é claro, reflete na evolução dos leilões de transmissão dos últimos anos. A oferta cresceu de uma média de 10 lotes por ano, até 2008, para 32 lotes por ano, em 2013 e 2014 (ANEEL, 2015).

De acordo com EPE (2005) o planejamento da expansão da transmissão, novas linhas e subestações, se inicia com uma fase preliminar, em que o novo empreendimento ou ampliação é identificado como melhor alternativa e é incorporada ao Plano Decenal de Expansão de Energia, elaborado pela EPE. Este planejamento preliminar sofre revisões cíclicas e um empreendimento pode sofrer modificações ou mesmo ser substituído em função de alterações no programa de geração, mercado ou por outros motivos. Entretanto, quando um empreendimento tem data de entrada em operação recomendada três anos à frente inicia-se o preparo de documentação para processo de outorga. O processo de documentação passa por quatro fases, em que os resultados são consolidados em quatro relatórios, elaborados pela EPE, que dão subsídio para que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) realize o processo

licitatório dos novos empreendimentos para expansão do SIN. Esses relatórios são disponibilizados nos leilões de transmissão, a saber: O R1 que corresponde ao estudo de viabilidade técnico-econômica e socioambiental, com demonstração de competitividade frente a outras alternativas, estabelecimento de características básicas preliminares das instalações do empreendimento e expectativas de custo. A partir de uma análise regional com utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) são identificadas áreas mais favoráveis considerando as particularidades da área de estudo, como unidades de conservação, terras indígenas, núcleos urbanos, florestas e outros aspectos importantes, tanto do ponto de vista socioambiental quanto econômico-constructivo. Esta avaliação é feita para alternativas de corredor com largura de 10 a 20km, cujos resultados deverão subsidiar os próximos relatórios, em que estudos mais detalhados são realizados; O R2, que traz resultados do detalhamento técnico da alternativa de referência. O propósito da documentação desta fase é dar suporte à ANEEL na elaboração das características técnicas das novas instalações da Rede Básica para os processos de licitação de concessão; O R3, relativo a caracterização e análise socioambiental do corredor selecionado para o empreendimento. Este relatório deve conter resultado das avaliações socioambientais preliminares do corredor de passagem proposto e avaliações *in loco*, identificando uma diretriz preferencial para o traçado da LT, do ponto de vista econômico, socioambiental e constructivo; Por fim, o R4, com a definição dos requisitos do sistema circunvizinho de forma a se assegurar uma operação harmoniosa entre a nova obra e as instalações existentes.

Em face a este cenário de amplo crescimento e montante significativo de investimentos previstos, o desenvolvimento de novas ferramentas de planejamento de traçado que envolvam a utilização de ferramentas SIG em conjunto com métodos de avaliação multicritério podem gerar economias significativas, além de auxiliar o complexo processo de planejamento dos novos empreendimentos de transmissão até o processo licitatório e posterior implantação pelas transmissoras. Destaca-se aqui o índice de vazios no últimos leilões de transmissão, ou seja lotes que não demonstraram atratividade suficiente em função particularidades técnicas e socioambientais. Dos 34 lotes dos leilões realizados em 2014 apenas 14 foram arrematados (ANEEL, 2015). Segundo Bitencourt (2015), em nota publicada no jornal Valor Econômico “...O diagnóstico dos técnicos da agência identificou dificuldades de licenciamento ambiental e desapropriação de terras para construção das linhas como fatores que têm pesado contra a atratividade dos projetos...”. Nesse contexto, a utilização de novas ferramentas de planejamento podem auxiliar a ANEEL a retornar um cenário mais favorável para licitações.

Diante do exposto, um estudo de otimização de traçado de linhas de transmissão foi realizado, utilizando como área piloto a região onde se localiza uma linha de transmissão de 230kV, denominada Vila do Conde-Castanhal, situada no estado do Pará, Brasil. A escolha da área piloto justifica-se pela região norte concentrar o maior crescimento na geração, que de acordo com o último plano decenal (MME-EPE, 2014) a região norte será responsável por cerca de 43% do incremento de potência instalada nacional no período de 2013 a 2023. O que conseqüentemente irá demandar novas instalações de transmissão. A metodologia proposta neste trabalho teve como base a utilização de ferramentas SIG, que possibilitam análise e tratamento de dados espaciais, e duas metodologias de avaliação multicritério para ponderar os critérios utilizados. A primeira foi o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) proposto por Saaty (1987), escolhido por sua eficiência na determinação de pesos de múltiplos critérios por comparações pareadas e praticidade de aplicação. A segunda foi a determinação dos valores monetários de cada um dos critérios utilizados, possibilitando uma “aferição” do método AHP para fins de otimização de traçado de linhas de transmissão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Desenvolvimento de uma metodologia para otimização de traçados de linhas de transmissão do ponto de vista econômico, com objetivo na redução de custos de implantação, utilizando ferramentas SIG e avaliação multicritério.

2.2. Objetivos específicos

- Determinação de custos (valores monetários) de implantação de uma linha de transmissão de 230kV com as mesmas características da LT Vila do Conde Castanhal em condições ideais e determinação do custo adicional de transposição de feições relativas a oito critérios estabelecidos (aeroportos, áreas alagadas, áreas de preservação permanente, hidrografia, rios navegáveis, sistema interligado nacional, unidades de conservação, e uso do solo). A determinação dos critérios foi feita considerando as particularidades da área piloto definida para o desenvolvimento e consolidação da metodologia;
- Aplicação do método AHP para ponderação dos critérios estabelecidos;
- Aplicação de ferramentas SIG de otimização de traçado valendo-se de duas superfícies de rugosidade, sendo uma com a utilização de valores monetários e outra com pesos obtidos pelo método AHP;
- Comparação dos resultados obtidos pelas duas metodologias de avaliação multicritério;
- Comparação das rotas geradas em relação a LT Vila do Conde –Castanhal.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Este tópico aborda os principais aspectos teóricos relativos a metodologia de otimização de traçados de linhas de transmissão (LT) proposta. No primeiro item da revisão, “Conceitos básicos em linhas de transmissão”, é feita uma descrição básica de uma LT e seus componentes básicos. A compreensão dos elementos de uma LT, como tipos de torres, fundações e cabos condutores, é importante na determinação dos custos de travessia das diferentes feições geográficas relativas as particularidades fisiográficas, ambientais e socioeconômicas da área de estudo, como hidrografia, áreas urbanas e unidades de conservação. Isso porque, cada uma dessas particularidades exige um determinado tipo de torre e fundação. Por exemplo, a travessia de um trecho extenso de hidrografia deve ser feita com utilização de torres mais reforçadas, e algumas vezes com cabos mais reforçados em função da largura de vão. É possível citar ainda a travessia de áreas florestais de grande importância ecológica pode ser feita com torres mais altas para reduzir a largura da faixa de limpeza, o que reduz conseqüentemente a área desmatada. Além disso, estas informações são importantes na ponderação dos critérios estabelecidos, assunto abordado no segundo item da revisão da literatura, “*Analytic Hierarchy Process AHP*”, em que são apresentados os aspectos teóricos do método, assim como justificava de escolha do AHP para poderão dos critérios. O terceiro item da revisão da literatura trata de aspectos básicos sobre Sistema de Informações Geográficas (SIG), já que a otimização de traçados foi realizada com a utilização de ferramentas *least cost path* do SIG QGIS 2.6.0, tópico apresentado no último item da revisão da literatura: “Determinação de rotas otimizadas em plataforma SIG – *least cost path*”.

3.1. Conceitos básicos em linhas de transmissão

3.1.1. Corrente e tensão

As primeiras descobertas e aplicações da eletricidade se deram pela utilização de corrente contínua. A primeira estação elétrica no mundo, construída por Thomas A. Edison, com operação iniciada em 1882, fornecia corrente contínua em 110V e atendia uma área de aproximadamente 1,6km de raio em Manhattan. Mas, com o advento dos circuitos polifásicos, do transformador e do motor de indução nos anos 1880 e 1890 foi possível implantar o sistema elétrico de potência em corrente alternada. Algumas vantagens dos sistemas de corrente alternada fizeram com que sistemas de potência elétrica de corrente alternada se tornassem predominantes. Os transformadores, simples e eficientes, tornaram possível a utilização de

diferentes níveis de tensão para geração, transmissão, distribuição e uso final, além da utilização de alta tensão para longas distâncias. O motor de indução, principalmente o motor de indução polifásico, é mais simples, robusto e de menor custo que os comutadores de motores de corrente contínua, além das maiores necessidades de manutenção, os motores de corrente contínua possuem limitações na tensão e velocidade. São máquinas de baixa velocidade e mais pesadas e, conseqüentemente, de custo mais elevado em relação às máquinas de corrente alternada. Aliado ao advento das turbinas a vapor, que trabalham em altas velocidades, os geradores de corrente alternada tornaram-se mais vantajosos (ASPECTOS..., 200-?).

Para corrente alternada deve-se considerar a frequência de operação, que indica quantos ciclos a corrente elétrica completa em um segundo. As primeiras empresas de eletricidade no Brasil funcionavam de acordo com a frequência das máquinas importadas, as máquinas provenientes da Alemanha funcionavam em 50Hz, e as americanas em 60Hz (CUNHA, 2010). De acordo com o mesmo autor, esta diferença é explicada pelo fato de que os europeus tem como base o sistema métrico, já os americanos tomaram como base o sistema do tempo sexagesimal. No Brasil, a energia elétrica é fornecida em 60Hz, destacando-se o caso da usina hidrelétrica de Itaipu que opera em 50Hz, referente à parte paraguaia e 60Hz à parte brasileira. O excedente de energia gerada pela parte paraguaia, exportada ao Brasil, é convertida e transmitida em corrente contínua, e, posteriormente é convertida em corrente alternada em frequência de 60Hz (CUNHA, 2010).

A tensão de uma LT é determinada de acordo com a potência a ser transmitida para uma determinada área a ser suprida. A energia é transmitida em níveis elevados de tensão, que é justificado pela capacidade de transmissão de uma linha, que aumenta proporcionalmente ao quadrado da tensão (KIESSLING et al., 2003). No Brasil são consideradas tensões de transmissão valores acima de 230kV, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL n° 67 de 2004 (ANEEL, 2004).

3.1.2. Principais componentes de uma linha de transmissão

Uma LT é composta basicamente de torres, cabos condutores, cadeias de isoladores e ancoragem, estes últimos com a função de fixação e estabilização dos condutores nas torres. Diversos são os tipos de torres, fundação, e demais componentes de uma linha de transmissão, que são dimensionados de acordo com as características elétricas como tensão, potência, e também características locais como relevo, estabilidade do solo, presença de nível de água superficial, dentre outras características. A seguir, tem-se a descrição mais detalhada dos principais componentes.

3.1.2.1. Cabos condutores

A determinação do tipo de condutor a ser utilizado e o dimensionamento é feito objetivando-se a redução de perdas de energia, por efeito Joule ou por Corona, como também para controlar os níveis de rádio interferência e ruídos acústicos. Além disso, outros critérios devem ser considerados, por exemplo, variações das condições ambientais, como temperatura, em que reduções na mesma ocasionam aumento de tração em razão da redução de comprimento; vento, que induz vibrações que podem provocar ruptura por fadiga nos ponto de fixação; temperatura de operação, importante para escolha do material que suportem maiores temperaturas com baixas perdas de resistência mecânica (LABEGALINI et al., 1992).

A maioria dos cabos condutores são compostos de diversos fios, e esta configuração torna os condutores mais flexíveis e resistentes quando comparados a condutores de apenas um fio e mesma área de seção transversal (GROSS,1969; FUCHS E ALMEIDA, 1982). Mais de um material pode ser utilizado na confecção do cabos, a fim de estabelecer uma relação ideal entre peso e resistência mecânica. O alumínio se estabeleceu como o principal material utilizado em linhas de transmissão, principalmente em altas tensões e extra elevadas. A menor resistência do alumínio à tração foi compensada pela utilização de filamentos de aço galvanizado nos cabos, e, a menor resistência a corrosão, pela ação de agentes químicos presentes na atmosfera de regiões poluídas, foi compensada com uso de ligas de alumínio mais resistentes. Já a maior resistividade elétrica é compensada pelo menor peso específico e menor preço, o que permite a utilização de seções maiores (FUCHS E ALMEIDA, 1982).

3.1.2.2. Isoladores

Os condutores precisam ser isolados eletricamente de seus suportes, o que é feito por meio de elementos confeccionados em material dielétrico, denominados isoladores. Geralmente são fabricados em porcelana vitrificada, vidro temperado ou material sintético composto. A quantidade de isoladores a ser utilizada em uma linha de transmissão é determinada a partir da tensão da linha e nível de descargas atmosféricas da região (LABEGALINI et al., 1992).

As cadeias de isoladores são utilizadas em conjunto com outras peças, essas, com a função de suporte dos cabos aos isoladores e fixação do conjunto às torres. São divididas em cadeias de ancoragem e cadeias de suspensão. As cadeias de suspensão suportam, basicamente, o peso dos cabos, transmitindo os esforços às estruturas de suporte. Já as cadeias de ancoragem devem suportar todos os esforços transmitidos axialmente pelos cabos em quaisquer condições de solicitação (LABEGALINI et al., 1992).

3.1.2.3. Estruturas ou suportes (torres)

As estruturas de uma linha de transmissão são elementos de sustentação mecânica dos cabos condutores. São responsáveis pela manutenção das distâncias de segurança entre os cabos e entre os cabos e o solo. Existem vários tipos de torres que podem ser classificadas de acordo com sua função estrutural, forma de resistir os esforços, e materiais utilizados (LABEGALINI et al., 1992).

Em relação a função estrutural, podem ser divididas, basicamente, em torres de suspensão e ancoragem. As torres de suspensão são dimensionadas para condições normais de operação e para resistir aos esforços verticais relativos ao peso dos cabos, isoladores e ferragens. Esse é o tipo de estrutura predominantemente empregada em linhas de transmissão e são os suportes menos reforçados em uma linha. Já as torres de ancoragem tem a função de resistir unilateralmente aos esforços decorrentes do tensionamento dos cabos durante a montagem ou após a ruptura de algum deles e, também, são utilizadas em pontos finais e terminais de uma LT e em locais com ângulos relativamente elevados. Estes são os suportes mais reforçados de uma linha, já que são os mais solicitados.

Quanto à forma que as estruturas são projetadas para serem sustentadas ao solo, destacam-se dois grupos, as estruturas autoportantes e as estaiadas. As estruturas autoportantes são dimensionadas para transmitir todos os esforços ao solo por meio de suas fundações. Já nas estruturas estaiadas são utilizados tirantes ou estais para absorver os esforços horizontais transversais e longitudinais. São estruturas com boa aceitação em função da confiabilidade apresentada, o que permite uma redução nas dimensões das estruturas. Mas, é importante destacar que esse tipo de estrutura exige maior espaço para os estais nas faixas de servidão, representam também uma limitação ao uso do solo, quando utilizadas em faixas de servidão administrativa. Além disso, exigem terrenos de topografia favorável à implantação dos estais (LABEGALINI, et al., 1992).

Em relação aos materiais, podem ser utilizados metais, geralmente aço carbono ou ligas de alumínio, concreto armado ou madeira. A opção de torres treliçadas é uma solução bastante versátil e, praticamente, qualquer problema de altura, disposição, carregamento, distanciamento de cabos e equipamentos, são de fácil solução e sempre há uma estrutura a ser utilizada para absorção e transmissão das cargas mecânicas que deve suportar (LABEGALINI, et al., 1992).

3.1.2.4. Fundações

Geralmente o tipo de terreno ao longo de uma linha de transmissão varia de forma considerável. São as características do solo onde serão implantadas as torres de uma linha de

transmissão que determinam o tipo de fundação a ser utilizada. Fuchs e Almeida (1982) afirmam que em projetos de estruturas há uma liberdade de escolha de muitos materiais para as torres, mas, projetos de fundações são limitados as condições do terreno onde foram locadas as estruturas. As fundações mais utilizadas são os tubulões, sapatas de concreto, fundações estacadas e ancoragem em rocha.

Os tubulões são fundações indicadas para terrenos argilosos, siltosos ou arenosos, com resistência crescente com a profundidade e que permitam escavação a céu aberto. Possuem dimensões de 3 a 10 metros de comprimento, e variam de 70 a 120 cm de diâmetro, confeccionadas de concreto estrutural (LABEGALINI et al., 1992). As sapatas em concreto são feitas em concreto armado a profundidade máxima de 3 metros, em terrenos de baixa resistência mecânica a compressão, devido à dificuldade de escavação mais profunda, não devendo ser utilizada em locais sujeitos à erosão (ASHCAR, 1999; LABEGALINI et al., 1992). Fundações estacadas são indicadas para terrenos de baixa resistência, como regiões pantanosas, alagadas, mangues, dentre outras. As estacas são geralmente fabricadas em concreto armado com diâmetro mínimo de 30 centímetros, mas podem ser metálicas ou em madeira. (LABEGALINI et al., 1992). A ancoragem em rocha é utilizada em locais de afloramentos ou pequenas profundidades de rocha sã ou em decomposição, em locais de impossível escavação sem auxílio de explosivos. Em casos de afloramentos de rocha sã são utilizados chumbadores ou buchas de fixação instalados em furos abertos por equipamento específico. Em certos casos é feita regularização superficial da rocha com uso de concreto de alta resistência. Já nos casos de afloramentos de rocha em decomposição são utilizados chumbadores longos, fixos a blocos de ancoragem, que suportam arranques de espera para os pés das estruturas (LABEGALINI et al., 1992).

3.2. *Analytic Hierarchy Process AHP*

Existem diversos métodos desenvolvidos para resolver problemas de decisão com múltiplos critérios, como ELECTRE (ROY, 1991), TOPSIS, *Simple Additive Weighting – SAW* (HWANG & YOON, *apud* ZANAKIS *et al.*, 1998), AHP (SAATY, 1987) e ANP (SAATY, 1999). Todos esses utilizam como base os pesos dos critérios, utilizados para avaliar o nível de preferência de uma série de alternativas para as quais os critérios selecionados possuem influência. Os métodos AHP e ANP possuem uma forma mais elaborada para determinação dos pesos dos critérios pelo tomador de decisões (comparações pareadas), enquanto que nos outros métodos os pesos são determinados previamente, de forma direta, pelo tomador de decisões e, então, a preferência das alternativas é determinada. Assim, para este trabalho será utilizado e

discutido apenas o método AHP, uma vez que é de interesse apenas a determinação dos pesos dos critérios utilizados para os estudos de otimização de traçado de linhas de transmissão e, neste sentido, o AHP se mostrou o método mais adequado em função da praticidade e eficiência da determinação dos pesos, o que será detalhado adiante.

O AHP é uma teoria geral para mensurar a dominância ou preferência de elementos em relação a um objetivo geral, com base em comparações pareadas. Essas comparações podem ser feitas por medidas reais ou por meio de uma escala fundamental que reflete a importância relativa das preferências e percepções. Esta metodologia pode ser utilizada para colocar em escala elementos de uma mesma estrutura hierárquica, com elementos independentes entre si em cada nível (SAATY, 1994; SAATY, 1987). Uma das utilidades de uma hierarquia é que ela permite efetuar julgamentos focados separadamente em cada uma das diversas variáveis e a forma mais efetiva para isso é julgar pares de elementos em relação a uma única propriedade, sem preocupação com outras propriedades ou elementos. É por esta razão que comparações pareadas, associadas a estruturas hierárquicas, são tão úteis para mensurar a preferência de alternativas em relação a um objetivo (SAATY, 1990b).

O AHP tem sido utilizado em diversas aplicações relacionadas com tomada de decisão. Vaidya e Kumar (2006), em artigo de revisão sobre aplicação do AHP, citam 150 artigos relacionados. Os autores citam diversas aplicações do AHP, nas áreas de engenharia, educação, política, indústria, governo, medicina, dentre outras, para planejamento e desenvolvimento, alocação, ranqueamento, tomada de decisão, etc. Em relação ao planejamento de linhas de transmissão, vários estudos utilizam AHP como método de avaliação multicritério em conjunto com ferramentas SIG para obtenção de caminhos otimizados (DEDEMEN, 2013; HUSAIN et al., 2012a; HUSAIN et al., 2012b; HOSSEINI & BAHMANI, 2011; SCHMIDT, 2009).

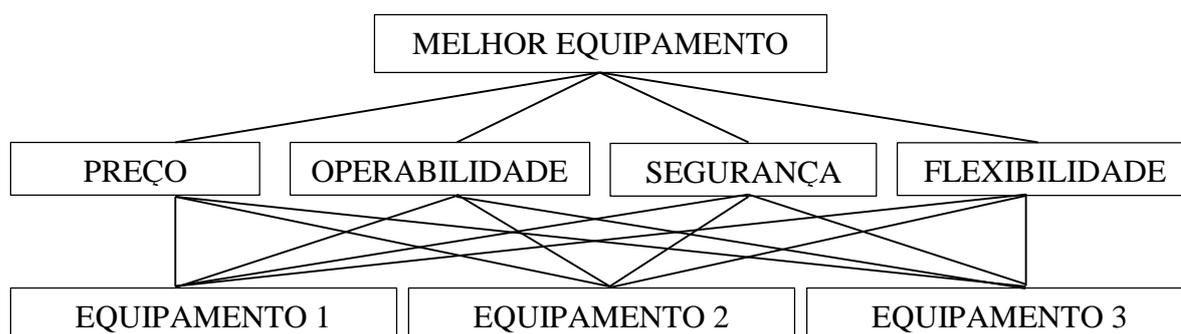
3.2.1. Aplicação do método

Adamcsek (2008) descreve quatro principais axiomas, em que os três primeiros, originalmente, serviram de base para o desenvolvimento do AHP. O primeiro, reciprocidade, requer que, se $P_C(A,B)$ é o valor dado à comparação pareada dos elementos A e B, representando quanto o elemento A é mais importante que o elemento B, relativamente ao objetivo geral definido, então $P_C(B,A) = 1/P_C(A,B)$. O segundo axioma, homogeneidade, estabelece que os elementos comparados não podem ter diferença significativa entre eles. Na construção de uma hierarquia, deve-se tentar organizar os elementos em conjuntos de modo que eles não sejam diferentes em mais de uma ordem de magnitude. O terceiro, síntese, estabelece que julgamentos de prioridades de elementos em uma hierarquia não dependem de elementos

de níveis mais baixos. Um quarto axioma, expectativa, foi introduzido posteriormente e estabelece que resultados de prioridades não podem ser radicalmente diferentes de qualquer conhecimento prévio ou expectativa que o avaliador possua.

3.2.1.1. Organização do problema em uma estrutura de hierarquias

Em geral, um modelo hierárquico possui um objetivo geral ou foco, este, dependente de critérios que por sua vez possuem subcritérios e, por último na estrutura hierárquica, as alternativas a serem escolhidas (SAATY, 1994; SAATY, 1987). Este é o primeiro passo para a aplicação do AHP. Como exemplo, tem-se a estrutura definida para escolha de novo equipamento para uma indústria (Figura 2) em que o objetivo principal é a escolha do melhor equipamento em relação ao preço, operabilidade, segurança e flexibilidade. Ou seja, podemos dizer que o foco, ou objetivo, é a determinação do equipamento com a melhor relação custo/benefício. O segundo nível de hierarquia neste exemplo são os equipamentos selecionados para a escolha.



Fonte: Adamcsek, 2008.

Figura 2: Modelo simples de modelo AHP para alternativas de compra de equipamento.

Esta estrutura básica permite que as dependências entre os elementos sejam apenas entre os níveis de hierarquia e, conseqüentemente, os elementos de um determinado nível devem ser mutuamente independentes (ADAMCSEK, 2008). Destaca-se que, para este trabalho, como o AHP foi utilizado apenas para determinação de pesos de critérios influentes na otimização de traçados de linhas de transmissão (otimização do ponto de vista econômico), esta etapa não se aplica, já que se tem, neste caso, apenas um nível de hierarquia que são apenas os critérios e, também, as alternativas são ausentes neste caso.

3.2.1.2. Comparações pareadas e determinação dos pesos

A segunda etapa é estabelecer as prioridades, ou determinação dos pesos dos critérios em cada nível de hierarquia. Isso é feito por meio de comparações pareadas, primeiro entre os pares de critérios e posteriormente com os pares de alternativas em relação a cada um dos critérios. As comparações são feitas com base na importância relativa ao objetivo geral para os critérios e relativa a cada um dos critérios quando se avaliam as alternativas (ADAMCSEK, 2008).

Os julgamentos são baseados em uma escala de importância (Tabela 1) e, de acordo com Saaty (1990b), a eficácia desta escala foi validada, não apenas por meio de aplicações com um grande número de pessoas, mas também por meio de comparações teóricas com outras escalas.

Tabela 1: Escala fundamental para comparações pareadas.

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

Fonte: Saaty, 1990a.

Como exemplo, tem-se uma matriz de comparação pareada para quatro critérios fictícios utilizados para otimização de traçado de uma linha de transmissão (Tabela 2). Cada um dos critérios é avaliado em relação ao seu nível de importância em relação ao objetivo geral, que poderia ser a implantação de uma linha de menor custo. Nota-se que os valores da diagonal da matriz são unitários, isso porque um critério em relação a ele mesmo deve ter importância igual. A determinação do peso de cada um dos critérios pode ser feita pela aplicação de mais de um método, como o método do autovalor (Saaty, 1990a *apud* Adamcsek, 2008), método dos mínimos quadrados (SAATY & VARGAS, 1984), método logarítmico dos mínimos quadrados (SAATY, 1990a). Destaca-se a praticidade do método logarítmico dos mínimos quadrados em que cada elemento do vetor de pesos é obtido pela média geométrica dos elementos de cada linha da matriz de comparações pareadas e os valores encontrados para os critérios são normalizados pelo somatório dos pesos dos critérios (Tabela 2).

Tabela 2: Matriz de comparação pareada para critérios relativos à compra de equipamento.

	SOLO	VEGETAÇÃO	ÁREA URBANA	RELEVO
SOLO	1	1/3	5	1
VEGETAÇÃO	3	1	5	1
ÁREA URBANA	1/5	1/5	1	1/5
RELEVO	1	1	5	1
PESO FINAL	0,232	0,402	0,061	0,305

Fonte: adaptado de Adamcsek (2008).

3.2.2. Determinação da inconsistência

Uma questão importante no método AHP é a consistência dos pesos obtidos pela matriz de comparação pareada. Supondo que já se conheça os pesos de cada critério: $w_1; w_2; \dots; w_n$, pode-se assumir então que $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, e a matriz de comparação pareada é denominada matriz consistente, expressa como (Equação 1):

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & 1 & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{Equação 1}$$

Note que $\forall i, j, k: w_{ij} = \frac{1}{w_{ji}}$ e $w_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \frac{w_i w_k}{w_k w_j} = w_{i,k} w_{k,j}$

Mas quando se compara critérios para os quais não existe uma escala ou medida estabelecida, uma vez que os critérios estão envolvidos em mais de uma comparação e os valores são atribuídos com base em julgamentos, inconsistências podem ocorrer (SAATY, 1987). Neste sentido, em julgamentos humanos, a condição $w_{ij} = w_{i,k} w_{k,j}$ não é satisfeita e o autovalor encontrado não é igual a ordem da matriz (n). O índice de consistência (C.I. – *Consistency Index*) é então determinado por (SAATY, 1987): $C.I. = \left(\frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n-1} \right)$.

De forma a estabelecer valores aceitáveis para o índice de consistência, Saaty (1987) estabeleceu índices médios de consistência aleatória (R.I. – *Random Consistency Index*) para diversos valores de ordem da matriz de comparação pareada (Tabela 3)

Tabela 3: Índices médios de consistência aleatória.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R.I.	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57

Fonte: Adamcsek (2008).

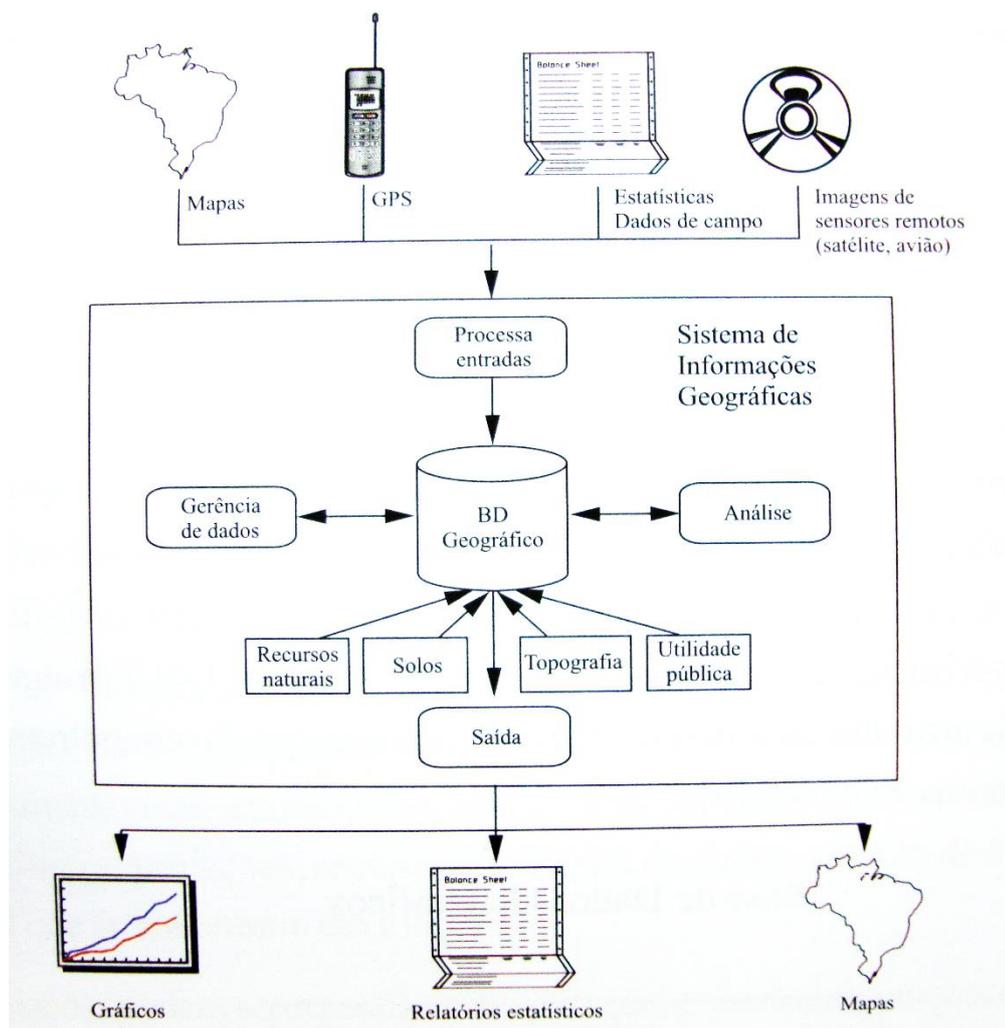
A partir dos valores de R.I. é possível obter a razão de consistência (C.I./R.I.), e este valor deve ser menor que 10%, caso contrário a avaliação deve ser revista (SAATY, 1987).

3.3. Sistema de Informações Geográficas (SIG)

De acordo com Câmara e Queiroz (2001), o termo Sistema de Informações Geográficas pode ser aplicado para sistemas capazes de realizar tratamento computacional de dados geográficos, extraindo informações não apenas das características alfanuméricas dos dados, mas também, considerando a localização espacial. A princípio, o leitor poderia pensar que um SIG só passou a existir com o advento do computador, mas, Miranda (2005) afirma que tais sistemas já existiam bem antes do surgimento do primeiro computador e os SIGs evoluíram a partir de séculos de produções de mapas e da compilação de registros geográficos. De acordo com o autor, os romanos já empregavam o conceito de registro de propriedades, no *capitum registra* (registro de terra) e, em muitos países o, termo cadastro designa o registro de mapas e propriedades.

Neste sentido, Miranda (2005) define um ambiente SIG (Fonte: Miranda, 2005

Figura 3) atual como aquele que tem componentes de informática, módulos de programas de aplicação e recursos humanos. Como componentes de informática, destacam-se os equipamentos de entrada como GPS, mesas digitalizadoras; equipamentos para processamento, neste caso os computadores; e equipamentos de saída são impressoras e monitores. Os módulos de programas de aplicação são softwares e aplicações implementadas em ambiente computacional para tratamento e análise dos dados espaciais, gerando produtos como mapas, planilhas, gráficos e outros tipos de informação. Já o recurso humano é responsável por definir projetos, implementar, usar e prestar assistência ao SIG, o que demanda pessoas treinadas e conhecedoras das funcionalidades do sistema.



Fonte: Miranda, 2005

Figura 3: Configuração básica de um SIG.

Para este trabalho a maior ênfase se dá aos softwares e a aplicações implementadas em ambiente computacional, utilizados para tratamento e análise das informações geográficas para gerar os produtos desejados. Existem diversos softwares SIG disponíveis, pagos ou gratuitos, com destaque para o ArcGIS, IDRISI, Global Mapper, como softwares pagos e SPRING e QuantumGIS como gratuitos, em que este último foi utilizado para todas análises e tratamento de dados espaciais deste trabalho.

A representação espacial dos dados nestes softwares pode ser feita basicamente de duas formas: Por arquivos no formato matricial (*raster*) e por arquivos no formato vetorial.

O arquivos *raster* são formados por uma matriz de pixels (ou células), de dimensões definidas, em que cada pixel possui um único valor numérico que representa uma condição da área coberta por essa célula, por exemplo a topografia de uma determinada região pode ser representa por um arquivo *raster* em que cada pixel possui um valor de cota correspondente a

cota média para a área daquele pixel. A dimensão dos pixels é denominada resolução espacial, e indica o valor do comprimento das arestas dos pixels. O modelo matricial apresenta certos problemas, como restrições decorrentes de uma representação discreta das informações espaciais e certa imprecisão na representação dos limites de feições geográficas.

A representação vetorial surge como solução a estes dois problemas em que as informações são representadas por elementos com sua própria geometria de pontos, linhas e polígonos, permitindo que todas as posições, comprimentos e dimensões possam ser definidas exatamente (MIRANDA, 2005).

Além disso, outras informações podem ser associadas a cada elementos vetorial, na forma de atributos, como por exemplo, um arquivo vetorial com a representação dos municípios brasileiros pode conter diferentes atributos para armazenar os nomes dos municípios, área, população, PIB e outras informações pertinentes.

3.4. Determinação de rotas otimizadas em plataforma SIG – *least cost path*

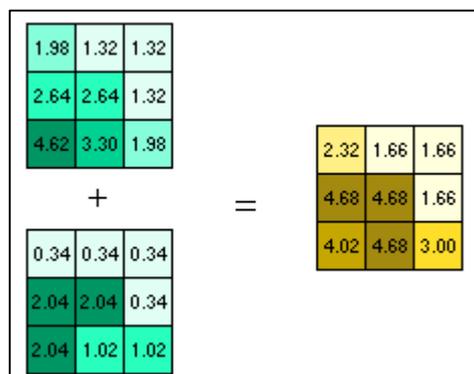
A determinação de rotas otimizadas, ou rotas de menor custo, é uma aplicação comumente utilizada em sistemas de informações geográficas (SIG). Há diversas aplicações como: na identificação de corredores de migração e dispersão (Hailong Li *et al.*, 2010; LaRue e Nielsen, 2008); roteamento de linhas de transmissão (Monteiro *et al.*, 2005; Schmidt, 2009) com objetivo de redução de impactos ambientais (Bagli *et al.*, 2011); determinação de traçados de estradas (Atkinson *et al.*, 2005), dentre outras aplicações.

A metodologia mais largamente empregada nos softwares SIG comerciais para determinação de rotas otimizadas (*least cost path*) é dividida, basicamente, em três etapas: confecção de uma superfície de custo, determinação de uma superfície de custo acumulado e determinação do caminho de menor custo.

3.4.1. Superfície de custo

A superfície de custo pode ser definida como uma matriz (arquivo no formato *raster*, nas extensões *.tif* ou *.img*, por exemplo) cujos valores associados a cada célula são utilizados como pesos para cálculo do caminho de menor custo. Os valores de custo associados a cada célula representam a resistência, fricção ou dificuldade para travessia das células e podem expressar custo monetário, tempo, distância, risco ou outros aspectos, dependendo do tipo de estudo para o qual é aplicada tal técnica (COLLISCHONN e PILAR, 2000). Destaca-se que a superfície de custo pode incluir diversos critérios, em que diversas superfícies preliminares são

integradas em uma única superfície, por meio da utilização de álgebra de mapas que consiste, basicamente, na operação de matrizes com diferentes informações relativas a uma mesma área (Figura 4).

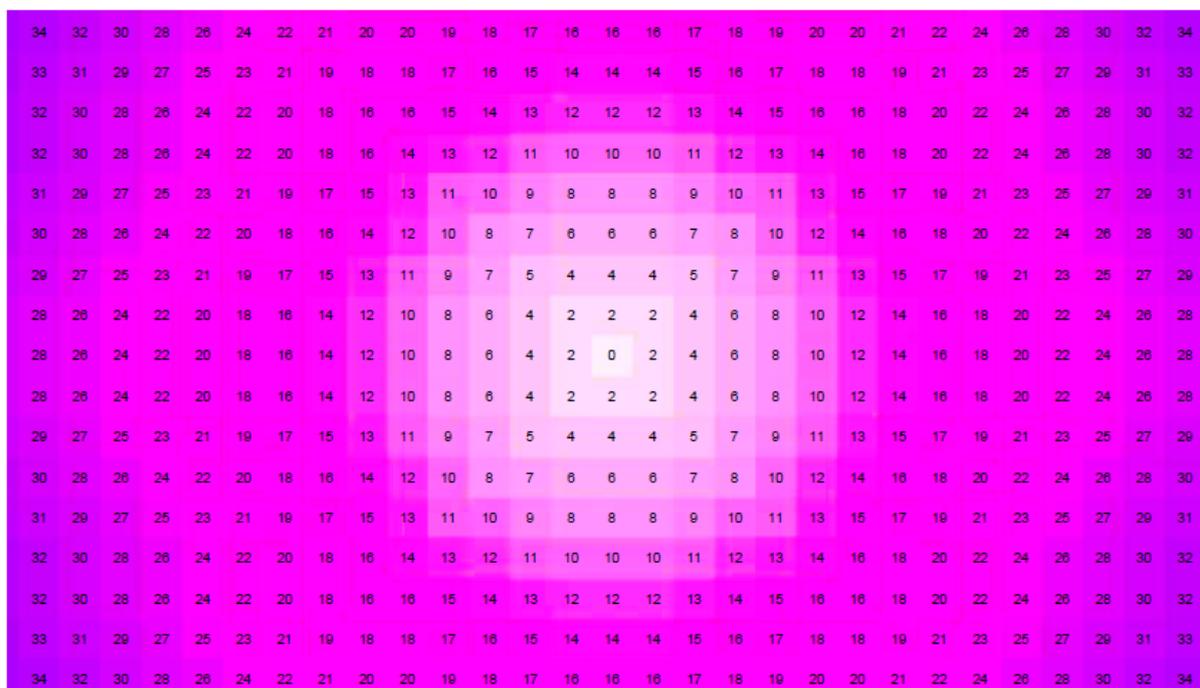


Fonte: ESRI, 2012.

Figura 4: Exemplo de soma de arquivos *raster* para obtenção de superfície de custo.

3.4.2. Superfície de custo acumulado e caminho de menor custo

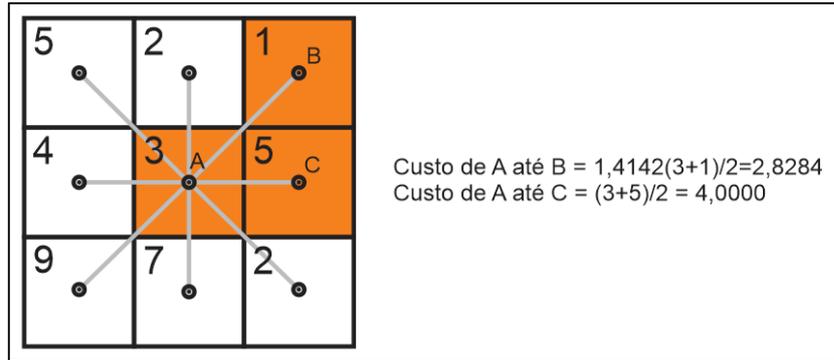
Em relação à superfície de custo acumulado, cada célula desta matriz armazena um valor relativo ao menor valor possível para transposição até um ponto de destino estabelecido. O processo para determinação desta superfície consiste em uma função de propagação que procura por uma célula adjacente às células de destino determinadas e, após a seleção das células com menor valor, o procedimento continua pela procura das próximas células vizinhas com menor valor (LEE e STUCKY, 1998), sempre determinando o custo acumulado, ou seja, a soma do custo das células até a célula de destino. O valor de custo de cada célula da superfície de custo acumulado (Figura 5) é o valor que representa o custo acumulado até uma célula de destino estabelecida (STAHL, 2005).



Fonte: STAHL, 2005.

Figura 5: Superfície de custo acumulado em condições isotrópicas em que o custo de travessia de cada célula é dada apenas pela distância entre as células.

Esta é a etapa crucial para determinação de rotas otimizadas, ou caminhos de menor custo, e existem, basicamente, poucos algoritmos para esta aplicação (STAHL, 2005) em que o mais largamente utilizado é o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959). Este foi originalmente desenvolvido para resolver dois problemas em um grafo de n nós em que alguns ou todos os pares são conectados por ramos de comprimentos dados: 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; encontrar o caminho de menor comprimento entre dois nós dados (DIJKSTRA, 1959). A implementação deste algoritmo nas ferramentas “*least cost path*” utilizadas nas plataformas SIG é feita considerando os centroides de cada célula da superfície de custo como um nó do grafo e os ramos são as conexões entre os pixels vizinhos, assim, cada pixel é interligado por ramos aos seus oito vizinhos. O comprimento de cada ramo é dado então pela média entre o valor de custo entre dois pixels vizinhos transversais, e para vizinhos diagonais, o valor da média é multiplicado pelo valor correspondente a raiz quadrada de dois, compensando a maior distância diagonal (Figura 6).



Fonte: elaboração própria.

Figura 6: Exemplo de vizinhança entre pixels e cálculo de comprimento dos ramos.

Então, o algoritmo de Dijkstra é aplicado para obter uma superfície de custo acumulado, que seria a árvore de valores mínimos no algoritmo de Dijkstra (ETHERINGTON, 2012) e, a partir desse resultado, a rota de menor custo é determinada pela aplicação de uma ferramenta para simulação de rede de drenagem, em que o algoritmo constrói o caminho de menor custo a partir do ponto inicial da rota, sempre procurando o pixel vizinho com menor valor de custo acumulado.

4. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho consiste, basicamente, na utilização de um conjunto de ferramentas do software QGIS 2.6.0¹ para simulação de rotas de menor custo (*least cost path*). Este conjunto de ferramentas utilizam como base uma superfície de rugosidade. Esta última, definida como a resistência, fricção ou dificuldade para travessia das células dessa superfície. Esta superfície é obtida por meio da integração (álgebra de mapas) de diversas sub-superfícies relativas às feições geográficas de critérios pré-estabelecidos com seus respectivos valores de rugosidade. Nove critérios foram considerados para os estudos de otimização de traçado (Tabela 4).

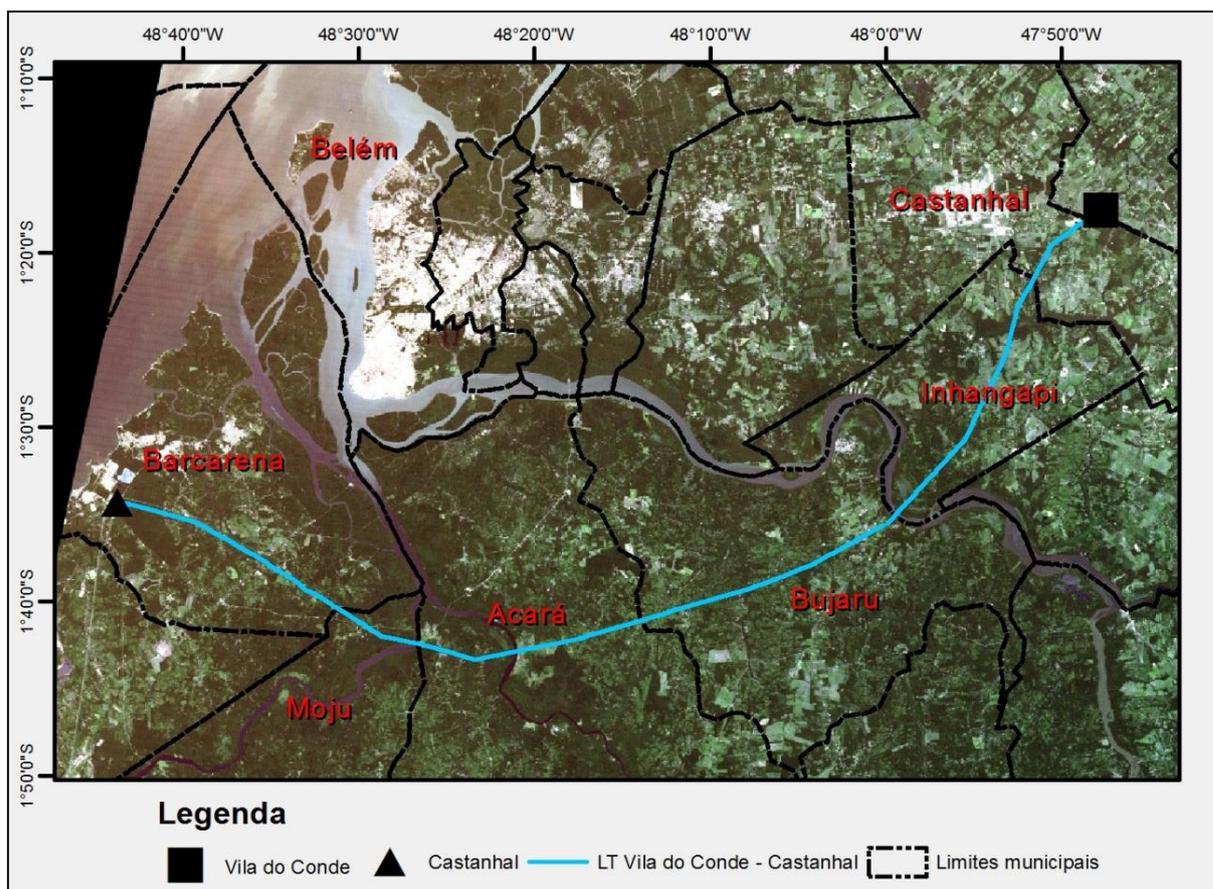
Tabela 4: Critérios utilizados nos estudos de otimização de traçado.

Critério	Classe
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	-
Sistema Interligado Nacional	-
Unidades de Conservação	-
Uso do solo	Água
	Áreas urbanas
	Fragmentos florestais
	Solo exposto
Estruturas	Vegetação rasteira
	-

A escolha dos critérios foi feita considerando as particularidades da área piloto, definida para o desenvolvimento e consolidação da metodologia, que foi uma região no estado do Pará, Brasil, entre os limites 1°10' - 1°45' S e 47°40' - 48°50' O (Figura 7), local onde há uma linha

¹ Sistema de Informação Geográfica livre e de código aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. É um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). O software possibilita a criação, visualização, edição e análise de informação geoespacial em inúmeros formatos. (<http://www.qgis.org>)

de 230kV implantada entre as subestações de Vila-do-Conde e Castanhal (ERTE, 2003b). Esta linha foi licitada em 2002 no leilão de transmissão 002 de 2002. A aplicação da metodologia para os pontos inicial e final da linha existente permitiu a comparação entre as rotas geradas e a LT já implantada.



Fonte: Adaptado de ERTE (2003b).

Figura 7: Localização da L.T. existente.

Destaca-se que outros critérios podem ser considerados para a aplicação da metodologia para outras localidades. Por exemplo, para o caso em estudo não foi avaliado o critério topografia já que é uma região de relevo pouco acidentado e bastante plano. Comunidades quilombolas e terras indígenas também são critérios de extrema importância na determinação de traçados de linhas de transmissão, que devem ser avaliados quando presentes na área de estudo. Destaca-se ainda a utilização da malha rodoviária e outros acessos neste tipo de estudo, em que os acessos podem ser avaliados como atratores, pois há custos associados a construção de novos acessos para a implantação de linhas de transmissão e a escolha de traçados mais próximos a acessos já existentes podem gerar reduções no custo total de implantação. Além de outras possibilidades de critérios em função das particularidades da área de estudo, deve ser

avaliada a escala dos estudos. Para este trabalho foram avaliados critérios em uma escala regional, com acesso a base de dados públicos. Dessa forma, estudos em uma escala mais detalhada podem ser realizados, em que dados de levantamento de campo e imagens de satélite de alta resolução podem ser utilizados.

A ponderação dos critérios foi feita a partir de duas abordagens (determinação dos valores de rugosidade para cada classe de cada um dos critérios). Uma delas foi a utilização de valores monetários. A segunda delas foi a definição de pesos pelo método de avaliação multicritério AHP. Destaca-se aqui que os valores monetários, assim como os pesos AHP associados a cada classe de cada um dos critérios, com exceção do critério Estruturas, representam os custos adicionais para travessia das feições relativas a esses critérios em relação ao custo de implantação de uma linha de transmissão em condições ideais, sem nenhuma restrição. Neste sentido, é o critério Estruturas que irá representar esses custos estruturais básicos. A Figura 8 representa as etapas da metodologia descrita e os próximos itens deste capítulo contem descrição mais detalhada de cada uma das etapas.

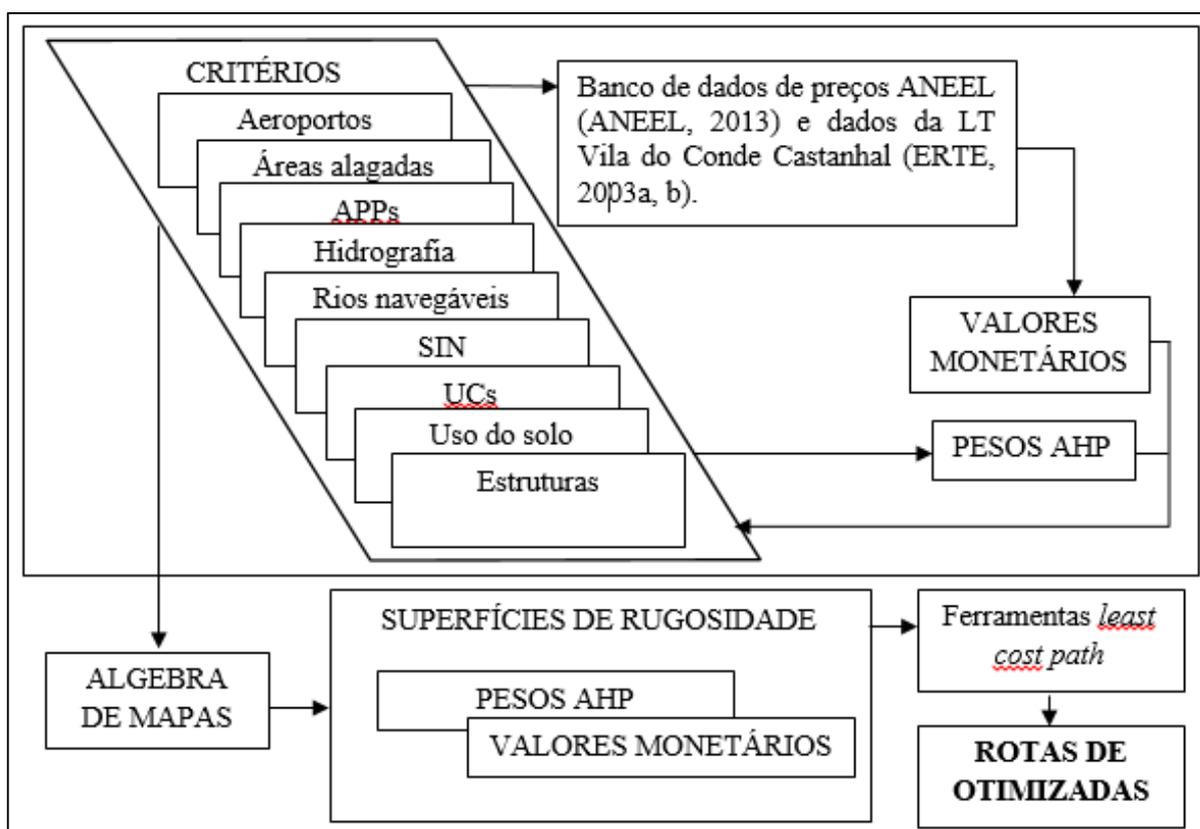


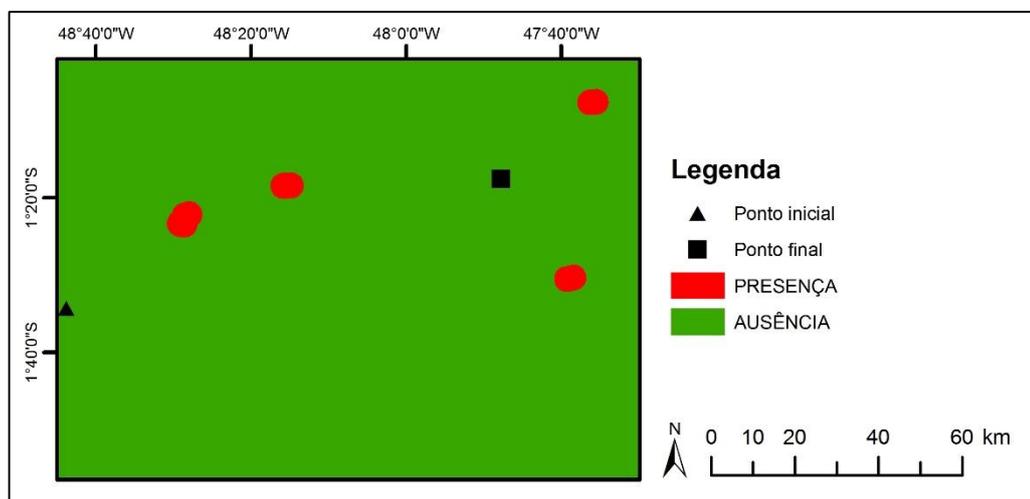
Figura 8: Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho.

4.1. Critérios: Descrição e aquisição dos dados

As feições geográficas relativas a cada um dos critérios foram obtidas por meio de acesso a dados geográficos disponibilizados por órgãos públicos e tratamento de imagens de satélite. Nos itens seguintes é possível verificar com detalhes os critérios utilizados e suas respectivas fontes e formas de obtenção.

4.1.1. Aeroportos

Aeroportos são condicionantes importantes para linhas de transmissão por causa das restrições relativas a estruturas acima do solo. Os limites dos aeroportos foram determinados com base em imagens de satélite de alta resolução. Para isso, utilizou-se um arquivo com a localização dos aeroportos na região de estudo (PNLT, 2010). Então, a delimitação dos limites dos aeroportos presentes na área de estudo foi feita no QGIS, com auxílio do aplicativo *Open Layers plugin*, que possibilita carregar imagens de satélite e mapas de base de dados públicas, como *Google Earth* e *Bing*. Aos limites definidos foi então considerado uma distância de borda de 3.000 metros, pois de acordo com a Instrução de Comando da Aeronáutica 63-19 de 2011 (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2011) as linhas de transmissão devem respeitar esta distância de 3.000 metros da borda interna das superfícies de aproximação e decolagem ainda que não se constituam obstáculos (Figura 9).



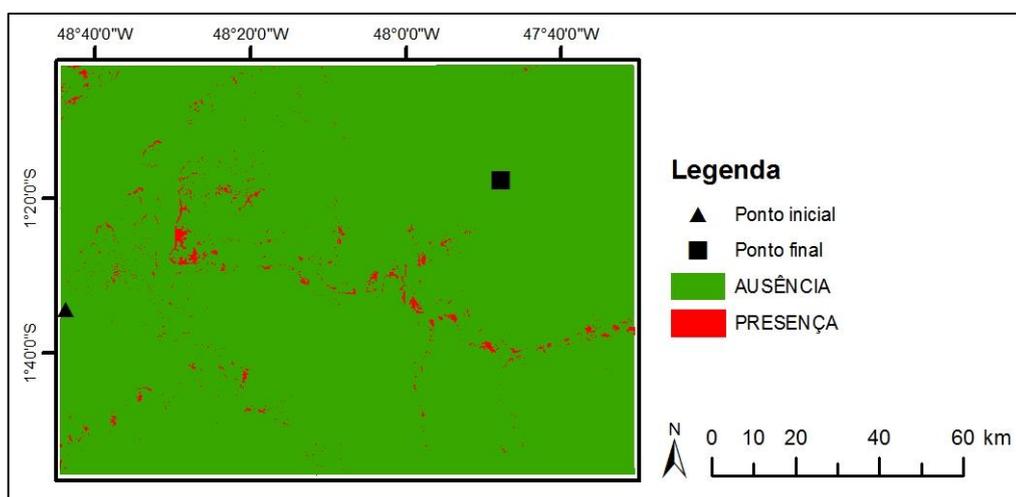
Fonte: Adaptado de PNLT (2010).

Figura 9: Representação geográfica do critério Aeroportos.

4.1.2. Áreas alagadas

Áreas alagadas são importantes variáveis para planejamento de uma linha de transmissão, pois a presença deste tipo de região fisiográfica acarreta em modificações nos projetos de fundações, em consequência da qualidade geotécnica inferior dos solos presentes nessas áreas. Além disso, questões ambientais relativas a essas áreas devem ser consideradas, pois geralmente são regiões com maior fragilidade ambiental, abrigando exemplares de fauna e flora específicos.

As áreas alagadas foram determinadas, com base em fotointerpretação de imagens de satélite (LANDSAT 5 TM, 2008) e utilização de modelo digital de elevação (MIRANDA, 2014), para identificação das cotas das áreas alagadas e traçado de suas feições utilizando curvas de nível.



Fonte: Adaptado de Landsat 5 TM (2008) e Miranda (2014).

Figura 10: Representação geográfica do critério Áreas alagadas.

4.1.3. Áreas de Preservação Permanente

De acordo com a Lei n° 12.651 de 2012 (BRASIL, 2012), as áreas de preservação permanente podem ser definidas como áreas protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, além de facilitar o fluxo gênico e fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. De acordo com esta Lei são consideradas Áreas de Preservação Permanente as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente; áreas no entorno de lagos e lagoas naturais e reservatórios artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais; áreas ao entorno de nascentes e de olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica; encostas com declividade

superior a 45°; restingas e manguezais; bordas de tabuleiros ou chapadas; topo de morros e áreas com altitude superior a 1.800 metros.

De acordo com a portaria nº 421 de 2011 do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), que dispõe sobre o licenciamento e regularização ambiental de sistemas de transmissão de energia elétrica, para supressão de vegetação de fragmentos florestais para implantação de linhas de transmissão, localizados fora dos limites de APPs, deve ser requerida a Autorização para Supressão de Vegetação (ASV). Já para os casos de supressão em áreas de APP a emissão da ACV deve ser precedida de uma Declaração de Utilidade Pública. Além disso, no processo de licenciamento ambiental, deverá ser prevista área para recomposição da vegetação suprimida, como medida compensatória do impacto causado, e para áreas de APP geralmente a área a ser recomposta muitas vezes é maior que a área de intervenção. Dessa, forma, este critério deve ser considerado e os custos adicionais relacionados devem ser avaliados.

Para os estudos de otimização de traçado para a área piloto da LT Vila do Conde – Castanhal, foram utilizadas apenas áreas de APP de margens de rio, que são as únicas presentes no local, já que é uma região bastante plana e de baixas altitudes. Essa superfície foi, então, determinada com base na hidrografia, em que as áreas de APP foram delimitadas (Figura 11) de acordo com a largura dos rios, com a utilização da função bordas do QGIS, respeitando a Lei nº 12.651 de maio de 2012 (BRASIL, 2012) que, no artigo 4º, parágrafo primeiro, determina os seguintes limites de APP:

- a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;
- b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;
- c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;
- d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;
- e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros.

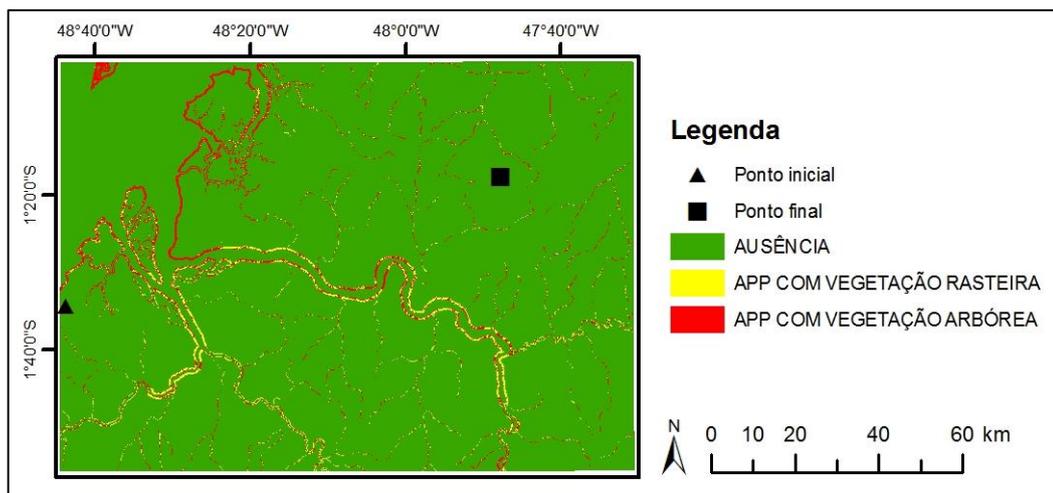
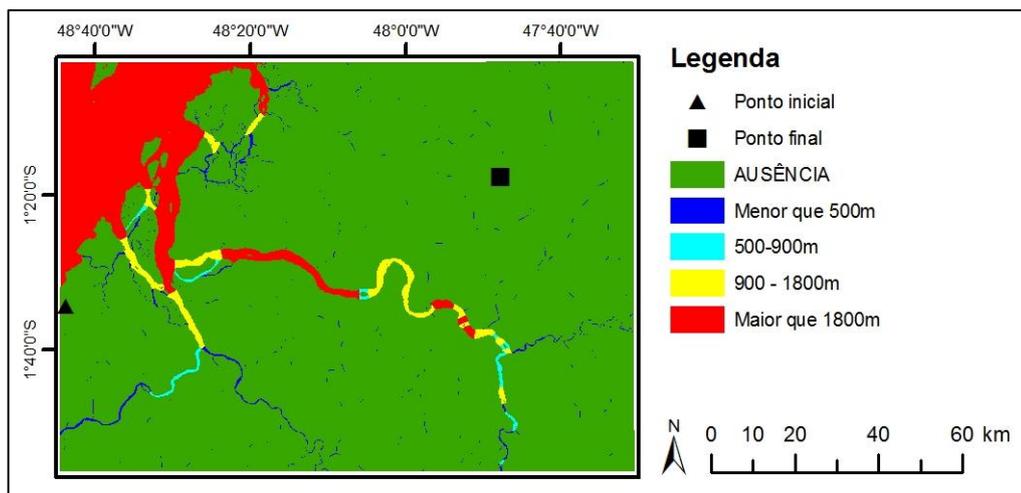


Figura 11: Representação espacial do critério APP (Áreas de Preservação Permanente).

4.1.4. Hidrografia

A variável largura de rios se torna importante na determinação de traçado de uma LT quando sua dimensão implica no aumento do vão padrão de uma LT e/ou necessidade de implantação de torres no meio da calha fluvial. A hidrografia foi determinada pela classificação supervisionada de máxima verossimilhança de imagens de satélite (LANDSAT 5 TM, 2008). Após este procedimento, a classe água foi isolada e convertida para formato vetorial, o que possibilitou o seccionamento da hidrografia e determinação da largura média de cada trecho (Figura 12). Esse procedimento permite a determinação das feições correspondentes aos corpos d'água com largura significativa, considerando a resolução das imagens de satélite utilizadas, que, neste caso, o valor foi de 30 metros. As feições correspondentes a rede hidrográfica de pequenas dimensões, não identificadas pela classificação das imagens de satélite, foram determinadas com base em dados vetoriais (ANA, 2013), do tipo linha. As faixas de APP são determinadas com a utilização da ferramenta “bordas” do QGIS, considerando uma largura média de 20 metros, para obtenção dos polígonos correspondentes as APPs para esta hidrografia.

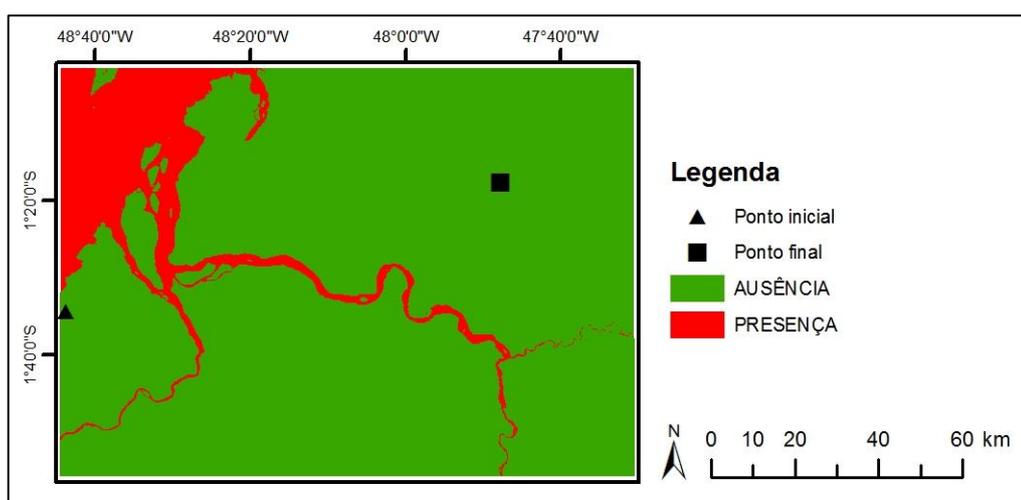


Fonte: Adaptado de Landsat 5 TM (2008) e ANA (2013).

Figura 12: Representação geográfica do critério Hidrografia: largura média de cada trecho.

4.1.5. Rios navegáveis

Os rios navegáveis, recebendo a denominação de hidrovias, são importantes pela distância de segurança mínima a ser adotada para implantação de qualquer estrutura nos rios onde existe navegabilidade, distância, esta, determinada com base nas características e tipos embarcação (PNVNI, 2014) e, para o caso de linhas de transmissão, da tensão de operação (ABNT, 1985). Na região de estudo existem localizam-se quatro rios navegáveis: Rio Tocantins, Rio Capim, Rio Guamá e Rio Moju. As feições para este critério (Figura 13) foram obtidas com base no critério hidrografia, para o qual a hidrografia da região foi delimitada, e informações do Ministério dos Transportes (PNLT, 2010).



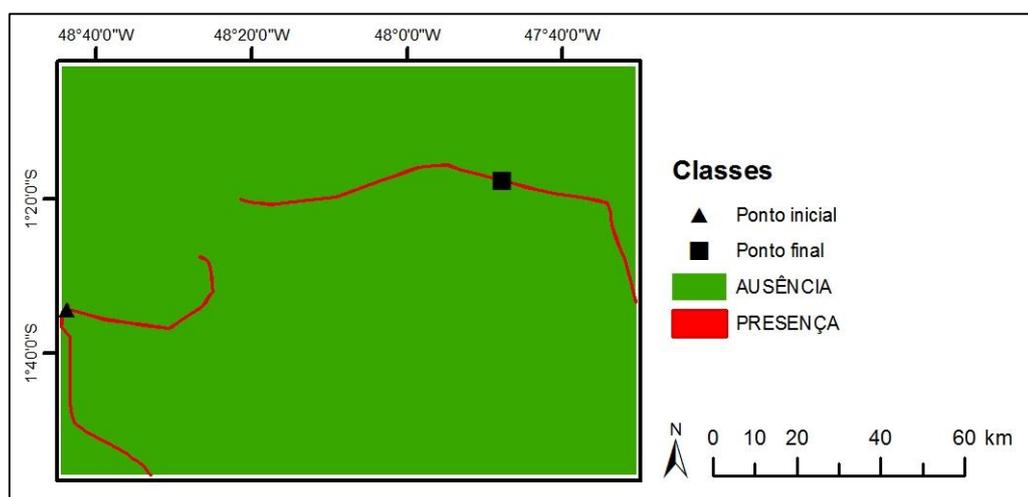
Fonte: Adaptado de PNL T (2010) e Landsat 5 TM (2008).

Figura 13: Representação geográfica do critério Rios Navegáveis.

4.1.6. Sistema Interligado Nacional

Este critério tem uma influência distinta dos demais critérios considerados neste estudo. Estes últimos, enquanto são avaliados como geradores de custo, ou como fatores restritivos à instalação de uma linha de transmissão, o critério relativo à rede de transmissão existente (Figura 14) é avaliada como uma área preferencial, pela possibilidade de compartilhamento da faixa de servidão além da possibilidade de utilização de acessos já implantados para a implantação das linhas já existentes. É importante destacar o caráter regional do estudo realizado, e este critério, para estudos mais detalhados devem ser avaliados com maior precaução, com a verificação se a linha de transmissão existente possui faixa de servidão com largura suficiente para compartilhamento, e se for possível qual a largura poderá ser compartilhada. Em relação aos acessos, principalmente quando se trata de rodovias, em estudos em uma escala mais refinada deverá ser verificado também a possibilidade de compartilhamento de faixa de segurança em que deverão ser ponderadas as vantagens em relação a possibilidade de cobrança por esse compartilhamento.

As feições relativas a este critério foram obtidas com base em dados vetoriais, no formato de linhas (PNLT, 2010). A estas informações foi aplicada uma função de crescimento de regiões, função bordas do QGIS, para determinação dos polígonos referentes a faixa de servidão da rede de transmissão presentes na área de estudo.



Fonte: Adaptado de PNLT (2010).

Figura 14: Representação geográfica do critério Sistema Interligado Nacional.

4.1.7. Unidades de Conservação (UCs)

As unidades de conservação são definidas de acordo com a Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), como espaços territoriais e seus recursos ambientais com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração. As UCs são divididas em dois grupos, as Unidades de Proteção Integral e as de Uso Sustentável. O objetivo principal do primeiro grupo é a preservação, sendo admitido apenas uso indireto dos seus recursos naturais, enquanto o segundo tem como objetivo a compatibilização da conservação com o uso sustentável dos recursos naturais. Apesar do caráter restritivo quanto à intervenção nos limites de Unidades de Conservação, o artigo 46 da Lei 9.985 de 18 de julho de 2000 (Brasil, 2000) determina que a instalação de redes de abastecimento de água, esgoto, energia e infra-estrutura urbana em geral, em unidades de conservação, depende de aprovação prévia do órgão responsável por sua administração, sem prejuízo de necessidade de elaboração de estudos de impacto ambiental e outras exigências legais, o que é reafirmado no parágrafo terceiro do artigo 36 desta lei, que diz que empreendimentos que venham a afetar unidades de conservação o licenciamento só poderá ser concedido mediante autorização do órgão responsável pela administração da unidade afetada.

Os custos associados a travessia dessas áreas estão relacionadas ao processo de licenciamento ambiental da linha de transmissão. De uma forma geral, o planejamento do traçado de uma linha de transmissão deve ser feito de modo a minimizar a interferência em unidades de conservação. Mas, quando a intervenção é inevitável, é necessário que sejam adotadas medidas mitigatórias e compensatórias. Por exemplo, técnicas construtivas especiais para os trechos de interferências como utilização de torres mais altas de forma a reduzir a necessidade de desmatamento na faixa de servidão, em que o desmatamento com torres mais altas é reduzido apenas a faixa de limpeza para lançamento dos cabos. Além disso, deverá ser previsto no processo de licenciamento a recomposição florestal de outra área com área equivalente ou maior a área de supressão de vegetação em unidade de conservação. Além disso, para unidades de conservação federais de uso sustentável, a portaria interministerial nº 37 de 2014 (MP/MMA/MME, 2014) fixa o valor da cessão de uso onerosa, a ser cobrado pela transmissora pela intervenção, com base no artigo 12 do decreto nº 7.154 de 2010 (BRASIL, 2010). Este valor é definido como:

“Valor da área da União afetada pelo empreendimento, em reais por hectare, obtido por meio da Planta de Valores Genéricos (PVG) para as áreas urbanas,

Planilha Referencial de Preços de Terras, elaborada pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA, para as áreas rurais ou, na inexistência destas, quando urbanas, por meio da adoção da média dos valores dos trechos de logradouro dos municípios mais próximos de onde se localiza o empreendimento, quando rurais, por meio da adoção da média dos valores referenciais de preços de terra dos municípios mais próximos de onde se localiza o empreendimento.”

Neste contexto, o conhecimento prévio dos limites de unidades de conservação no planejamento de uma linha de transmissão se faz importante, e os custos e impactos de travessia dessas áreas devem ser levados em conta. Para este estudo, os limites das Unidades de Conservação presentes na Área de estudo (Figura 15) foram determinados com base em informações disponíveis em sítio eletrônico do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014).

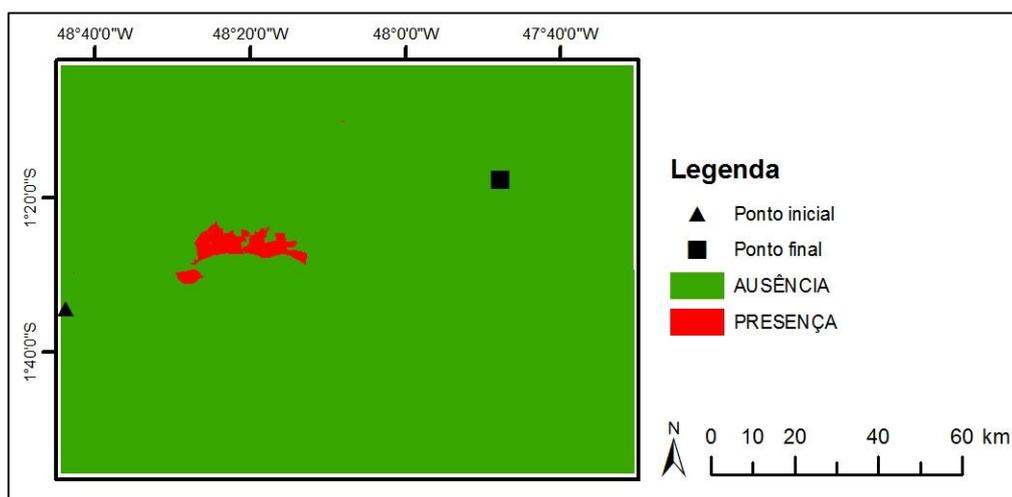


Figura 15: Representação espacial do critério Unidades de Conservação.

4.1.8. Uso do solo

Este componente está relacionado basicamente aos custos de “indenização”, em virtude da utilização de terras da faixa de servidão, e pela limpeza desta faixa e pelas obrigações de recomposição de vegetação nos casos de supressão de fragmentos florestais na faixa de limpeza e utilização de torres diferenciadas para as áreas de fragmentos florestais (torres mais altas). Neste sentido foram consideradas 5 classes de uso do solo (Figura 16): Vegetação rasteira, Fragmentos florestais, Água, Áreas urbanas e Solo exposto, cujas feições foram obtidas pela classificação supervisionada de uma imagem do sensor remoto ETM+ do satélite Landsat 5 (LANDSAT 5 TM, 2008).

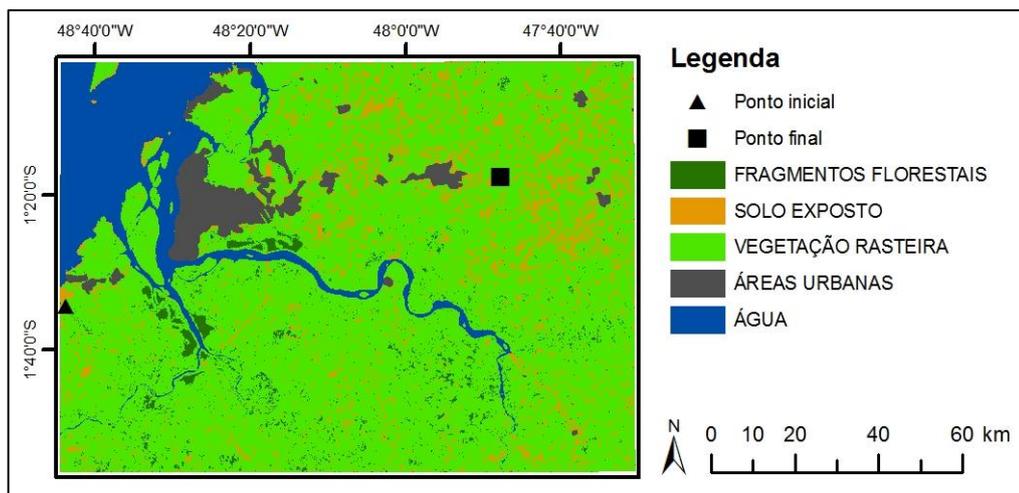


Figura 16: Representação espacial do critério USO (Uso do Solo).

4.1.9. Estruturas

Este critério está associado a questões econômicas e de custo de implantação de uma linha de transmissão. Ele possui um único valor para toda a área de estudo e representa o custo de implantação de uma LT sobre condições ideais.

4.2. Avaliação multicritério: Determinação dos valores monetários e pesos pelo método AHP

4.2.1. Determinação dos valores monetários

A superfície de valores monetários representa o custo “real” de implantação de uma linha de transmissão associado a cada um dos critérios considerados. A sua determinação foi idealizada considerando dois principais aspectos: custos estruturais básicos e custos adicionais. O primeiro deles, os custos estruturais básicos, se refere ao custo material de implantação da linha de transmissão considerando condições normais. Ou seja, uma linha ideal, passando por locais planos e sem nenhuma restrição, como travessia de rios, áreas urbanas, áreas de preservação, dentre outras. Estes custos são representados pelo critério Estruturas (estruturas básicas de uma LT). O segundo aspecto, os custos adicionais, compreende os custos adicionais para travessia das feições de cada um dos critérios considerados no estudo, que é a essência para a superfície de custo real, já que irá determinar as divergências de custo no espaço bidimensional de busca das ferramentas para determinação da rota de menor custo.

Os valores de custo de cada um dos critérios foram determinados a partir da consulta do banco de dados de preços da ANEEL (ANEEL, 2013), considerando as particularidades técnicas da linha e cada componente da LT de acordo com os dados construtivos da LT Vila do Conde Castanhal (ERTE, 2003 a, b, c, d).

4.2.2. Determinação dos pesos AHP

A ponderação dos critérios pelo método avaliação multicritério AHP foi feita com a utilização de uma planilha automática de cálculo desenvolvida por Goepel (2013).

Na aba principal (Figura 17) da planilha, foi selecionado o número de critérios utilizados (n) e número de participantes na avaliação (N). O campo “p” foi marcado como 1 pois a avaliação foi feita por apenas uma pessoa. Em “Scale” foi mantido o valor 1 e em “ α ” o valor 0,15. O nome de cada critério foi inserido também pela aba principal.

AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs)
 K. D. Goepel Version 12.08.2013 <http://bpmsg.com>
 Only input data in the light green fields and worksheets!

n= 9 Number of criteria (3 to 10) Scale: 1 Linear
 N= 1 Number of Participants (1 to 20) α : 0,15 Consensus: n/a
 p= 1 selected Participant (0=consol.) 13 7 Participant 1

Objective: Importância das variáveis espaciais quanto ao custo de passagem de linha de transmissão.

Author: []
 Date: [] EVM check: 1,745E-14

Table	Criterion	Comment	Weights	Rk
1	Aeroportos		13,8%	2
2	Áreas alagadas		13,0%	3
3	Hidrografia		39,4%	1
4	Rios navegáveis		7,2%	5
5	SIN		2,8%	9
6	Ucs		12,1%	4
7	APP		4,4%	6
8	Uso do solo		3,2%	8
9	Estruturas	for 9&10 unprotect the input sheets and expand the question section ("+" in row 66)	4,0%	7
#				

Result: Eigenvalue lambda: 10,642
 Consistency Ratio 0,37 GCI: 0,49 CR: 14,2%

Figura 17: Aba principal da planilha de aplicação do método AHP (Goepel, 2013).

As comparações pareadas para a determinação dos pesos é feita nas abas In1, In2...In20. As abas são utilizadas de acordo com o número de avaliadores. Para o estudo realizado neste trabalho foi utilizada apenas a aba In1, pois foi a avaliação foi feita por apenas uma pessoa. Cada critério deve ser avaliado em relação a todos os outros utilizando uma escala de importância de 0-9. Na Figura 18 tem-se a avaliação feita para os 9 critérios utilizados neste

trabalho. Após a avaliação os pesos de cada critério são calculados de forma automática pela planilha e são exibidos na aba principal, como pode ser verificado na Figura 17.

		Criteria		more important ?	Scale
i	j	A	B	A or B	(1-9)
1	2	Aeroportos	Áreas alagadas	B	3
1	3		Hidrografia	B	8
1	4		Rios Navegáveis	A	4
1	5		SIN	A	6
1	6		Ucs	A	2
1	7		APP	A	5
1	8		Uso do solo	A	5
2	3		Áreas alagadas	Hidrografia	B
2	4	Rios Navegáveis		A	1
2	5	SIN		A	6
2	6	Ucs		B	2
2	7	APP		A	5
2	8	Uso do solo	A	5	
3	4	Hidrografia	Rios Navegáveis	A	4
3	5		SIN	A	8
3	6		Ucs	A	5
3	7		APP	A	8
3	8		Uso do solo	A	8
4	5	Rios Navegáveis	SIN	A	3
4	6		Ucs	B	3
4	7		APP	A	3
4	8		Uso do solo	A	3
5	6	SIN	Ucs	B	5
5	7		APP	A	2
5	8		Uso do solo	A	1
6	7	Ucs	APP	A	2
6	8		Uso do solo	A	6
7	8	APP	Uso do solo	A	3
1	9	Aeroportos	Estruturas	A	4
1	10				
2	9	Áreas alagadas	Estruturas	A	2
2	10				
3	9	Hidrografia	Estruturas	A	8
3	10				
4	9	Rios Navegáveis	Estruturas	A	2
4	10				
5	9	SIN	Estruturas	B	5
5	10				
6	9	Ucs	Estruturas	A	3
6	10				
7	9	APP	Estruturas	A	3
7	10				
8	9	Uso do solo	Estruturas	A	3
8	10				
9	10				

Figura 18: Comparação pareada para os nove critérios considerados para a LT Vila do Conde – Castanhal, feita com a utilização da planilha AHP de Goepel (2013).

Após a determinação dos pesos de cada um dos critérios e também para as classes de cada um dos critérios 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 100. 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 e o resultado é multiplicado por 100. O peso final de cada classe é obtido pela multiplicação do peso do critério pelo peso da classe. Os resultados para os pesos podem ser verificados no item 5.2.

4.3. Otimização de traçado – *least-cost-path*

4.3.1. Obtenção da superfície de rugosidade

O primeiro passo para a aplicação da metodologia de otimização de traçado é a confecção das superfícies de rugosidade em formato *raster*. Os critérios utilizados são inicialmente obtidos em formato vetorial, mais especificamente no formato *shapefile* (*.shp), com exceção do arquivo de uso do solo, que é gerado no formato *raster* (*.tif). É importante destacar aqui que todos os arquivos utilizados, referentes aos critérios, foram padronizados em relação a um sistema de referência espacial, neste caso projeção UTM, fuso 22 sul e *datum* WGS84.

Os arquivos no formato *shapefile* permitem armazenar diferentes valores para cada uma das classes, ou feições geográficas, em uma tabela de atributos, em que cada coluna representa um conjunto de valores associados às feições geográficas do arquivo. Dessa forma, esses arquivos armazenam os pesos, obtidos pelo AHP, e valores monetários. A partir do arquivo *shapefile* de cada um dos critérios são gerados dois arquivos no formato *raster*, cada um referente a uma superfície de rugosidade (valores monetários e pesos AHP). Esse procedimento foi feito utilizando-se uma resolução espacial (dimensão do pixel) de 90 metros. A variável uso do solo, originalmente em formato *raster*, foi apenas reclassificada utilizando os pesos pelo AHP e valores monetários. Os arquivos no formato *raster* são então somados para compor as superfícies de rugosidade.

4.3.2. Determinação dos caminhos de menor custo

Esta etapa da metodologia é executada basicamente pela aplicação de duas ferramentas do software QGIS: (1) *r.cost.full* e (2) *r.drain*. A primeira delas, juntamente com a superfície de rugosidade e ponto final da rota como dados de entrada, é utilizada para gerar uma superfície de rugosidade acumulada. Cada pixel dessa superfície possui um valor que representa um “mínimo custo acumulado” de transposição do pixel em questão até o pixel referente ao ponto final da rota. Esta superfície é então utilizada, juntamente com o ponto inicial da rota, como

dados de entrada para a segunda ferramenta, *r.drain*, que gera como produto um arquivo no formato *raster* do traçado de menor custo.

As duas rotas geradas são convertidas para formato *shapefile* de pontos, em que o centroide de cada pixel da rota é transformado em um ponto. É feita, então, a sobreposição com a superfície de valores monetários, em que cada ponto da rota recebe um valor de custo monetário, em R\$/km. Como a resolução do pixel é conhecida, 90 metros, e tem-se as coordenadas de cada ponto da rota, o custo total da rota é calculado pelo somatório do custo incremental de cada trecho correspondente a cada par de pontos. E este último dado pela média dos custos dos dois pontos (obtidos pela sobreposição à superfície de custo) multiplicado pela distância entre os pontos (90 metros para pixels na transversal e 90 vezes a raiz quadrada de dois para pixels na diagonal). O comprimento total de cada rota também é calculado, considerando apenas o somatório dos comprimentos incrementais dos trechos correspondentes a cada um dos pares de pontos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Valores monetários

5.1.1. Tipos de torres e fundações utilizadas na LT Vila do Conde-Castanhal

Como já indicado anteriormente, a metodologia foi desenvolvida com base em uma área piloto, onde existe a linha de transmissão Vila do Conde – Castanhal de 230kV. Antes de estimar os custos relativos a cada um dos critérios é necessário compreender os tipos de estruturas utilizadas, assim como os tipos de fundações.

Em um projeto de uma linha de transmissão, as estruturas ou torres podem ser classificadas, basicamente, em estruturas de suspensão e ancoragem. As torres de suspensão são dimensionadas para resistir os esforços verticais relativos ao peso dos cabos, isoladores e ferragens. É o tipo de estrutura predominantemente empregada em uma linha. Já as torres de ancoragem são dimensionadas para suportar, também, esforços unilaterais decorrentes do tensionamento dos cabos durante a montagem ou após a ruptura de algum deles. São empregadas também em pontos de ângulo relativamente elevados (LABEGALINI et al., 1992). Neste sentido, as torres de suspensão são menos robustas em relação as torres de ancoragem e, conseqüentemente, suas fundações serão, de certa forma, mais simples. Além disso, as torres de suspensão podem ser estaiadas ou autoportantes. As torres estaiadas apresentam peso e fundação significativamente menores, além de um ângulo de deflexão suportado menor. A LT Vila do Conde-Castanhal apresenta, basicamente, 6 tipos de torres (ERTE 2003c):

- S02 – Torre estaiada convencional, é a estrutura predominante utilizada para situações normais e ângulos de deflexão não superiores a 2°;
- SAR – Torre autoportante de suspensão convencional, utilizada para ângulos até 8° e algumas travessias específicas;
- AT – Torre autoportante de ancoragem convencional, utilizada para ângulos de deflexão maiores que 8° até um máximo de 60° ou como terminal de linha com ângulo de deflexão máximo de 20°;
- SESP – Torre autoportante de suspensão para passagem sobre áreas de matas preserváveis. São dimensionadas com base nas características geométricas das torres do tipo SAR com valor de altura nominal maior;
- ESP – Torres autoportantes de suspensão dimensionadas para travessia dos rios Guamá, Acará e Moju. São também dimensionadas com base nas características geométricas das torres do tipo SAR com valores diferenciados para altura nominal;

- ATESP – Torres autoportantes de ancoragem instaladas a vante e a ré das travessias do rio Guamá para realização da transição dos cabos utilizados na travessia e os cabos utilizados no restante da linha. São dimensionadas com base nas características das torres AT.

Destaca-se que as torres do tipo ATESP e AT não foram consideradas nos estudos de otimização de traçado, pois estas são utilizadas por causa de especificidades técnicas, como ângulos de deflexão elevados e transposição de tipos de condutor. Neste sentido, a utilização destas não está diretamente associada à travessia das feições relativas às variáveis utilizadas.

Em relação às fundações, essas são projetadas de acordo com o tipo de torre e em relação à classificação geotécnica do solo. No caso da LT Vila do Conde – Castanhal (ERTE, 2003d) foram previstas 5 classes de solo (Tabela 5). Para as estruturas autoportantes foram utilizados tubulões de base alargada nos tipos de solo I e II, sapatas nos solos tipo III e IV, e blocos sobre estacas ou sapatas especiais para solos tipo V. Para as estruturas estaiadas, as fundações utilizadas foram sapatas pré-moldadas para os mastros e blocos pré-moldados para os estais (ERTE, 2003d).

Tabela 5: Classificação geotécnica dos solos adotada para a construção da LT 230kV Vila do Conde Castanhal.

Classes	I	II	III	IV
No de Golpes N_{spt}	$19 < N$	$8 < N < 19$	$4 < N < 8$	$4 < N$
Tensão Admissível	300 kPa	200 kPa	100 kPa	100 kPa
Peso Específico	17 kN/m ³	15 kN/m ³	13 kN/m ³	=10 kN/m ³

Classe V - solos com características inferiores aos solos do tipo IV são classificados como solos do tipo V.

Fonte: Adaptado de ERTE, 2003d

5.1.2. Estimativa dos custos de implantação de LT por tipo de torre

Foram estimados os custos de implantação de LT para as torres tipo S02, SAR, SESP e ESP (Tabela 6), considerando os valores usuais de vão médio, particularidades técnicas de cada torre, custos materiais, mão de obra, instalação e montagem de estruturas, dentre outros. Esses valores serão utilizados como base para determinação dos custos relativos a cada um dos critérios. As tabelas detalhadas da estimativa dos custos constam no ANEXO I e II.

Tabela 6: Custo total de implantação de LT por tipo de torre.

Tipo de torre	Custo de implantação [R\$/km]			
	S02	SAR	ESP	SESP
Valor sem fundação	235.628,47	302.542,10	371.295,43	411.659,38
Valor com custo estimado de fundação*	248.279,67	353.667,79	445.210,67	497.041,91

* Os custos de fundação foram estimados com base na ocorrência média de cada tipo de fundação (determinada e dimensionada a partir das características geotécnicas do local de implantação) na LT Vila do Conde – Castanhal, como pode ser verificado nos ANEXOS I e II.

5.1.3. Estimativa de custos para os critérios utilizados

Nos tópicos seguintes é possível verificar o detalhamento da obtenção dos custos de cada um dos critérios (Tabela 7).

Tabela 7: Custos dos critérios

Critério	Classes	Custo [R\$/km]
Aeroportos	Presença	R\$ 1.737.957,70
	Ausência	R\$ 0,00
Áreas alagadas	Presença	R\$ 138.970,22
	Ausência	R\$ 0,00
Hidrografia	Menor que 500	R\$ 178.884,28
	500-900 metros	R\$ 375.015,27
	900-1800 metros	R\$ 686.662,74
	Maior que 1800	¹ R\$ 1.000.000.000,00
	Ausência	R\$ 0,00
Rios Navegáveis	Presença	R\$ 201.748,03
	Ausência	R\$ 0,00
Sistema Interligado Nacional	Presença	² -R\$ 6.876,00
	Ausência	R\$ 0,00
Unidades de Conservação	Presença	R\$ 10.254,08
	Ausência	R\$ 0,00
Áreas de Preservação Permanente	APP com vegetação Rasteira	R\$ 15.381,12
	APP com fragmentos florestais	R\$ 10.254,08
	Ausência	R\$ 0,00
Uso do Solo	Vegetação rasteira	R\$ 13.752,00
	Fragmentos florestais	R\$ 168.630,20
	Água	R\$ 0,00
	Áreas urbanas	R\$ 3.881.481,50
	Solo exposto	R\$ 3.252,00
Estruturas	-	R\$ 248.279,67

¹Esta classe é considerada como impeditivo, dessa forma seu valor é fixado como um valor em ordem de grandeza muito maior que a ordem de grandeza média dos demais pesos.

²Este critério é considerado como atrator (gera redução de custos), ao contrário dos demais critérios que são repulsores, por isso foi adotado valor negativo.

5.1.3.1. Estruturas

Em condições ideais foi considerada a utilização de torres do tipo S02. Para fundações foi considerado o custo estimado, calculado de acordo com as ocorrências de cada tipo de torre em cada classe geotécnica de solo. Isso foi feito pois não há um mapeamento de classes geotécnicas do solo, e seria um erro considerar para esta variável a melhor classe geotécnica, pois isso iria subestimar o custo total do LT. Dessa forma, o valor para esta variável é fixado em 248.279,67 R\$/km.

5.1.3.2. Aeroportos

Para determinação do custo de travessia das feições relativas aos aeroportos foi considerada a alternativa de utilização de LT subterrânea. Segundo EPTE (2013), os custos de enterramento de uma LT são de cinco a oito vezes mais caros que o de uma linha convencional. Adotou-se para esta classe, então, um custo adicional de sete vezes o custo de implantação de torres tipo S02, que resultou em 1.737.957,70 R\$/km.

5.1.3.3. Áreas alagadas

Esse tipo de condição fisiográfica geralmente apresenta solos com qualidade geotécnica baixa. Neste sentido, considerou-se a utilização de torres tipo SAR, com fundações para solo tipo V, que resulta em um custo de 387.249,89 R\$/km. O custo adicional deste critério, em relação a torres tipo S02, é 138.970,22 R\$/km.

5.1.3.4. Áreas de Preservação Permanente

Para Áreas de Preservação Permanente considerou-se como custo adicional o custo de recomposição da vegetação do dobro da área de intervenção para locais com vegetação arbórea e área igual a 1,5 vezes a área de intervenção para locais de vegetação rasteira. Os seguintes valores foram obtidos (Tabela 8):

Tabela 8: Custo para travessia de Áreas de Preservação Permanente.

Classe de APP	Faixa de limpeza [m]	Custos de recomposição [R\$/m ²]	Custo* [R\$/km]
APP com fragmentos florestais	5	2,05	10.254,08
APP com vegetação rasteira	5	2,05	15.381,12

* Os custos de travessia de áreas de APP com fragmentos florestais são, na verdade, o dobro do indicado na tabela. Isso porque, foi considerada a recomposição do dobro da área de intervenção, e, na variável uso do solo, o custo de recomposição já é considerado uma vez para áreas de fragmentos florestais. Isso justifica o valor maior para área de pastagens, já que na variável uso do solo não é considerada recomposição para essas áreas.

5.1.3.5. Hidrografia

Para travessia de rios com largura inferior a 500 metros considerou-se a utilização de torres normais tipo S02, já que não há diferenciação estrutural para travessia de rios com essa largura. Mas, ainda assim considerou-se como custo adicional o valor para a classe vegetação arbórea, do critério Uso do solo, somadas a classe APP com fragmentos florestais, do critério Áreas de Preservação Permanente. Isso justifica-se, pois a atribuição de valor nulo a esta classe de hidrografia gera um caminho preferencial ao algoritmo de otimização de traçado. Para larguras de 500 a 900 metros, torres especiais tipo ESP (utilizadas para travessia do rio Guamá, Acará e Moju pela LT Vila do Conde – Castanhal). Ainda, para esta faixa de largura, o valor de custo foi multiplicado por um fator de 1,4. Isso porque a travessia de um rio com largura significativa, demanda utilização de torres de ancoragem a vante e a ré das torres instaladas próximas as margens, gerando custos adicionais. Para faixas de largura maiores que 900 metros foi considerada utilização de torres na calha do rio, que são mais caras que as torres convencionais. O custo por km para esta faixa de largura foi estimado, então, em 1,5 vezes o valor de travessia para faixa de largura de 500-900 metros. Valores maiores que 1800 metros foram considerados como impeditivo, para isso bastou utilizar um valor em uma ordem de grandeza muito acima dos custos normais. Na Tabela 9 é possível verificar os valores calculados.

Tabela 9: Custos adicionais para o critério Hidrografia.

Faixas de largura	Custo [R\$/km]	Custo adicional [R\$/km]¹
Menor que 500m	-	178.884,28
500 – 900m	623.294,94	375.015,27
900 – 1800m	934.942,42	686.662,74
Maior que 1800m	-	100.000.000.000,00

¹Subtração entre o custo de travessia de hidrografia e os custos de implantação de LT para torres tipo S02.

5.1.3.6. Rios Navegáveis

Esta superfície está relacionada a necessidade de alteamento para travessia dos rios navegáveis, em que a altura de segurança é definida pelo tamanho das embarcações e pela norma ABNT 5422 de 1985. De acordo com as características da hidrovia Guamá-Capim, trecho navegável da área de estudo, a necessidade de alteamento é de 6 metros. Neste sentido definiu-se a Equação 2 para determinação do custo de torres alteadas:

$$C_{NAVEG} = \left(\frac{C_{padr\tilde{a}o} \cdot h_{NAVEG}}{h_{padr\tilde{a}o}} \right) \cdot 1,1 \quad \text{Equação 2}$$

Em que C representa o custo por km da estrutura e h a altura da torre. O fator 1,1 da fórmula foi adotado para evitar a subestimativa do custo incremental, já que, o alteamento de uma torre gera aumento dos esforços atuantes na estrutura, conseqüentemente resultando em torres com estruturas e fundações mais reforçadas. O custo adicional foi calculado, então, considerando torres tipo SAR, alteadas em 6 metros (Custo estimado em 450.024,70 R\$/km pela fórmula indicada), em relação ao custo de torres tipo S02, que resultou em: 201.748,03 R\$/km.

5.1.3.7. Sistema Interligado Nacional

Com relação à variável Sistema Interligado Nacional (SIN), que se refere às demais linhas de transmissão existentes na região de estudo, foi considerado que a presença destas pode reduzir custos de instalação por meio do compartilhamento de parte da faixa de servidão já existente.

Dessa forma, os custos evitados foram calculados com base na variável Uso do Solo para áreas de vegetação rasteira, que representa os custos evitados de limpeza do terreno e indenização, já que faixa de servidão poderá ser utilizada em conjunto com uma linha de transmissão já implantada. O valor foi, então, definido em 50% do valor da classe vegetação rasteira da variável uso do solo, que resulta em -6.876,00 R\$/km.

5.1.3.8. Unidades de Conservação

O custo de travessia de unidades de conservação pode ser estimado com base em três aspectos: O primeiro, o custo incremental de utilização de estruturas diferenciadas, mais altas, as torres SESP para reduzir a necessidade de supressão de vegetação; O segundo, custo relativo a recomposição de vegetação proporcional a área equivalente a área de intervenção da linha considerando faixa de limpeza de 5 metros, como medida compensatória a intervenção em unidade de conservação; O terceiro, custo da cessão de uso onerosa, previsto pela Portaria Interministerial nº 37 de 2014 (MP/MMA/MME, 2014). Estes custos, para o estudo da LT Vila do Conde – Castanhal, já foram considerados no critério Uso do Solo. A utilização de torres diferenciadas já foi considerada na classe vegetação arbórea, do critério uso do solo, já que as Unidades de Conservação são predominantemente cobertas por vegetação arbórea. A questão do custo da cessão de uso onerosa também são considerados no critério uso do solo, como indenização em relação a faixa de servidão, e no caso de locais com vegetação arbórea apenas de área relativa a faixa de limpeza. Já a questão da recomposição de vegetação como medida compensatória, os custos são considerados parcialmente no critério Uso do Solo, para a classe

vegetação arbórea, que considera recomposição de área equivalente a área de intervenção. Para as Unidades de Conservação foi considerada recomposição de área em dobro da área de intervenção, em função da importância ecológica das Unidades de Conservação e conseqüentemente impacto mais significativo de intervenção nessas áreas. O custo de recomposição, para uma faixa de limpeza de 5 metros é equivalente a 10.254,08 R\$/km, que foi o valor adotado de custo adicional para travessia de Unidades de Conservação.

5.1.3.9. Uso do solo

Este componente está relacionado basicamente aos custos de “indenização”, relativos a utilização de terras da faixa de servidão, e pela limpeza desta faixa e pelas obrigações de recomposição de vegetação nos casos de supressão de fragmentos florestais na faixa de limpeza.

A largura da faixa de servidão foi adotada em 40 metros, de acordo com o Relatório Ambiental Simplificado da Implantação da Linha de Transmissão Vila do Conde – Santa Maria (ERTE, 2003b).

A limpeza de terreno não é feita para toda a faixa de servidão. De acordo com ERTE (2003b) para o trecho de linha entre Vila do Conde e Castanhal foi previsto desobstrução do eixo central em uma faixa de 25m. Já nas áreas com restrições ambientais, em áreas de Preservação Permanente ou cruzamento com formações florestais, o desmatamento, destocamento e limpeza no eixo central da faixa de servidão são reduzidos em até uma largura mínima de 5 metros. Para área urbana e solo exposto este valor foi adotado como nulo, já que nestes não há custos de limpeza do terreno.

Os custos de indenização para as classes vegetação rasteira, fragmentos florestais e solo exposto foram obtidos na Base de Preços de Referência da ANEEL (2013) - Orçamento de Linha de Transmissão, no item Terrenos e Servidões. Já para áreas urbanas, o valor de indenização representa realmente os custos de desapropriação e ressarcimento das benfeitorias. Para isso, foi feita pesquisa de preços, em sítios eletrônicos de imobiliárias, para lotes com edificações em áreas residenciais da região estudada. Um valor médio de 388 R\$/m² foi obtido. O custo de limpeza (supressão da vegetação para lançamento dos cabos) para vegetação arbórea foi fixado em 2,35 R\$/m², e para limpeza de áreas com vegetação rasteira foi utilizado valor de referência da ANEEL para região norte (ANEEL, 2013). Os custos de recomposição de vegetação são aplicados apenas para a classe fragmentos florestais, em que há a necessidade de recomposição da vegetação suprimida. A área a ser recomposta é determinada durante o licenciamento do empreendimento em que esta área é determinada com base nas características do bioma local, estágio sucessional da vegetação a ser suprimida dentre outros aspectos. Neste

caso um valor típico adotado foi a proporção 1:1, já que esta classe aborda apenas os fragmentos florestais sem caracterizá-lo. O custo de recomposição foi obtido pela atualização de valores indicados por HAHN *et al.* (2004) que aborda os custos da recuperação florestal referentes à limpeza do terreno, controle de pragas e vegetação competitiva, preparo do solo, atividades de plantio, controle de pragas e vegetação competitiva após plantio, replantios, insumos e o custo do projeto.

Para a classe fragmentos florestais foi considerado ainda o custo adicional da utilização de torres tipo SESP, que são torres mais altas utilizadas para travessia de áreas de floresta, utilizadas na LT Vila do Conde – Castanhal.

Considerando todos os aspectos supracitados, o custo adicional em relação a utilização de torres tipo S02 resulta em 168.630,20 R\$/km.

A seguir (Tabela 10) os resultados de custos reais estimados por km para cada uma das classes de uso do solo.

Tabela 10: Custos obtidos para as classes da variável Uso do Solo.

Classe de uso do solo	Faixa de limpeza (m)	Custo indenização (R\$/m ²)	Custo limpeza (R\$/m ²)	Custo recomposição (R\$/m ²)	Custo por km
Vegetação rasteira	25	0,0813	0,42	-	13.752,00
Fragmentos florestais	5	0,0813	2,35	2,05	168.630,20*
Água	-	-	-	-	-
Áreas urbanas	0	388,15	-	-	15.525.926,00
Solo exposto	0	0,0813	-	-	3.252,00

* Este valor inclui o custo adicional da utilização de torres tipo SESP.

5.2. Pesos AHP

Na determinação dos pesos pelo AHP (Tabela 11), o critério com maior valor de peso foi o critério relacionado a largura da hidrografia, isso porque os custos para travessia de rios com largura significativa são elevados, principalmente quando há a necessidade de construção de torres na calha do rio. Áreas de aeroportos também são importantes em relação a aspectos econômicos em virtude da necessidade de construção de linhas subterrâneas. Destaca-se ainda as áreas alagadas, pela necessidade de construção de fundações especiais para estes tipos de terreno.

Tabela 11: Resultados da aplicação do AHP para determinação dos pesos.

Critério	Classes	Pesos AHP			
		Peso da variável (PV)	Peso	Peso da classe (PC) ¹	PESO FINAL (PV*PC)
Aeroportos	Presença	13,8	100	100	1.380,00
	Ausência		0	0	0,00
Áreas alagadas	Presença	13	100	100	1.300,00
	Ausência		0	0	0,00
Áreas de Preservação Permanente	APP com vegetação rasteira	4,4	20	25	110,00
	APP com fragmentos florestais		80	100	440,00
	Ausência		0	0	0,00
Hidrografia	² Menor que 500m	39,4	-	-	568,60
	500-900m		15	17,65	695,29
	900-1800m		85	100,00	3.940,00
	³ Maior que 1800m		-	-	10 ⁹
	Ausência		0	0	0,00
Rios Navegáveis	Presença	7,2	100	100	720,00
	Ausência		0	0	0,00
⁴ Sistema Interligado Nacional	Presença	-2,8	100	100	-280,00
	Ausência		0	0	0,00
Unidades de Conservação	Presença	12,1	100	100	1.210,00
	Ausência		0	0	0,00
Uso do Solo	Vegetação rasteira	3,2	5,3	8,32	26,62
	Fragmentos florestais		25,6	40,19	128,60
	Água		0	0,00	0,00
	Áreas urbanas		63,7	100,00	320,00
	Solo exposto		5,3	8,32	26,62
Estruturas	Estruturas	4	100	100	400

¹ Peso da classe em escala de 0-100. Procedimento importante, pois o número de classes é variável para os critérios, isso evita que os pesos finais sejam subestimados para critérios com grande número de classes.

² Para classe hidrografia com largura menor que 500 metros foi atribuído valor de peso igual à soma das classes vegetação arbórea e APP com fragmentos florestais, dos critérios Uso do solo e Áreas de Preservação Permanente respectivamente. Isso porque esta faixa de largura não exige modificações técnicas, não havendo custo adicional para travessia de rios com essa largura, mas não se pode atribuir valor de peso nulo pois isso geraria um caminho preferencial para o algoritmo de busca, e as áreas de borda da hidrografia são áreas de APP geralmente ocupadas com vegetação arbórea.

³ Esta classe é considerada como impeditivo, dessa forma seu valor é fixado como um valor em ordem de grandeza muito maior que a ordem de grandeza média dos demais pesos.

⁴ Este critério é considerado como atrator (gera redução de custos), ao contrário dos demais critérios que são repulsores, por isso foi adotado valor negativo.

5.3. Comparação dos valores de rugosidade

Os valores de rugosidade das superfícies geradas foram normalizados (Tabela 12) pelo valor máximo e pela média. A rugosidade normalizada pela média foi multiplicada por 1.000 enquanto que a rugosidade normalizada pelo valor máximo foi multiplicada por 10.000.

Os valores normalizados pelo valor máximo permitem uma melhor comparação da dispersão dos dados para ambas superfícies de rugosidade (Figura 19). É possível verificar a menor dispersão dos valores obtidos pela aplicação do AHP. Fato verificado pelo coeficiente de variação de Pearson, que para os valores monetários (Custo) assume valor de 3,08 enquanto

para os valores AHP o coeficiente de variação assumiu valor de 1,39. Esta diferença evidencia a melhor representatividade dos critérios por meio da utilização de valores monetário, enquanto o método AHP tende a gerar valores mais próximos da média, o que dificulta a representatividade de variáveis com significativa importância, ou peso, no estudo de roteamento. Isso pode ser verificado, por exemplo, pela classe áreas urbanas, do critério uso do solo, que em virtude dos custos elevados de indenização (compra de terrenos de faixa de servidão) de áreas urbanas assume valor bastante alto, enquanto que para o método AHP essa classe apresentou valor relativamente mais baixo (Tabela 12 – Valores normalizados pela média).

Tabela 12: Valores de rugosidade normalizados.

Variável	Classes	Nº	(Valor/máximo)x10 ⁴		(Valor/média)x10 ³	
			Custo	Pesos AHP	Custo	Pesos AHP
Aeroportos	Presença	1	1119	3503	1349	1884
Áreas alagadas	Presença	2	90	3299	108	1775
Áreas de Preservação Permanente	APP com vegetação rasteira	3	10	279	12	150
	APP com fragmentos florestais	4	7	1117	8	601
Hidrografia	Menor que 500m	5	115	1443	139	776
	500-900m	6	242	1765	291	949
	900-1800m	7	442	10000	533	5380
Rios Navegáveis	Presença	8	130	1827	157	983
SIN	Presença	9	-4	-711	-5	-382
UCs	Presença	10	16	3071	19	1652
Uso do Solo	Vegetação rasteira	11	9	68	11	36
	Fragmentos florestais	13	109	326	131	176
	Áreas urbanas	14	10000	812	12053	437
	Solo exposto	15	2	68	3	36
Estruturas	Estruturas	16	160	1015	193	546
Coefficiente de variação de Pearson			3,08	1,39	3,08	1,39

*Como o objetivo da representação dos valores de custo e pesos AHP em uma mesma escala é evidenciar a amplitude dos valores para ambas formas de avaliação multicritério, os valores que por definição são nulos (classes Ausência e classe água do Uso do Solo) e valores inseridos artificialmente (valores impeditivos para a classe de rios com largura maior que 1800 metros) não foram considerados para esta análise.

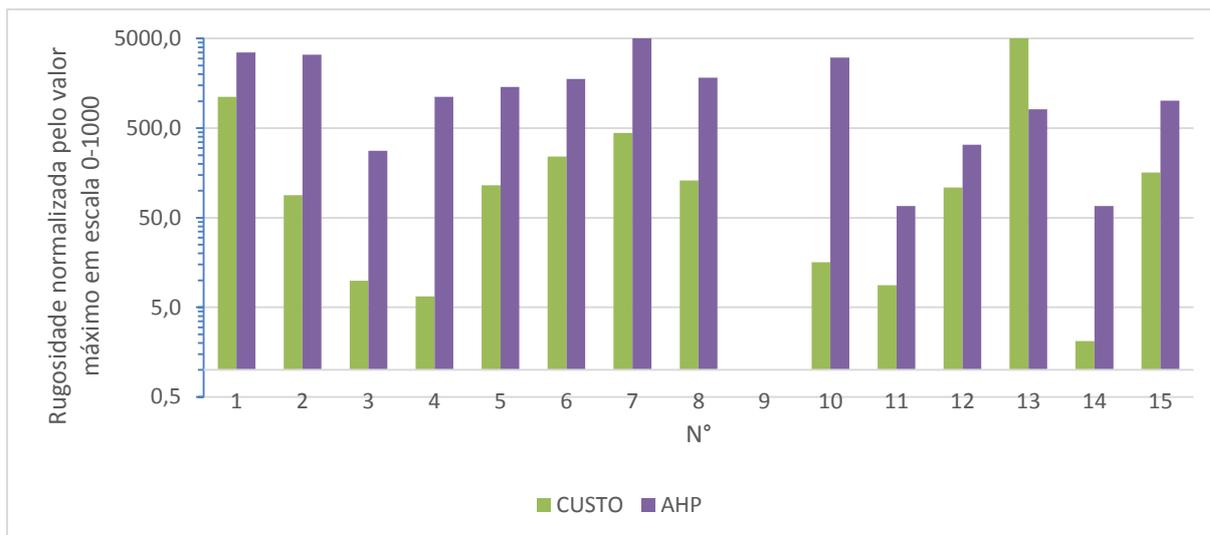


Figura 19: Representação gráfica dos valores de rugosidade normalizados pelo valor máximo.

Esta primeira análise dos pesos foi feita para avaliação da eficiência do método de avaliação multicritério (AHP e atribuição de valores monetários) na ponderação de cada um dos critérios. Ou seja, a eficiência da representação dos custos adicionais de travessia de cada um dos critérios. Mas, a avaliação da real importância de cada um dos critérios para a determinação do melhor traçado não pode ser feita apenas pela análise dos pesos atribuídos, pois, a localização e abrangência espacial das feições geográficas de cada um dos critérios é de suma importância na definição do traçado. Critérios de ampla distribuição espacial, ou seja, aqueles que ocupam grandes porções da área de estudo com feições distribuídas de forma homogênea em toda área, como o critério estruturas e uso do solo, possuem grande influência na linearidade do traçado. Entretanto, aqueles critérios bem localizados, de certa forma mais pontuais, ou lineares, como os critérios aeroportos, áreas urbanas, ou hidrografia, tem influência localizada e o valor de peso associado deverá determinar se as feições serão contornadas ou atravessadas. Esses detalhes são discutidos no tópico seguinte.

5.4. Otimização de traçado - *least cost path*

As superfícies de rugosidade (Figura 20 e Figura 21) obtidas por meio da soma dos arquivos, em formato *raster*, de cada critério, evidenciam as diferenças no método de avaliação multicritério, já discutidas no item Comparação dos Valores de Rugosidade (Item 5.3). Destaca-se aqui as áreas de APP e manchas urbanas na porção norte da área de estudo. Na superfície de valores monetários as manchas urbanas aparecem com vermelho mais intenso, enquanto que as áreas de APP são pouco evidentes nessa superfície, ocorrendo comportamento contrário para a superfície de pesos AHP.

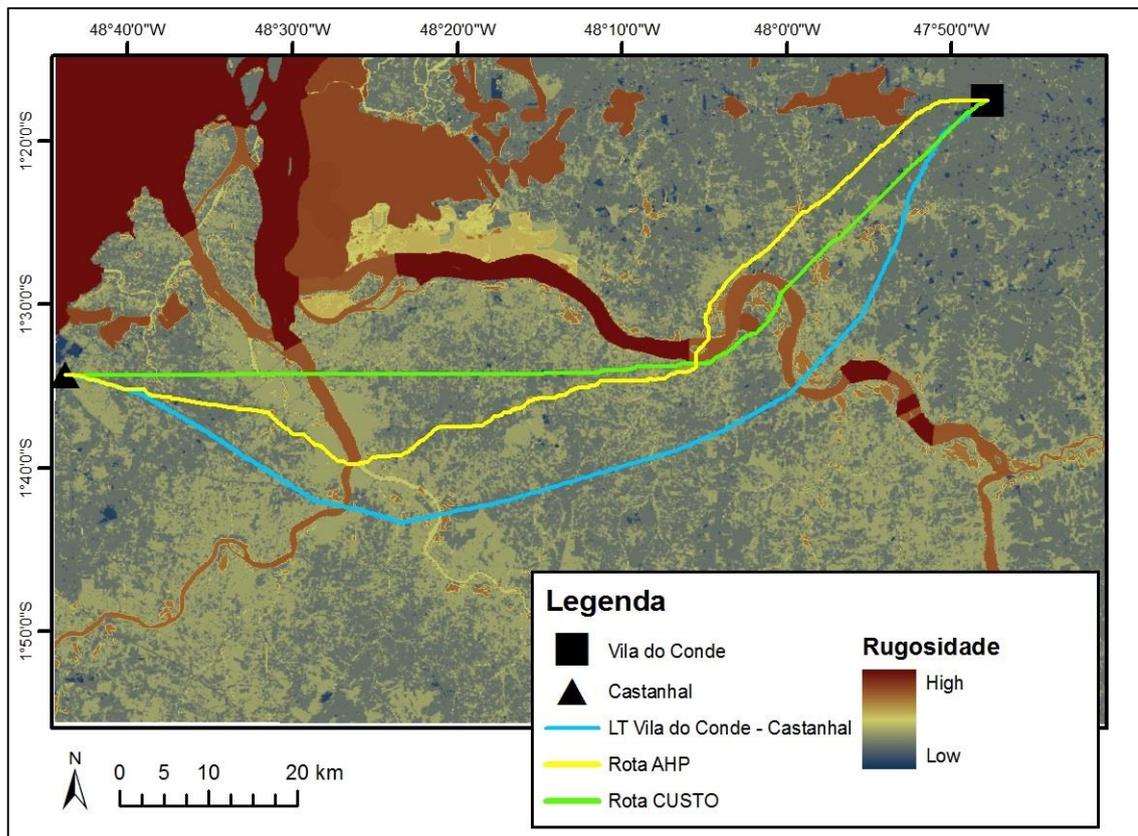


Figura 20: Rotas geradas sobrepostas a superfície de rugosidade de valores monetários.

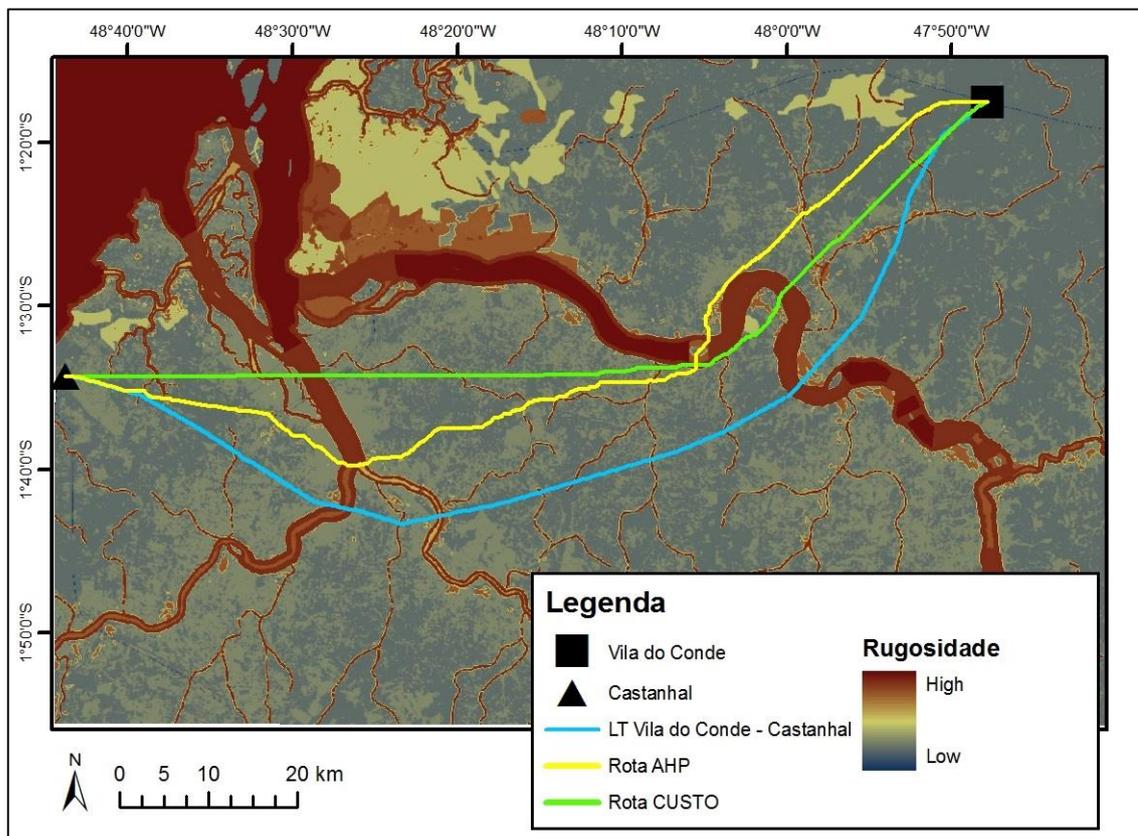


Figura 21: Rotas geradas sobrepostas a superfície de rugosidade de pesos AHP.

Para cada uma das superfícies de rugosidade (Valores monetários e Pesos AHP), é gerada uma superfície de rugosidade acumulada e com base nesses arquivos são geradas as rotas (Figura 22 e Figura 23). Nota-se claramente na representação espacial das superfícies de rugosidade a metodologia utilizada pela função de acumulação (algoritmo de Dijkstra) em que os valores mais baixos são encontrados próximos ao ponto final da rota e a partir desse ponto os valores aumentam radialmente. É possível verificar ainda a classe da hidrografia determinada como impeditivo (trechos da hidrografia com largura maior que 1.800 metros), em que as feições se apresentam em vermelho mais escuro.

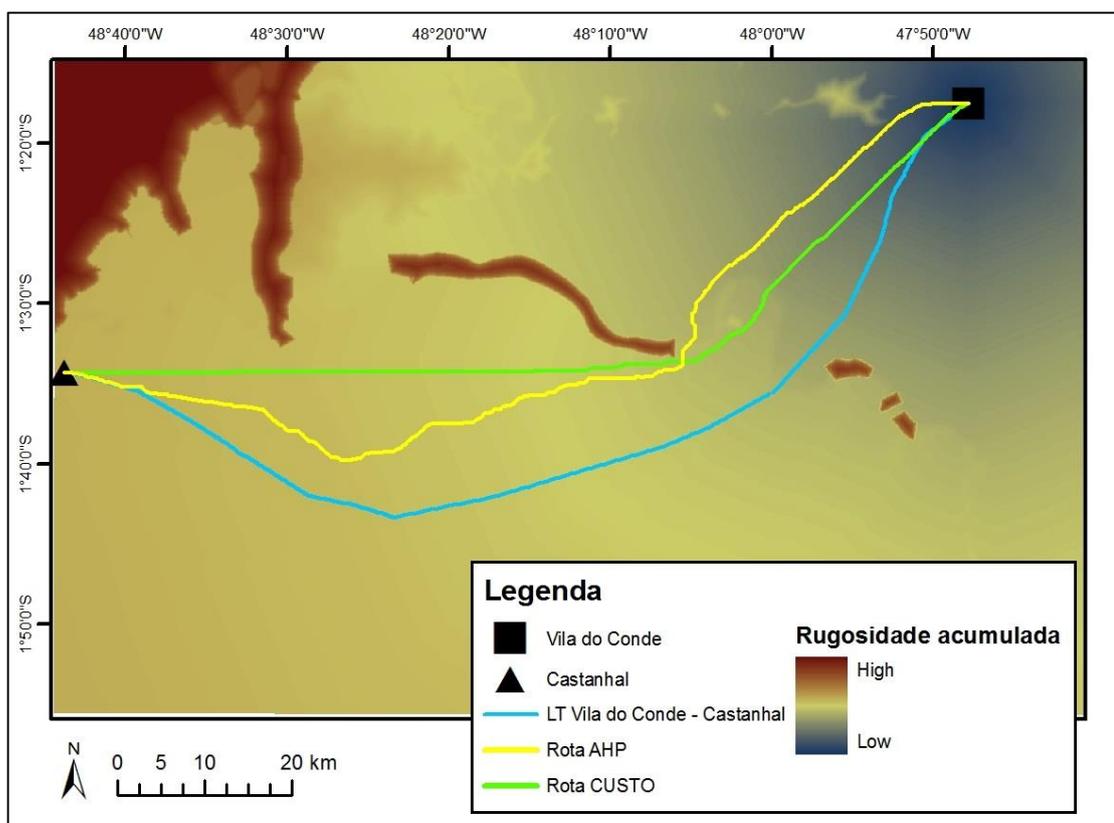


Figura 22: Rotas geradas sobrepostas a superfície de rugosidade acumulada de valores monetários.

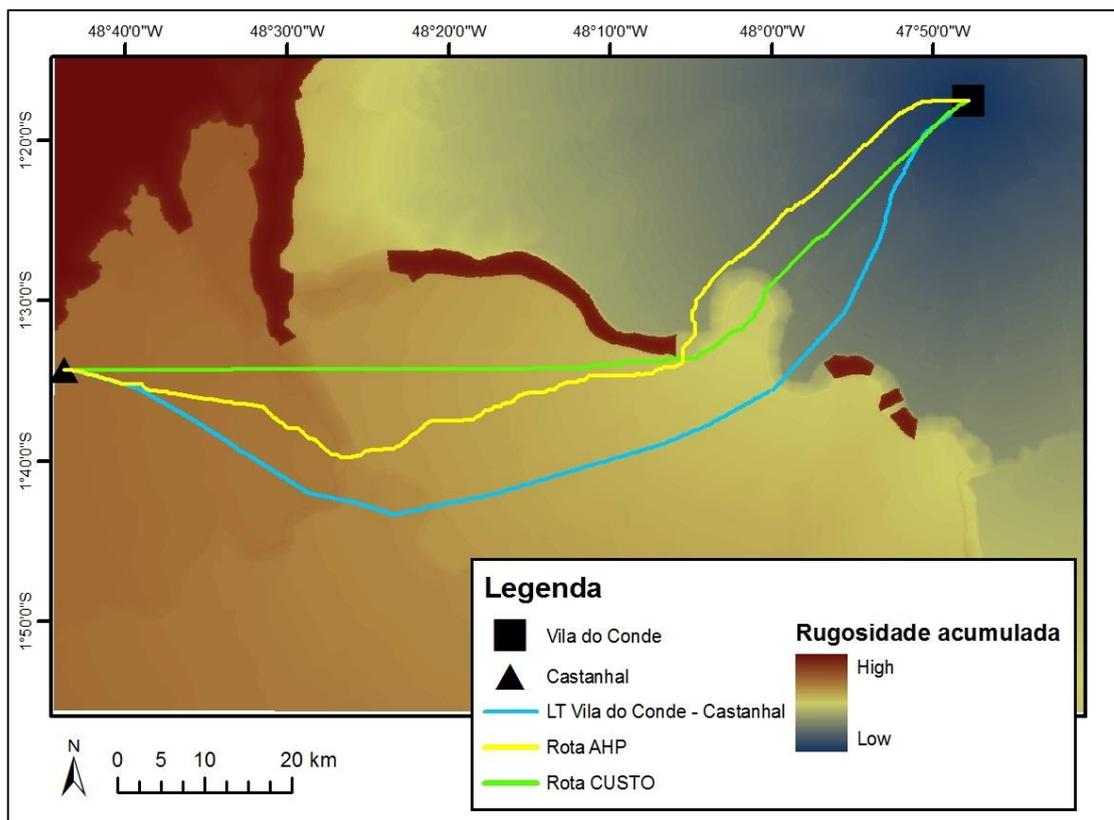


Figura 23: Rotas geradas sobrepostas a superfície de rugosidade acumulada de pesos AHP.

As rotas geradas foram comparadas em relação ao custo total (pela sobreposição a superfície de valores monetários) e ao comprimento total (Tabela 13).

Tabela 13: Custo total (sobreposição a superfície de valores monetários) e comprimento das rotas geradas e LT Vila do Conde - Castanhal.

Rota	Custo total [R\$]	Comprimento [km]
Valores monetários	33.421.068,32	118
Pesos AHP	35.913.590,96	130
LT Vila do Conde - Castanhal	37.900.077,43	138

A rota obtida pela superfície de valores monetários apresentou-se mais linear e com o menor valor de comprimento. Este resultado pode ser evidenciado predominantemente por dois critérios, os valores de peso atribuídos a eles e distribuição espacial de suas feições. Este são: estruturas, que teve maior influência na linearidade, e hidrografia, com influência nos ponto de travessia e consequentemente no comprimento total do traçado.

O critério estruturas é o critério que tem maior influência na linearidade do traçado em função de sua ampla distribuição espacial, já que é uma superfície de valor único com cobertura total da área de estudo. A princípio, a análise dos valores de peso normalizados (tabela 12),

indica que o critério estruturas apresenta uma maior significância para o conjunto de pesos AHP, o que contraria os resultados de traçado, em que a rota gerada utilizando os pesos AHP se mostrou mais sinuosa que a rota gerado com base na ponderação por valores monetários. Mas a análise da importância dos critérios no traçado não pode ser feita apenas pela avaliação do peso associado, mas também deve ser considerada a distribuição espacial dos critérios. Neste caso, se o cálculo dos pesos normalizados pelo valor máximo for feito sem consideração de áreas urbanas e aeroportos, que receberam os pesos mais altos e possuem feições geográficas mais localizadas e com uma certa distância linha de direção preferencial dos traçados, os valores encontrados para os critérios estruturas resultam em 3.116 e 1.015 (Tabela 14) para os conjuntos de valores monetários e pesos AHP respectivamente, evidenciando a importância do critério estruturas na linearidade do traçado.

Tabela 14: Conjunto de valores de rugosidade normalizados, excluindo-se os valores para áreas urbanas e aeroportos.

Variável	Classes	Nº	(Valor/máximo)x10 ⁴	
			Custo	Pesos AHP
Aeroportos	Presença	1	-	-
Áreas alagadas	Presença	2	2.024	3.299
Áreas de Preservação Permanente	APP com vegetação rasteira	3	224	279
	APP com fragmentos florestais	4	149	1.117
Hidrografia	Menor que 500m	5	2.605	1.443
	500-900m	6	5.461	1.765
	900-1800m	7	10.000	10.000
Rios Navegáveis	Presença	8	2.938	1.827
SIN	Presença	9	-100	-711
UCs	Presença	10	362	3.071
Uso do Solo	Vegetação rasteira	11	200	68
	Fragmentos florestais	13	2.456	326
	Áreas urbanas	14	-	-
	Solo exposto	15	47	68
Estruturas	Estruturas	16	3.616	1.015

Já em relação ao critério hidrografia, o traçado gerado a partir dos pesos AHP atravessou a hidrografia em trechos mais estreitos, por um caminho mais longo (Figura 24). A análise da tabela 14 indica que para as classes de hidrografia de 900 a 1.800 metros de largura a significância é correspondente para ambas superfícies de rugosidade, e para as outras classes da hidrografia a significância é maior para o conjunto de valores da superfícies de valores monetários. Esta primeira avaliação indica que o comportamento contrário do traçado em relação aos pesos atribuídos. Entretanto, é possível perceber que os valores de rugosidade normalizados para o critério APP são maiores para a superfície de pesos AHP, critério também significativo para determinação dos pontos de travessia da hidrografia. Isso, em conjunto com a menor importância do critério estruturas para a superfície de pesos AHP, fez com que o

traçado para esta superfície atravessasse a hidrografia em trechos de menor largura, mais por um caminho mais longo.

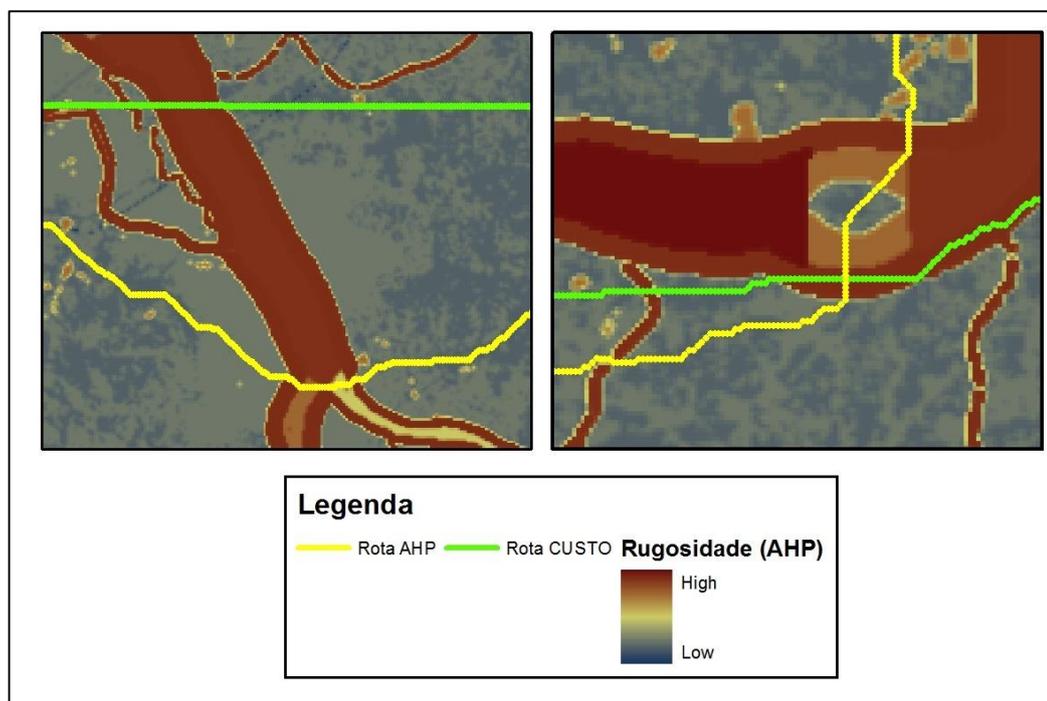


Figura 24: Comparação de pontos de travessia da hidrografia pelas rotas de valores monetários e pesos AHP

Em comparação a LT instalada, a direção preferencial dos traçados e os custos mais baixos das rotas geradas, indicaram potencialidade de aplicação da metodologia em relação ao método tradicional de definição de traçado aplicado para esta linha, realizada pela avaliação manual das feições geográficas mais importantes, sem a utilização de técnicas de avaliação multicritério para roteamento.

6. CONCLUSÕES

Em relação às metodologias para ponderação dos critérios utilizados, o método AHP, que determina os pesos de forma qualitativa, se mostrou menos eficaz na representação da importância dos critérios, em relação a determinação de valores monetários, que avalia os critérios de forma quantitativa. Isso acontece principalmente em relação aos critérios com significativa influência nos objetivos do estudo, ou seja, aqueles critérios que possuem grande influência no custo de implantação de uma LT, como travessia de áreas urbanas. Essa menor capacidade de representação de valores extremos pelo AHP pode ser verificada pelo coeficiente de variação de Pearson, que assumiu um valor de 1,39 para conjunto de pesos AHP enquanto que para os valores monetários o coeficiente de variação de Pearson foi de 3,08. Estes resultados indicam que os pesos AHP tendem a se aproximar mais do valor médio, não havendo boa representação daqueles critérios com significativa importância. Neste sentido, a utilização de valores monetários, apesar de demandar maior trabalho e apresentar maior dificuldade técnica na determinação dos custos, se mostrou mais atrativa para planejamento de linhas de transmissão, tanto em função da melhor representação da importância de cada critério, quanto pela vantagem de ser possível gerar valores “reais” de custo de implantação de uma LT e pela possibilidade de comparação de custos com outras rotas geradas por outras metodologias.

A seleção dos critérios considerados é feita a partir das particularidades da área de estudo. Dessa forma, alguns critérios não considerados neste trabalho podem ser importantes para outras áreas de estudo, com destaque para: Comunidades quilombolas e terras indígenas, não consideradas para este trabalho por não estarem presentes na área de estudo, devem ser sempre consideradas em função de suas fragilidades e grande importância social, cultural e ambiental; a malha rodoviária também pode ser considerada como um critério, pois a abertura de acessos para implantação de linhas de transmissão é um fator importante, então, a malha rodoviária pode ser considerada como um atrator na definição do traçado.

Destaca-se ainda a possibilidade de utilização de mapa geotécnico. Para este trabalho, a determinação dos custos dos critérios, para as fundações, foram atribuídos valores médios de custo, determinados de acordo com a ocorrência média das diferentes fundações na LT Vila do Conde – Castanhal. Sugere-se então que em estudos futuros, mapeamentos geotécnicos sejam considerados como critério para roteamento, o que garantiria uma melhor estimativa dos custos totais da rota, além da possibilidade de evitar locais com características geotécnicas muito ruins. Mas, considerar este critério nos estudos de roteamento exigirá modificação na metodologia de

determinação de rotas de menor custo (Algoritmo de Dijkstra). Isso deve ocorrer porque este critério de fundação assumirá um valor diferente para cada um dos critérios, pois o mesmo, além de ser determinado em função das características geotécnicas do solo, também é variável em função do tipo de torre utilizada. Portanto, deve ser considerada uma metodologia de roteamento que possibilite inserir operações condicionais no algoritmo de busca. Modificações na metodologia também devem permitir a avaliação de questões estritamente técnicas no roteamento, principalmente ângulo de deflexão, pois em locais de mudança de direção significativas há necessidade de utilização de torres mais robustas (torres autoportantes, apenas de suspensão para pequenos ângulos ou de ancoragem para ângulos mais significativos). Outro detalhe que exige modificações na metodologia de otimização de traçado, é a forma como os custos são considerados para determinação das rotas otimizadas. Com o algoritmo de Dijkstra, os custos são avaliados em unidade de custo por unidade de distância (R\$/km), mas podem haver critérios em que a simples travessia de uma feição gera um custo adicional no total da linha, independentemente do comprimento de sobreposição, o que acontece com o critério Unidades de Conservação.

De uma forma geral, a metodologia de otimização de traçado proposta, com a utilização do software QGIS, se mostrou eficiente e as duas rotas geradas (a partir da ponderação dos critérios por pesos AHP e valores monetários) apresentaram valores de custo e comprimento total menores que a LT Vila do Conde – Castanhal. Isso indica a potencialidade e vantagem da utilização da metodologia proposta para planejamento de linhas de transmissão em relação às metodologias tradicionais, em que o traçado é definido por avaliação manual das feições geográficas importantes, sem a utilização de técnicas de avaliação multicritério e ferramentas SIG mais avançadas. Neste contexto, a aplicabilidade da metodologia proposta se insere na fase de planejamento, antes da elaboração do projeto executivo, em que são avaliados dados em uma escala regional. Dessa forma, não é avaliada a locação das torres da linha de transmissão, o que deve ser feito na elaboração do projeto executivo, em que dados mais detalhados são avaliados para dimensionamento das estruturas, como dados de sondagens e topografia. Além disso, destaca-se a aplicação da metodologia para avaliação de diferentes alternativas de traçado, em que a comparação dos traçados pode ser feita utilizando a superfície de custo monetário para avaliação dos custos totais para diferentes traçados. Esta possibilidade pode ser bastante útil pelas transmissoras para determinação de valor para lances em leilões de transmissão além da avaliação de atratividade dos lotes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5422, de Fevereiro de 1985. Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica.
- ADAMCSEK, E. The Analytic Hierarchy Process and its Generalizations. Thesis, **Eötvös Loránd University**. 2008.
- ANA. **Agência Nacional das Águas**. Hidroweb – Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=4100>>. Acesso em julho de 2013.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Banco de Informações de Geração – BIG – Capacidade de Geração do Brasil, atualizado em 16/02/2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em fevereiro de 2015.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Base de Preços de Referência 06/2013 – Orçamento de Linha de Transmissão, 2013.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Editais de transmissão. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=54>>. Acesso em: Abril de 2015.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Resolução normativa nº 67, de 8 de junho de 2004. Estabelece critérios para a composição da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, e dá outras providências. ANEEL, 2004.
- ASHCAR, R. Recomendações e informações técnicas sobre fundações de linhas de transmissão. **VIII ERLAC**. Cidade do Leste, Paraguai, 1999.
- ASPECTOS gerais da transmissão em CC e CA. PUC-Rio – Certificação digital nº 0913481/CA. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/17889/17889_4.PDF>. Acesso em Julho de 2014.
- ATKINSON, D. M.; DEAFMAN, P.; DUDYCHA, D.; TRAYNOR, S. Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an artic all-weather road. **Applied Geography**. 25, p. 287-307, 2005.
- BAGLI, S.; GENELETTI, D.; ORSI, F. Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimize environmental impacts. **Environmental Impact Assessment Review**. 31, p. 234-239, 2011.
- BITENOURT, R. Aneel quer elevar remuneração de novas linhas de transmissão para 7,8%. **Valor Econômico**. Versão on-line, 06/02/2015. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/brasil/3897708/aneel-quer-elevar-remuneracao-de-novas-linhas-de-transmissao-para-78>>. Acesso em: 11/05/2015.
- BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos, I,II,III e IV da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm>. Acesso em: janeiro de 2014.
- BRASIL. **Decreto nº 7.154, de 9 de abril de 2010**. Sistematiza e regulamenta a atuação de órgãos públicos federais, estabelecendo procedimentos a serem observados para autorizar e realizar estudos de aproveitamentos de potenciais de energia hidráulica e sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica no interior de unidades de conservação bem

como para autorizar a instalação de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica em unidades de conservação de uso sustentável. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7154.htm>. Acesso em: Maio de 2015.

BRASIL. Lei 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>.

CÂMARA, G. e QUEIROZ, G. R. Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. In: Geoprocessamento: Teoria e Aplicações, livro: Introdução à Ciência da Geoinformação. Atualizado em 04/06/2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>>. Acesso em: Janeiro de 2015.

COLLISCHONN, W. e PILAR, J. V. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. **International Journal of Geographical Information Science**. vol. 14. Nº 4, p. 397-406. 2000.

CUNHA, L. Padrões Brasileiros. Editorial, **O Setor Elétrico**. Edição 49, fevereiro de 2010. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/244-padroes-brasileiros.html>>. Acesso em julho de 2014.

CYPE Ingenieros, S.A. Gerador de preços para construção civil. Brasil. disponível em <http://www.brasil.geradordeprecos.info/>. Acesso em: novembro de 2014.

DEDEMEN, Y. A multi-criteria decision analysis approach GIS-based route selection for overhead power transmission lines. A thesis submitted to the graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, in partial fulfillment the requirements for the Degree of Master of Science in Geodetic and Geographic Information Technologies. 2013.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connection with graphs. **Numerische Mathematik**. 1, 269 -271, 1959.

EPTE (Engenharia e Planejamento em Transmissão de Energia). Portaria municipal SVMA n.º 80 regulamentação do licenciamento de linhas de transmissão de energia elétrica no município de São Paulo. Disponível em: <<http://www.epte.com.br/portaria80.html>>. Acesso em Julho de 2013.

ERTE – **Empresa Regional de Transmissão de Energia S.A.** Listas Construtivas. Implantação de Linha de Transmissão Vila do Conde – Castanhal - Santa Maria – 230 kV, 2003a.

ERTE – **Empresa Regional de Transmissão de Energia S.A.** Relatório Ambiental Simplificado – RAS. Implantação de Linha de Transmissão Vila do Conde – Castanhal -Santa Maria – 230 kV, 2003b.

ERTE – **Empresa Regional de Transmissão de Energia S.A.** Critérios para o Projeto de Locação de Estruturas. TUC – 808 – 30002 – RE. 2003c.

ERTE – **Empresa Regional de Transmissão de Energia S.A.** Critérios gerais para projeto de fundações. TUC – 808 – 30002 – RE. 2003d.

- ESRI. Creating a cost surface raster, ArcGIS Help 10.1. 2012. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Creating_a_cost_surface_raster/009z0000001z000000/>. Acesso em: Janeiro de 2015.
- EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**. Diretrizes para elaboração dos relatórios técnicos referentes às novas instalações da rede básica. Rio de Janeiro, maio de 2005.
- ETHERINGTON, T. R. Least-cost modelling on irregular landscape graph. **Landscape Ecology**, 27:957 – 968. Abril de 2012.
- FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão. **Editora Edgar Blücher**, São Paulo, 1982.
- GOPEL, K. D. BPMSG AHP Excel Template with multiple Inputs. Version 12.08.2013. AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs). 2013. Disponível em: <<http://bpmsg.com/new-ahp-excel-template-with-multiple-inputs/>>. Acesso em: Junho de 2013.
- GROSS, E. T. B. Overhead Line Conductor Types. In: Electric Power Transmission: The Power System in the Steady State. **The Rensselaer Bookstore** – Troy, N.Y. 1969.
- HAHN, C. M. **Recuperação florestal: da muda à floresta**. São Paulo: SMA, p.112. 2004.
- HAILONG LI et al. 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, p. 944-952, 2010.
- HOSSEINI, M.; BAHMANI, H. F. Evaluation and Routing of Power Transmission Lines by Using AHP Method and Genetic Algorithm. **IEEE Symposium on Computers & Informatics**, 2011.
- HUSAIN, F.; SULAIMAN, N. A.; HASHIM, K. A.; SAMAD, A. M. A Study on TNB Transmission Line Route Sustainability and Suitability Using GIS-AHP. **IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2012**. 2012a.
- HUSAIN, F.; SULAIMAN, N. A.; HASHIM, K. A.; SAMAD, A. M. Multi-Criteria Selection for TNB Transmission Line Route Using AHP and GIS. **International Conference on System Engineering Technology**, Bandung, Indonesia. 2012b.
- LABEGALINI, P.R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão. **Editora Edgard Blücher Ltda**. São Paulo, SP, 1992.
- LANDSAT 5 TM: Imagem de satélite. São José dos Campos: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Catálogo de Imagens. Cena 223-61 de 13/07/2008.
- LA RUE, M. A.; NIELSEN, C. K. Modelling potential dispersal corridors for cougars in Midwestern North America using least-cost path methods. **Ecological Modelling**. 212, p. 372-381. 2008.
- LEE, J. e STUCKY, D. On applying viewshed analysis for determining least-cost path on digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science**. Vol. 12, n° 8, p. 891-905. 1998.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. **Comando da Aeronáutica**, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ICA 63-19 de 2011.

- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 06 janeiro 2014.
- MIRANDA, J. I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília, DF, 2005. 425 p. ISBN 85-7383-293-2
- MMA – **Ministério do Meio Ambiente**. Unidades de Conservação do Brasil. Arquivos vetoriais no formato shapefile. 2014. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: janeiro de 2014.
- MMA – **Ministério do Meio Ambiente**. Portaria nº 421 de 2011. Dispõe sobre o licenciamento e a regularização ambiental federal de sistemas de transmissão de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: <[file:///C:/Users/IX/Downloads/port421_11%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/IX/Downloads/port421_11%20(1).pdf)>. Acesso em: Outubro de 2014
- MME. **Ministério de Minas e Energia**. Secretaria de Energia Elétrica, Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro. Dezembro de 2014.
- MME-EPE. **Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética**. Plano decenal de expansão de energia 2023. MME/EPE, 2014.
- MONTEIRO, C.; RAMÍREZ-ROSADO, I.; MIRANDA, V.; ZORZANO-SANTAMARÍA, P. J.; GARCÍA-GARRIDO, E.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, L. A. GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 20, nº 2, 2005.
- MP/MMA/MME – **Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão/Ministério do Meio Ambiente/Ministério de Minas e Energia**. Portaria Interministerial nº 37, de 3 de fevereiro de 2014.
- KIESSLING, F.; NEFZGER, P.; NOLASCO, J. F.; KAINZKYK, U. Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction. **Springer** – Verlag Berlin Heidelberg 2003.
- ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Conheça o Sistema. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/home/>>. Acesso em: Fevereiro de 2015.
- ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN. Apresentação Sumário Executivo. Outubro de 2014.
- PNLT - **Plano Nacional de logística e Transportes**. Base de Dados Georreferenciada, 2010.
- PNVNI. **Plano Nacional das Vias Navegáveis Interiores**. Gabaritos Propostos. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/Modal/Hidroviario/ESTATISTICA/Gabaritos.htm>>. Acesso em: Janeiro de 2014.
- ROY, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. **Theory and Decision**, volume 31, p. 49-73, 1991.
- SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. **Mathl Modelling**, Vol. 9, nº3-5, pp. 161-176, 1987.
- SAATY, T. L. Eigenvector and logarithmic least squares. **European journal of Operational Research**, vol. 48, 1990a.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, vol. 48, pp. 9-29, North-Holland, 1990b.

SAATY, T. L. Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of the Operation Research** 74, p. 426-477. 1994.

SAATY, T. L. Fundamentals of the Analytic Network Process. **International Symposium on the Analytic Hierarchy Process**. Kobe, Japan, August 12-14, 1999.

SAATY, T. L. & VARGAS, L. G. Comparison of eigenvalue, logarithmic least squares and least squares methods in estimating ratios. **Mathematical Modelling**, Vol. 5. Pp. 309-324, 1984.

SCHMIDT, A. J. Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines. **Papers in Resource Analysis**. Volume 11, 17pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. Winona, MN. 2009.

STAHL, C. W. Accumulated surfaces & least-cost paths: GIS modeling for autonomous Ground Vehicle (AGV) navigation. Tese submetida a *Virginia Polytechnic Institute and State University* como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Blacksburg, VA, maio de 2005. Disponível em:

<<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05262005-151814/unrestricted/thesisfinal.pdf>>.

Acesso em: Janeiro de 2015.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**. Vol. 169, pp. 1-29, 2006.

ZANAKIS, S. H.; SOLOMON, A.; WISHART, N.; DUBLISH, S. Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. **European Journal Operational Research** 107, 507-529. 1998.

8. ANEXOS

8.1. Anexo I: Custo de implantação de fundações ocorrentes na L.T. Vila do Conde-Castanhal.

Um mesmo tipo de fundação pode ser utilizado para diferentes tipos de solo e tipos de torre havendo diferenças apenas nas dimensões da fundação. Para o cálculo dos custos o fator determinante são os volumes de concretagem e escavação e implantação de estacas. Assim, para cada tipo de fundação e torre ocorrente em cada tipo de solo na LT Vila do Conde Castanhal foi calculado o custo de implantação com base nos volumes de concretagem, escavação e implantação de estacas. De posse desses dados, foi então calculado um valor médio para implantação de fundação de cada tipo de torre para cada tipo de solo e o valor estimado de custo de fundação para cada tipo de torre.

Custos de fundação por classe geotécnica de solo e tipo de torre					
Classe de solo	Ocorrência	Custos por fundação para cada tipo de torre [R\$]			
		S02	SAR	ESP	SESP
I	1,75%	2.404,95	13.598,88	36.716,98	23.778,08
II	41,26%	3.706,34	17.439,77	47.087,37	32.838,36
III	26,57%	6.345,49	23.823,61	64.323,74	40.190,03
IV	9,09%	7.825,73	26.298,92	70.796,85	46.623,37
V	21,33%	8.083,78	41.109,30	108.953,58	72.879,59
Custo estimado*		5.693,04	24.811,66	66.523,72	44.229,98

OBS.: Os valores em vermelho foram obtidos por diferença são para torres não ocorrentes nos específicos tipos de solo. As torres ESP e SESP, como são dimensionadas com base nas características geométricas das torres tipo SAR, os custos foram determinados pela diferença de custo em relação as torres tipo SAR para tipos de solos comuns.

*Os valores de ocorrência são relativos ao número de torres ocorrentes para cada classe geotécnica de solo, de acordo com as listas construtivas da LT Vila do Conde – Castanhal (ERTE, 2003a). Esses valores foram então utilizados para cálculo do custo estimado de fundação por tipo de torre, fazendo a média ponderada dos custos utilizando as ocorrências como pesos.

Custos unitários de material e mão de obra.	
Item	Custo
Estacas pré-fabricadas de concreto ¹	141,08 R\$/m
Concretagem ²	2.237,04 R\$/m ³
Escavação ²	50,4 R\$/m ³

¹ Preços para implantação de estacas pré-fabricadas de concreto considerando material e mão de obra, valores obtidos de (CYPE, 2014).

² Valores obtidos de ANEEL 2013. Os custos de concretagem compreendem o fornecimento e confecção de armaduras, fôrmas e desformas, assim como fornecimento e aplicação do concreto.

Custos de implantação por fundação ocorrente na LT Vila do Conde Castanhal.					
Fundação	Torre	Solo	Concreto[m³]	Escavação[m³]	Custo [R\$]
BLOCO PRE	S02	I	0,9	7,77	2.404,9
MOLDADO PARA	S02	II	1,37	12,73	3.706,3
ESTAIS E SAPATA	S02	III	2,34	22,04	6.345,5
PRÉ MOLDADA	S02	IV	2,78	31,88	7.825,7
PARA MASTROS	S02	V	2,78	37	8.083,8
SAPATA	SAR	III	2,34	14,31	23.823,6
	SAR	IV	2,39	15,61	24.533,1
	SAR	V	2,65	18,96	27.535,0
	SAR	V	3,35	28,28	35.677,6
	SAR	IV	2,67	20,7	28.064,7
	SESP	III	3,98	22,7	40.190,0
	SESP	IV	3,87	24,8	39.629,1
	ESP	IV	6,54	36,2	65.818,9
TUBULAO	SAR	I	1,49	1,32	13.598,9
	SAR	II	1,91	1,73	17.439,8
	SESP	I	2,61	2,1	23.778,1
	SESP	II	3,6	3,1	32.838,4
ESTACA	SAR	V	14,3	-	47.099,4
	SAR	V	13,7	-	45.757,1
	SAR	V	12,88	-	43.922,8
	SAR	V	12,75	-	43.632,0
	SAR	V	12,4	-	42.849,0
	SAR	V	12,2	-	42.401,6
	SESP	V	30,9	-	84.234,3
	SESP	V	32,9	-	88.708,3
	ESP	V	43,2	-	111.749,9
	ESP	V	41,5	-	107.946,9
ESP	V	39,5	-	103.472,8	
ESP	V	43,6	-	112.644,7	

OBS.: Os volumes de concreto e escavação foram obtidos das listas construtivas da LT Vila do Conde – Castanhal (ERTE 2003a). Os custos de implantação são determinados com base nos custos de concretagem e escavação considerando os volumes para cada tipo de fundação. Para as fundações em escavação os volumes de concreto são relativos as vigas e blocos de apoio as estacas e o custo é determinado por este volume de concreto mais o custo das estacas, considerando um valor médio de 107,1m de estacas por torre (ERTE 2003a).

8.2. Anexo II: Custos de implantação de LT para cada tipo de torre

Torres tipo S02

Item	Quantidade por torre		Custo unitário [R\$]	Preço por torre [R\$]	Preço por km ¹ [R\$/km]
	Valor	Unidade			
1 - Estruturas em aço	1.784,00 ²	kg/torre	6,00	10.704,00	23.786,67
2 – Isoladores ³	56	Unidade/torre	81,99	4.591,44	10.203,20
3 - Conjunto de suspensão cabo condutor ⁴	3	Unidade/torre	531,18	1.593,54	3.541,20
4 - Conjunto de suspensão do cabo para-raios ⁵	2	Unidade/torre	55,93	111,86	248,58
5 - Estaiamento	4	Unidade/torre	706,70	2.826,80	6.281,78
6 - Cabo condutor	8,4	ton/km	14.030,00	-	117.852,00
7 - Cabo para raio	1,38	ton/km	11.350,00	-	15.663,00
10 - Outros acessórios	0,3	% itens 1-9	-	-	532,73
11 - Inspeção de material e canteiro de obras	2	% itens 1-10	-	-	3.562,18
12 - Montagem das estruturas em aço	27,5	% item 1	-	-	6.541,33
13 - Instalação dos cabos condutores	15	% item 6	-	-	17.677,80
14 - Instalação dos cabos para-raios	50	% item 7	-	-	7.831,50
15 - Estudos de engenharia e administração	5	% itens 1-14	-	-	10.686,10
16 - Custos eventuais	5	% itens 1-15	-	-	11.220,40
17 – Fundação (Custo estimado)	1	Unidade	5.693,04	5.693,04	12.651,20
TOTAL SEM FUNDAÇÃO					235.628,47
Total com fundação					248.279,67

¹ Preço por km calculado considerando um vão médio de 450 metros (ERTE, 2003c).

² Peso médio das torres tipo S02 da LT Vila do Conde Castanhal (ERTE, 2003c).

³ Quantidade de isoladores calculada considerando utilização de duas cadeias tipo "I" (14 isoladores) e uma cadeia tipo "V" (2x14 isoladores).

⁴ Quantidade igual ao número de fases, neste caso 3.

⁵ Quantidade igual ao número de cabos para-raios, neste caso 2.

Torres tipo SAR

Item	Quantidade por torre		Custo unitário [R\$]	Preço por torre [R\$]	Preço por km ¹ [R\$/km]
	Valor	Unidade			
1 - Estrutura	6.549,63 ²	kg/torre	6	39.297,75	80.975,00
2 – Isoladores ³	56	Unidade/torre	81,99	4.591,44	9.460,89
3 - Conjunto de suspensão cabo condutor ⁴	3	Unidade/torre	531,18	1.593,54	3.283,57
4 - Conjunto de suspensão do cabo para raio ⁵	2	Unidade/torre	55,93	111,86	230,49
5 - Cabo condutor	8,4	ton/km	14.030,00	-	117.852,00
6 - Cabo para raio	1,38	ton/km	11.350,00	-	15.663,00
9 - Outros acessórios	0,3	% itens 1-8	-	-	682,39
10 - Inspeção de material e canteiro de obras	2	% itens 1-9	-	-	4.562,95
11 - Montagem das estruturas em aço	20	% item 1	-	-	16.195,00
12 - Instalação dos cabos condutores	15	% item 5	-	-	17.677,80
13 - Instalação dos cabos para-raios	50	% item 6	-	-	7.831,50
14 - Estudos de engenharia e administração	5	% itens 1-13	-	-	13.720,73
15 - Custos eventuais	5	% itens 1-14	-	-	14.406,77
16 - Fundação (Custo estimado)	1	Unidade	24.811,66	24.811,66	51.125,69
TOTAL SEM FUNDAÇÃO					302.542,10
Total com fundação					353.667,79

¹ Preço por km calculado considerando um vão médio de 485,31 metros, valor médio de vão das torres tipo SAR da LT Vila do Conde – Castanhal (ERTE, 2003c).

² Peso médio das torres tipo S02 da LT Vila do Conde Castanhal (ERTE, 2003c).

³ quantidade de isoladores calculada considerando utilização de duas cadeias tipo "I" (14 isoladores) e uma cadeia tipo "V" (2x14 isoladores).

⁴ quantidade igual ao número de fases, neste caso 3.

⁵ quantidade igual ao número de cabos para-raios, neste caso 2.

Torres tipo ESP

Item	Quantidade por torre		Custo unitário [R\$]	Preço por torre [R\$]	Preço por km ¹ [R\$/km]
	Valor	Unidade			
1 - Estrutura	20.544,57 ²	kg	6	123.267,40	136.963,78
2 - Isoladores ³	56	Unidade	81,99	4.591,44	5.101,60
3 - Conjunto de suspensão cabo condutor ⁴	3	Unidade	531,18	1.593,54	1.770,60
4 - Conjunto de suspensão do cabo para raio ⁵	2	Unidade	55,93	111,86	124,29
5 - Cabo condutor	8,4	ton/km	14.030,00	-	117.852,00
6 - Cabo para raio	1,38	ton/km	11.350,00	-	15.663,00
9 - Outros acessórios	0,3	% itens 1-8	-	-	832,43
10 - Inspeção de material e canteiro de obras	2	% itens 1-9	-	-	5.566,15
11 - Montagem das estruturas em aço	20	% item 1	-	-	27.392,76
12 - Instalação dos cabos condutores	15	% item 5	-	-	17.677,80
13 - Instalação dos cabos para-raios	50	% item 6	-	-	7.831,50
14 - Estudos de engenharia e administração	5	% itens 1-13	-	-	16.838,80
15 - Custos eventuais	5	% itens 1-14	-	-	17.680,73
16 - Fundação (Custo estimado)	1	Unidade	66.523,72	66.523,72	73.915,24
TOTAL SEM FUNDAÇÃO					371.295,43
Total com fundação					445.210,67

¹ Preço por km calculado considerando um vão de 900 metros (ERTE, 2003c)

² Peso médio das torres tipo ESP da LT Vila do Conde Castanhal (ERTE, 2003c).

³ quantidade de isoladores calculada considerando utilização de duas cadeias tipo "I" (14 isoladores) e uma cadeia tipo "V" (2x14 isoladores).

⁴ quantidade igual ao número de fases, neste caso 3.

⁵ quantidade igual ao número de cabos para-raios, neste caso 2.

Torres tipo SESP

Item	Quantidade por torre		Custo unitário [R\$]	Preço por torre [R\$]	Preço por km ¹ [R\$/km]
	Valor	Unidade			
1 - Estrutura	14.036,87 ²	kg/torre	6	84.221,23	162.582,52
2 - Isoladores ³	56	Unidade/torre	81,99	4.591,44	8.863,42
3 - Conjunto de suspensão cabo condutor ⁴	3	Unidade/torre	531,18	1.593,54	3.076,20
4 - Conjunto de suspensão do cabo para raio ⁵	2	Unidade/torre	55,93	111,86	215,94
5 - Cabo condutor	8,4	ton/km	14.030,00	-	117.852,00
6 - Cabo para raio	1,38	ton/km	11.350,00	-	15.663,00
9 - Outros acessórios	0,3	% itens 1-8	-	-	924,76
10 - Inspeção de material e canteiro de obras	2	% itens 1-9	-	-	6.183,56
11 - Montagem das estruturas em aço	20	% item 1	-	-	32.516,50
12 - Instalação dos cabos condutores	15	% item 5	-	-	17.677,80
13 - Instalação dos cabos para-raios	50	% item 6	-	-	7.831,50
14 - Estudos de engenharia e administração	5	% itens 1-13	-	-	18.669,36
15 - Custos eventuais	5	% itens 1-14	-	-	19.602,83
16 - Fundação (Custo estimado)	1	Unidade	44.229,98	44.229,98	85.382,52
TOTAL SEM FUNDAÇÃO					411.659,38
Total com fundação					497.041,91

¹ Preço por km calculado considerando um vão médio de 518,02 metros, valor médio de vão das torres tipo SAR da LT Vila do Conde – Castanhal (ERTE, 2003c).

² Peso médio das torres tipo SESP da LT Vila do Conde Castanhal (ERTE, 2003c).

³ quantidade de isoladores calculada considerando utilização de duas cadeias tipo "I" (14 isoladores) e uma cadeia tipo "V" (2x14 isoladores).

⁵ quantidade igual ao número de cabos para-raios, neste caso 2.

⁴ quantidade igual ao número de fases, neste caso 3.