



UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO  
UFRJ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE  
PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS**



**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DOS  
TRAÇADOS DE GASODUTOS E LINHAS DE  
TRANSMISSÃO E LOCALIZAÇÃO DE  
TERMELÉTRICAS A GÁS NATURAL**

Almir Beserra dos Santos

**TESE DE DOUTORADO**

Orientadora

ERIKA C. ASHTON NUNES CHRISMAN

Rio de Janeiro - Brasil

Setembro de 2019

**ALMIR BESERRA DOS SANTOS**

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DOS TRAÇADOS DE GASODUTOS E  
LINHAS DE TRANSMISSÃO E LOCALIZAÇÃO DE TERMELÉTRICAS A GÁS  
NATURAL**

Tese de doutorado submetida ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

Orientadora: Profa. **D.Sc. Erika Christina Ashton Nunes Chrisman**

Rio de Janeiro - Brasil

2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

### CIP - Catalogação na Publicação

S237m Santos, Almir Beserra dos  
METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DOS TRAÇADOS  
DE GASODUTOS E LINHAS DE TRANSMISSÃO E LOCALIZAÇÃO  
DE TERMELETRICAS A GÁS NATURAL / Almir Beserra dos  
Santos. -- Rio de Janeiro, 2019.  
234 f.

Orientadora: ERIKA CHRISTINA ASHTON NUNES  
CHRISMAN.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Processos Químicos e  
Bioquímicos, 2019.

1. Gasoduto. 2. Termelétrica. 3. Linha de  
Transmissão. 4. Seleção de Rota. 5. Otimização. I.  
CHRISMAN, ERIKA CHRISTINA ASHTON NUNES, orient. II.  
Título.

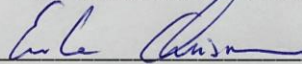
Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

ALMIR BESERRA DOS SANTOS

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DOS TRAÇADOS DE GASODUTOS E  
LINHAS DE TRANSMISSÃO E LOCALIZAÇÃO DE TERMELÉTRICAS A GÁS  
NATURAL**

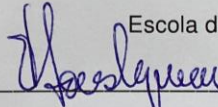
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA ESCOLA DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS (D.SC.).

Rio de Janeiro, 27 de setembro de 2019.

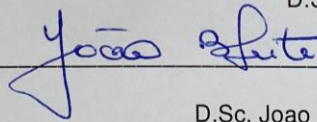


\_\_\_\_\_  
D.Sc. Erika Christina Ashton Nunes Chrisman (Presidente da Banca)

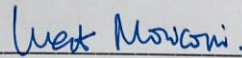
Escola de Química/UFRJ



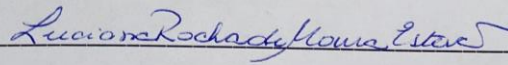
\_\_\_\_\_  
D.Sc. Eduardo Falabella



\_\_\_\_\_  
D.Sc. Joao Paulo de Barros Leite



\_\_\_\_\_  
D.Sc. Luca Moriconi



\_\_\_\_\_  
D.Sc. Luciana Rocha de Moura Estevão

Dedico este trabalho a todos aqueles que, mesmo sabendo das dificuldades e desafios, tem coragem para iniciar e persistência para concluir as tarefas difíceis que a vida nos oferece.

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho nessa difícil jornada.

Aos meus pais por estarem sempre perto de mim, para elogiar e criticar.

A minha esposa Sandra Santos, pelo apoio, por sempre estar ao meu lado e por tornar a minha vida feliz e humorada.

A minha filha Debora Santos, que é a pessoa que mais procuro inspirar.

Agradeço à Profa. D.Sc. Erika Christina Ashton N. Chrisman, minha orientadora desde a época do mestrado, pelos ensinamentos, conselhos e sobretudo pela paciência que teve para me apresentar inúmeras vezes a sua opinião e sua coerente visão sobre os melhores caminhos e alternativas que deveríamos seguir durante todas as etapas deste projeto.

Agradeço aos meus superiores na ANP, em especial ao José Cesário Cecchi e Helio da Cunha Bisaggio, por incentivarem a busca pelo aprimoramento (acadêmico e profissional).

Aos meus amigos da ANP, dentre eles o especialista Mario Jorge Figueira Confort, e todos os amigos da turma ERPD-2, pelo apoio e inspiração.

Aos meus colegas da EQ-UFRJ que foram meus parceiros durante as atividades em grupo, como práticas em laboratório ou elaboração e apresentação de trabalhos, especialmente ao Israel Bernardo de Souza Poblete, que me ajudou bastante no uso das ferramentas computacionais utilizadas na disciplina de Engenharia de Processamento de Gás Natural.

A todos os professores e funcionários da Escola de Química, pela presteza na orientação e nos esclarecimentos dos eventuais questionamentos efetuados.

Aos professores membros da banca do exame de qualificação, em especial a Heloisa Lajas Sanches e a Jacqueline Barboza Mariano, por me apresentarem, junto com minha orientadora, o caminho para o qual eu deveria direcionar o foco neste projeto.

Aos professores membros da banca examinadora pela avaliação e contribuição, em especial ao Luca Moriconi e a Luciana Rocha de Moura Estevão, pelos valiosos comentários.

A todos os amigos e familiares que sentiram minha falta durante esses anos em que me dediquei na realização deste projeto.

Resumo da tese apresentada à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

## **METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DOS TRAÇADOS DE GASODUTOS E LINHAS DE TRANSMISSÃO E LOCALIZAÇÃO DE TERMELÉTRICAS A GÁS NATURAL**

Almir Beserra dos Santos

Orientadora: D.Sc. Erika Christina Ashton Nunes Chrisman

A importância de investigar o planejamento relacionado com projetos de geração termelétrica decorre do fato de que os setores do gás natural e da energia elétrica, seja no Brasil ou em outros países, guardam relevante correlação entre si e com outros setores da economia. No caso do Brasil, os planejamentos de empreendimentos de geração de energia elétrica envolvendo esses setores nem sempre foram realizados de forma casada. Alguns exemplos das ineficiências desse descompasso são o aumento dos custos com a aquisição de terrenos da faixa de servidão, de materiais, de equipamentos e dos serviços de obras especiais relacionadas com o gasoduto e a linha de transmissão interligados em termelétrica a gás natural. Neste contexto, o presente trabalho, de cunho gerencial, tem por objetivo propor uma metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de termelétricas a gás natural, a ser utilizada no projeto de gasodutos de transporte e de linhas de transmissão de energia elétrica, consolidando as melhores práticas nacionais e internacionais, para servir de referência para as instituições e os agentes dos setores do gás natural e energia elétrica envolvidos nos projetos de termelétricas. A metodologia proposta neste trabalho contempla o uso de técnicas de otimização para solução do problema do caminho de menor custo das infraestruturas de termelétricas a gás natural. Apesar de existirem várias opções de métodos para resolver problemas de Programação Linear de Objetivos Múltiplos, tais como a análise de opções reais com simulação de Monte Carlo, foi adotado o método de Dijkstra do software QGIS, por tratar de forma nativa dados georreferenciados. Dois estudos de casos foram realizados e demonstram que uma metodologia integrada é capaz de simplificar e reduzir o tamanho do projeto das faixas do traçado das infraestruturas de termelétricas a gás natural e, desta forma, reduzir os riscos operacionais, minimizar os impactos ao meio ambiente e aumentar a competitividade de projetos de termelétricas nos Leilões de Energia Nova (LEN) realizados no Brasil.

Abstract of the Thesis presented to “Escola de Química “of “Universidade Federal do Rio de Janeiro” as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Sciences (D.Sc.).

## **INTEGRATED EVALUATION METHODOLOGY OF GAS PIPELINE AND TRANSMISSION LINES ROUTES AND THEMAL POWER PLANTS SITE LOCATION**

Almir Beserra dos Santos

Advisor: D.Sc. Erika Christina Ashton Nunes Chrisman

The relevance of investigating the planning related to thermoelectric generation projects derives from the fact that the natural gas and electric power sectors, whether in Brazil or in other countries, have an important correlation with each other and with other sectors of the economy. In Brazil, the planning of power generation projects involving these sectors is not always performed in a synchronized manner. Examples of the inefficiencies of this mismatch are the increased costs with land acquisition, materials, equipment and special services related to the pipeline and transmission line interconnected to natural gas thermoelectric power plants. In this context, this managerial thesis aims to propose an integrated methodology of route selection for natural gas transport pipelines and power transmission lines interconnected to gas-fired Thermal Power Plants (TPP) to be adopted in the design of transportation pipelines and electric power transmission lines, in order to consolidate national and international best practices and also serve as a reference for institutions and agents of the natural gas and electricity sectors. This methodology encompasses the use of optimization techniques to solve the problem of the least cost path to gas-fired TPP infrastructures. Although there are several method options for solving Multiple Objective Linear Programming problems, such as Monte Carlo simulation of real options, we used the Dijkstra method available in the QGIS software for natively treating georeferenced data. Two case studies have been performed for that purpose and show that an integrated methodology can simplify and reduce the size of the Right of Way (ROW) design of gas-fired TPP infrastructures, and reduce operational risks, minimize environmental impacts and increase the competitiveness of thermoelectric projects participating in the New Energy Auctions held in Brazil.



## **Lista de Siglas**

ABEGAS – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado

AGA – American Gas Association (Associação Americana de Gás)

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BEN – Balanço Energético Nacional

C&M – Construção e Montagem

EMR – Estação de Medição e Regulagem

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ETC – Estação de Transferência de Custódia

GASBOL – Gasoduto Bolívia – Brasil

GNL – Gás Natural Liquefeito

IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)

LGN – Líquido de Gás Natural

MME – Ministério de Minas e Energia

MMm<sup>3</sup>/d – Milhões de metros cúbicos por dia

O&M – Operação e Manutenção

ONS – Operador Nacional do Sistema

PAC – Plano de Aceleração do Crescimento do Governo Federal

PPT – Programa Prioritário de Termelétricidade

NTS – Sistema Nacional de Transmissão

TEG – Trietilenoglicol

UTE – Usina Termelétrica

UPGN – Unidade de Processamento de Gás Natural

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Sequências possíveis utilizadas para elaboração de projetos de usinas termelétricas a gás natural (fonte: elaboração própria)	76
Tabela 2 - Os critérios e pesos dos critérios adotados em projetos de UTEs	82
Tabela 3 – Os critérios e pesos dos principais critérios adotados em projetos de gasodutos	86
Tabela 4 – Os critérios e pesos dos principais critérios adotados em projetos de LTs	94
Tabela 5 - Níveis hierárquicos, fatores e critérios selecionados	132
Tabela 6 – Memória de cálculo da prioridade relativa geral dos critérios	132
Tabela 7 - Resultados (pesos) do cálculo da prioridade relativa geral dos critérios	132
Tabela 8 - Extensão das infraestruturas das alternativas do corredor 2	139
Tabela 9 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 2 com rios	139
Tabela 10 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 2 com LTs	139
Tabela 11 - Cruzamentos dos gasodutos do corredor 2 com estradas/ferrovias	140
Tabela 12 - Custo simplificado das alternativas de gasodutos do corredor 2	140
Tabela 13 - Custo simplificado das alternativas das linhas de transmissão do corredor 2	138
Tabela 14 - Extensão das infraestruturas das alternativas do corredor 1	140
Tabela 15 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 1 com rios	140
Tabela 16 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 1 com LTs	141
Tabela 17 - Cruzamentos dos gasodutos do corredor 2 com estradas/ferrovias	141
Tabela 18 - Custo simplificado das alternativas de gasodutos do corredor 1	141
Tabela 19 - Custo simplificado das alternativas das linhas de transmissão do corredor 1	141
Tabela 20 – Equações das restrições do problema do estudo de caso 1	143
Tabela 21 - Níveis hierárquicos, fatores e critérios selecionados	151
Tabela 22 – Memória de cálculo da prioridade relativa geral dos critérios	152

Tabela 23 - Resultados (pesos) do cálculo da prioridade relativa geral dos critérios	152
Tabela 24 - Extensão das infraestruturas das alternativas em estudo	158
Tabela 25 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas em estudo com rios	158
Tabela 26 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas em estudo com LTs	158
Tabela 27 - Cruzamentos dos gasodutos do corredor em estudo com estradas/ferrovias	158
Tabela 28 - Quantidade de válvulas de bloqueio das alternativas de gasodutos em estudo	159
Tabela 29 - Custo simplificado das alternativas de gasodutos em estudo	159
Tabela 30 - Custo simplificado das alternativas das linhas de transmissão em estudo	159
Tabela 31 – Equações das restrições do problema do estudo de caso 2	160
Tabela 32 - Níveis hierárquicos, fatores e critérios selecionados	197
Tabela 33 – A matriz do valor da importância relativa no segundo nível hierárquico	198
Tabela 34 – As médias geométricas das IRs do segundo nível hierárquico	198
Tabela 35 – As prioridades relativas das MGs do segundo nível hierárquico	199
Tabela 36 – PR, MG e matriz do valor da IR no terceiro nível hierárquico para B2	199
Tabela 37 – PR, MG e matriz do valor da IR no terceiro nível hierárquico para B3	200
Tabela 38 - Resultados (pesos) do cálculo da prioridade relativa geral dos critérios	200

## Lista de Figuras

Figura 1 – Reserva, produção e consumo de gás natural no mundo – Fonte: BP, 2018.	27
Figura 2 – A rede brasileira de gasodutos de transporte de gás natural (ANP, 2019).	31
Figura 3 – Participação (%) das fontes não renováveis na matriz energética brasileira entre os anos de 1970 e 2017 (EPE, 2019)	33
Figura 4 – Participação (%) das fontes renováveis na matriz energética brasileira entre os anos de 1970 e 2017 (EPE, 2019)	34
Figura 5 – Oferta de gás natural no Brasil (milhões de m <sup>3</sup> /d) no período de Jan/2007 a Fev/2019 (MME, 2019).	35
Figura 6 – Reinjeção, 'Queima+Perda' e Consumo de gás natural no setor de E&P brasileiro (milhões de m <sup>3</sup> /d) Jan/2007 a Fev/2019 (MME, 2019).	34
Figura 7 – Consumo de gás em 'Refinarias + FAFENS' da Petrobras e UTEs (Direto do Produtor + Consumidor Livre), em milhões de m <sup>3</sup> /d, no período de Jan/2007 a Fev/2019 (MME, 2019)	37
Figura 8 – Consumo médio (%) de gás natural no Brasil – 2009 a 2018, segmentado por classe de consumo (MME, 2019)	38
Figura 9 – Geração elétrica por fonte no mundo (ANEEL, 2017)	39
Figura 10 – Geração elétrica por região no mundo (ANEEL, 2017).	40
Figura 11 – Geração Térmica a gás natural em 2014 (%), por país (ANEEL, 2017)	41
Figura 12 – Geração elétrica por fonte no Brasil (ANEEL, 2017).	43
Figura 13 – Sistema Interligado Nacional – SIN, por nível de tensão (ONS, 2017).	44
Figura 14 - Instalações típicas de gasodutos de transporte (elaborado pelo autor).	60
Figura 15 - Componentes típicos de linhas de transmissão (SILVA et al., 2016).	66
Figura 16 - Usina termelétrica de ciclo combinado – UTE Santa Cruz (Furnas, 2019).	69
Figura 17 - Componentes de termelétricas de ciclo combinado (GASNET, 2019).	69

Figura 18 – Diagrama simplificado dos traçados das infraestruturas de uma UTE (fonte: elaboração própria)	77
Figura 19 - Diagrama complexo dos traçados das infraestruturas de uma UTE (fonte: elaboração própria)	78
Figura 20 – Visão geral da metodologia de seleção de rota ótima integrada	102
Figura 21 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe I)	103
Figura 22 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe II)	104
Figura 23 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe II.1.a / II.1.b)	104
Figura 24 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe III)	104
Figura 25 - Municípios do Estado do Espírito Santo (IBGE, 2019)	126
Figura 26 - Infraestrutura de transmissão de energia elétrica no ES (EPE, 2019)	127
Figura 27 – Projeto de Interligação da UTE São Geraldo I – RIMA / INEA (WÄRTSILÄ, 2019)	128
Figura 28 – Mapa elaborado pelo autor no Google Earth com os 2 corredores em estudo	130
Figura 29 – Mapa elaborado pelo autor no Google Earth do Corredor 1	131
Figura 30 – Mapa elaborado pelo autor no Google Earth do Corredor 2	131
Figura 31 – Mapa elaborado pelo autor no QGIS do Corredor 1	134
Figura 32 – Mapa elaborado pelo autor no QGIS do Corredor 2	134
Figura 33 – Camadas classificadas e processadas do Corredor 1	135
Figura 34 – Camadas classificadas e processadas do Corredor 2	136
Figura 35 – Mapa do modelo da superfície de custo do Corredor 1	137
Figura 36 – Mapa do modelo da superfície de custo do Corredor 2	137
Figura 37 – Mapa traçado de todas as alternativas de projeto do corredor 1	138
Figura 38 – Mapa traçado de todas as alternativas de projeto do corredor 2	138
Figura 39 – Diagrama de arcos e nós do problema de transporte	142

Figura 40 – Função objetivo e restrições configuradas no Solver do Excel – Caso 1 (ES)	143
Figura 41 - Mapa contendo os três empreendimentos integrados de menor custo	144
Figura 42 - Municípios do Estado de Santa Catarina (modificado a partir do IBGE)	147
Figura 43 - Infraestrutura de transmissão de energia elétrica em SC (ANEEL, 2015)	148
Figura 44 - Mapa do gasoduto Biguaçu – Chapecó, em estudo pela EPE	149
Figura 45 - Mapa da rede da Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS, 2019)	149
Figura 46 – Mapa elaborado pelo autor no Bing Maps contendo os corredores em estudo	151
Figura 47 – Mapa exibindo os corredores após o processamento dos dados coletados	155
Figura 48 – Camadas classificadas e processadas	156
Figura 49 – Mapa do modelo da superfície de custo	156
Figura 50 – Mapa traçado de todas as alternativas de projeto	157
Figura 51 – Diagrama de arcos e nós do problema de transporte	160
Figura 52 – Função objetivo e restrições configuradas no Solver do Excel	161
Figura 53 - Mapa contendo o empreendimento integrado de menor custo	162
Figura 54 – Metodologia de seleção de rota tradicional (não integrada)	165
Figura 55 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada	165

## Sumário

1	Introdução .....	18
2	Objetivos .....	22
3	Revisão Bibliográfica .....	24
3.1	O Panorama dos Setores do Gás Natural e de Energia Elétrica .....	24
3.1.1	O Gás Natural .....	24
3.1.2	A Energia Elétrica .....	25
3.1.3	O Setor do Gás Natural.....	26
3.1.4	O Setor do Gás Natural no Brasil.....	28
3.1.5	O Setor da Energia Elétrica.....	38
3.1.6	O Setor da Geração de Energia Elétrica no Brasil .....	41
3.1.7	A integração dos mercados de gás natural e energia elétrica no Brasil .....	46
3.1.8	Discussões e Considerações .....	50
3.2	Aspectos Técnicos do Projeto de Termelétricas a Gás Natural e suas Infraestruturas ....	53
3.2.1	Aspectos Técnicos do Projeto de Gasodutos de Transporte no Brasil.....	59
3.2.2	Aspectos Técnicos do Projeto de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil 65	
3.2.3	Aspectos Técnicos do Projeto de Usinas Termelétricas a Gás Natural no Brasil .....	68
3.2.4	Discussões e Considerações .....	72
3.3	Métodos de avaliação do projeto de faixas das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural.....	73
3.3.1	Escolha da Região para Localização de Termelétrica.....	74
3.3.2	Visão geral do processo de definição das alternativas de projeto de uma UTE a gás 79	
3.3.3	Visão geral do processo de projeto de faixas das infraestruturas de uma UTE.....	83
3.3.4	A experiência internacional no projeto de faixas de gasodutos .....	85
3.3.5	O projeto de faixas de gasodutos no Brasil.....	87
3.3.6	A experiência internacional no projeto de faixas de Linhas de Transmissão (LT).....	93
3.3.7	O projeto de faixas de linhas de transmissão no Brasil.....	94
3.3.8	Discussões e Considerações .....	98
4	Metodologia .....	101
4.1	Metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural.....	102

4.1.1	Levantar dados das alternativas.....	104
4.1.2	Delimitar área de estudo.....	106
4.1.3	Definir os métodos, fatores e critérios.....	107
4.1.4	Definir os materiais .....	109
4.1.5	Coletar Dados .....	110
4.1.6	Selecionar, tratar e tabular os dados .....	112
4.1.7	Realizar o pré-processamento dos dados .....	113
4.1.8	Realizar o processamento de dados .....	114
4.1.9	Analisar os dados.....	115
4.1.10	Elaborar modelo de superfície de custo da alternativa .....	116
4.1.11	Encontrar o caminho de menor custo.....	117
4.1.12	Elaborar mapa da alternativa com o caminho de menor custo.....	117
4.1.13	Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo.....	118
4.1.14	Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas.....	119
4.1.15	Encontrar o empreendimento integrado de menor custo.....	120
4.1.16	Analisar e discutir os resultados.....	121
4.2	Vantagens do uso da metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural .....	123
4.3	Discussões e Considerações .....	124
5	Estudos de Caso e Resultados .....	125
5.1	Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso “UTE São Geraldo I (ES)” .....	125
5.1.1	Levantar dados das alternativas.....	126
5.1.2	Delimitar área de estudo.....	130
5.1.3	Definir os métodos, fatores e critérios.....	131
5.1.4	Definir os materiais .....	133
5.1.5	Coletar Dados .....	133
5.1.6	Selecionar, tratar e tabular os dados .....	134
5.1.7	Realizar o pré-processamento dos dados .....	135
5.1.8	Realizar o processamento de dados .....	136
5.1.9	Analisar os dados.....	136
5.1.10	Elaborar modelo de superfície de custo da alternativa .....	136
5.1.11	Encontrar o caminho de menor custo.....	138



5.1.12	Elaborar mapa da alternativa com o caminho de menor custo.....	138
5.1.13	Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo.....	139
5.1.14	Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas.....	142
5.1.15	Encontrar o empreendimento integrado de menor custo.....	143
5.1.16	Analisar e discutir os resultados.....	144
5.2	Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso “UTE Vale do Contestado (SC)” .....	146
5.2.1	Levantar dados das alternativas.....	147
5.2.2	Delimitar área de estudo.....	150
5.2.3	Definir os métodos, fatores e critérios.....	151
5.2.4	Definir os materiais .....	152
5.2.5	Coletar Dados .....	153
5.2.6	Selecionar, tratar e tabular os dados .....	154
5.2.7	Realizar o pré-processamento dos dados .....	154
5.2.8	Realizar o processamento de dados .....	155
5.2.9	Analisar os dados.....	155
5.2.10	Elaborar modelo de superfície de custo da alternativa .....	156
5.2.11	Encontrar o caminho de menor custo.....	157
5.2.12	Elaborar mapa da alternativa com o caminho de menor custo.....	157
5.2.13	Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo.....	157
5.2.14	Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas.....	159
5.2.15	Encontrar o empreendimento integrado de menor custo.....	160
5.2.16	Analisar e discutir os resultados.....	161
6	Discussões e Considerações Finais.....	162
7	Conclusões.....	168
8	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	171
9	Referências Bibliográficas .....	172
	ANEXO 1 - Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso UTE São Geraldo I (ES).....	186
	ANEXO 2 - Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso UTE Vale do Contestado (SC) .....	192
	ANEXO 3 – O Método Multicritério AHP – Processo Analítico Hierárquico.....	197
	ANEXO 4 – Artigos publicados pelo autor relacionados com o tema da tese .....	201

## **1 Introdução**

A importância de investigar o planejamento relacionado com projetos de geração termelétrica decorre do fato de que os setores do gás natural e da energia elétrica, seja no Brasil ou em outros países, guardam relevante correlação entre si e com outros setores da economia. Assim, qualquer influência, positiva ou negativa, que um desses setores causa sobre o outro, gera impacto na oferta de energia que impulsiona o crescimento e que contribui para uma nação prosperar. A amplitude do impacto pode variar de um país para o outro, considerando o fato de que as suas matrizes energéticas podem apresentar distintas fontes e proporções variadas.

Ambos os setores no Brasil possuem cadeias de valor que abrangem diversas atividades e agentes econômicos de elevada importância no cenário econômico e são fundamentais para o fornecimento de energia para seus consumidores finais e para outros segmentos do mercado.

Os setores do gás natural e da energia elétrica possuem atividades que são consideradas monopólios naturais, tais como o transporte de gás natural e a transmissão de energia elétrica. Tal fato demanda que os serviços associados a estas atividades sejam realizados de forma eficiente, para que em seus mercados sejam praticadas tarifas justas que contribuam para o desenvolvimento dos setores envolvidos. Na União Europeia, por exemplo, a estratégia regulatória dos setores de energia foi concebida considerando que, a eficiência na prestação dos serviços, nos setores do gás natural e energia elétrica, envolve requerimentos essenciais como transparência, estabilidade, interoperabilidade, padronização operacional e acessibilidade (EGENHOFER, 2004).

Os planejamentos desses setores no Brasil muitas vezes foram realizados de forma descasada. Uma explicação para este descompasso está no fato do planejamento desses setores estar vinculado ao planejamento das suas empresas dominantes e que, não necessariamente, possuem objetivos estratégicos comuns entre si ou com os objetivos do governo brasileiro. Outra explicação está no simples fato de haver uma diferença de maturidade nas fases dos planejamentos adotados em tais setores, pois enquanto o

planejamento no setor da energia elétrica no Brasil é robusto e revisado periodicamente, o planejamento no setor do gás natural no Brasil ainda está em fase de consolidação.

O planejamento energético no Brasil atualmente contempla os vários tipos de fontes de energia disponíveis na nossa matriz energética. Cabe salientar que a usina termelétrica a gás natural aparece como a tecnologia que tem maior probabilidade de fornecer a flexibilidade necessária para lidar com os desafios técnicos introduzidos pelas fontes intermitentes de energia renovável, dentre elas a eólica e a solar (fotovoltaica). Assim, como grande parte da produção de gás no Brasil está associada à produção de óleo, tal fato também deve ser considerado no planejamento energético.

Atualmente estão em andamento ações endereçadas pelo Ministério de Minas e Energia – MME, tais como o Programa "Novo Mercado de Gás", que substituiu o Programa "Gás para Crescer". Dentre as medidas propostas no referido Programa estão aquelas aprovadas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) para abertura do mercado de gás natural no Brasil, visando promover mais concorrência e trazer benefícios para a indústria. Outra medida em estudo é a revisão do marco regulatório das atividades relacionadas com a indústria do petróleo e gás natural, em especial a Lei do gás.

Concomitante com as alterações no marco regulatório está também o reposicionamento da Petrobras no setor. O Plano Estratégico 2040 - Plano de Negócios e Gestão 2019-2023 desta empresa estabelece como estratégia para o setor do gás natural a otimização da sua posição no segmento de gás natural e energia no Brasil e o desenvolvimento das posições no mercado global, por meio de parcerias. Ou seja, a Petrobras iniciou um programa de desinvestimento no setor do gás natural, visando deixar os negócios de transporte de gás natural. Se, por um lado tal reposicionamento traz a oportunidade da entrada de novos agentes no mercado de gás natural, por outro cria algumas necessidades relacionadas, por exemplo, com a criação da figura de um operador técnico e independente do sistema nacional de gasodutos de transporte.

A existência de tais incertezas e obstáculos reforça a ideia de que os novos projetos de termelétricas a gás natural, além de terem que ser propostos considerando o enfoque

nos níveis tecnológico, estrutural e paramétrico, devem possuir elevada competitividade, caso contrário, serão pouco utilizados em razão de existirem empreendimentos substitutos com melhor performance e/ou menor custo (ESPOSITO, 2004 e PIZZOTTI, 2012).

Ademais, os projetos das infraestruturas elaborados por empresas desses setores são verificados pelos órgãos ambientais e de controle, que direcionam o foco da avaliação da eficiência para: (i) o licenciamento ambiental do projeto como um todo (IBAMA e órgãos ambientais estaduais / municipais); (ii) a termelétrica, a linha de transmissão e demais instalações do setor elétrico (ANEEL); e (iii) o gasoduto e demais instalações do setor do gás natural (ANP).

Dentre as possíveis soluções, para o efetivo planejamento integrado da implantação eficiente de projetos de usinas termelétricas a gás natural está a inclusão, no referido planejamento, do uso de técnicas de otimização para seleção da localização da usina termelétrica, de sua linha de transmissão e do gasoduto que fornece o gás para a usina.

Neste ponto, cabe destacar que as contribuições acadêmicas e as soluções adotadas pelas empresas dos setores envolvidos, para determinação da localização de empreendimentos de termelétricas a gás natural e de suas infraestruturas, tinham como característica a realização de estudos preliminares distintos e conduzidos de forma isolada. Ou seja, a maioria dos estudos tinha o foco direcionado ou para a localização da termelétrica e da linha de transmissão, ou para a localização do gasoduto que fornece o gás natural a ser usado como combustível.

Além disso, os poucos estudos e soluções onde o tema foi abordado de forma simultânea não abrangeram o uso de técnicas de otimização com alternativas de arranjo considerando a diversificação dos pontos de suprimento de gás, ou seja, não contemplavam um estudo exaustivo de todos os arranjos possíveis ou viáveis.

As ineficiências decorrentes da não realização conjunta de estudos preliminares e de um planejamento integrado para determinação da localização de empreendimentos de termelétricas a gás natural e de suas infraestruturas não são poucas. O aumento dos custos

com a aquisição de terrenos da faixa de servidão, de materiais, de equipamentos e dos serviços de obras especiais são alguns exemplos. O aumento da supressão de vegetação, por conta da proposição de um empreendimento com dimensões não otimizadas, é um outro exemplo de ineficiência e que gera impacto ao meio ambiente.

A falta de uma padronização na metodologia de projeto do traçado das infraestruturas de termelétricas a gás natural, que incorpore o conhecimento e a sinergia existente entre os agentes dos setores elétricos e do gás natural, também é um fator que gera ineficiência. A ausência de uma metodologia de referência, consolidando as melhores práticas nacionais e internacionais, faz com que as empresas percam mais tempo e recursos para resolver os problemas de travessias de obstáculos, que comumente são observados ao longo das faixas de gasodutos e linhas de transmissão de termelétricas.

A relevância da resolução dos supracitados problemas de ineficiência está relacionada, também, com a possibilidade da proposição e participação de projetos termelétricos mais competitivos em leilões da ANEEL, contribuindo, em última análise, para a redução das tarifas de energia elétrica no Brasil.

Assim, apesar de tais setores possuírem peculiaridades e graus de maturidade distintos, existem vários pontos em comum. Desta forma, torna-se relevante avaliar a importância da realização de seus planejamentos de forma integrada, de modo que a operação e a expansão das infraestruturas envolvidas agreguem ganhos para ambos os setores ou, ao menos, minimizem o surgimento de obstáculos para o desenvolvimento de seus mercados. Para tal, este trabalho faz uso de técnicas de otimização como ferramenta gerencial de auxílio na tomada de decisão de investimento das tais infraestruturas, através do uso de softwares gratuitos que manipulem dados georreferenciados de forma nativa.

## 2 Objetivos

O principal objetivo desta tese é propor uma metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural, que possibilite aos gestores uma melhor escolha ou definição de opções onde haja redução dos riscos operacionais, a minimização dos impactos ao meio ambiente e o aumento da competitividade de projetos de tais usinas nos Leilões de Energia Nova (LEN) realizados no Brasil, com base no uso de softwares de otimização com dados de georreferenciamento.

Para que esse objetivo seja alcançado, os seguintes objetivos específicos foram destacados:

- a. Investigar com mais profundidade os panoramas nacional e mundial dos setores de gás natural e energia elétrica de modo a identificar as características e experiências comuns;
- b. Conhecer o estado da arte das tecnologias disponíveis e em desenvolvimento relacionadas com o uso do gás natural na geração termelétrica e na cogeração;
- c. Determinar as características comuns necessárias para o desenvolvimento dos mercados de gás natural e energia elétrica, com enfoque na geração termelétrica que utiliza o gás natural como combustível;
- d. Compreender as necessidades de suprimento de gás que atendam as modalidades de despacho de usinas termelétricas brasileiras;
- e. Entender os modelos e as atuais premissas de planejamento integrado dos setores do gás natural e energia elétrica no Brasil e no exterior;
- f. Examinar os elementos positivos e negativos da formação de preço do gás natural e da energia elétrica no Brasil, que afetam a competitividade de projetos de Usinas Termelétricas participantes de Leilões de Energia;
- g. Desenvolver uma metodologia que auxilie a definição da localização de novos empreendimentos de termelétricas a gás natural e suas infraestruturas fazendo uso de técnicas de otimização;

- h. Avaliar a aplicação da metodologia em estudos de caso de projeto de novos empreendimentos de termelétricas a gás natural e suas infraestruturas.

Visando apresentar o desenvolvimento das atividades realizadas para alcançar os objetivos propostos, descrever-se-á a seguir a sequência dos temas em que foi organizada esta tese:

Capítulo 1: Introdução – A contextualização da pesquisa e relevância do problema;

Capítulo 2: Objetivos – Os objetivos que se espera alcançar;

Capítulo 3: Revisão Bibliográfica – Abrangendo o panorama dos setores do Gás Natural e da Geração de Energia Elétrica no Brasil, os aspectos Técnicos do Projeto de Termelétricas a Gás Natural e os métodos de avaliação de traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural;

Capítulo 4: Metodologia – A metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural;

Capítulo 5: Estudos de Caso e Resultados – A aplicação da metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural;

Capítulo 6: Discussões e Considerações Finais – Discussões e considerações relacionadas com os resultados encontrados e o trabalho como um todo.

Capítulo 7: Conclusões – Conclusões acerca do trabalho realizado;

Capítulo 8: Recomendações para Trabalhos Futuros – Sugestões para trabalhos futuros;

Capítulo 9: Referências bibliográficas – Referências bibliográficas citadas ao longo do trabalho.

### **3 Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 O Panorama dos Setores do Gás Natural e de Energia Elétrica**

Esse capítulo aborda as definições e principais características do gás natural e da energia elétrica, bem como apresenta o contexto, o panorama histórico e o funcionamento dos seus setores e mercados em nível nacional e mundial. A termelétrica a gás natural é o foco desta tese e um dos principais elos responsáveis pela interface entre ambos os setores.

##### **3.1.1 O Gás Natural**

O gás natural é uma mistura gasosa rica em hidrocarbonetos leves, especialmente o metano, confinado em jazidas ou que escapa dessas, através de falhas geológicas (FERREIRA, 2009). Além disso, o gás natural é um fluido inodoro, incolor e mais leve que o ar.

A Lei brasileira nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, também denominada Lei do Petróleo, define gás natural como sendo a “porção do petróleo que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições originais do reservatório, e que permanece no estado gasoso, nas condições atmosféricas de pressão e temperatura”.

A *American Gas Association* – AGA, por sua vez, define gás natural como a mistura natural de hidrocarbonetos e de não hidrocarbonetos encontrados em formações geológicas porosas abaixo da superfície da terra, frequentemente em associação com o petróleo.

Tipicamente, o gás natural após ser retirado de um reservatório contém grandes quantidades de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Tais compostos são removidos, através de algumas etapas primárias de produção e condicionamento, antes de o gás natural ser movimentado via gasoduto de escoamento de produção até uma Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN. Na UPGN, a corrente de gás natural é processada, por etapas, para remoção de contaminantes como enxofre, oxigênio e nitrogênio, sendo as principais etapas: adoçamento, extração de Líquido de Gás Natural – LGN, estabilização e



tratamento para especificação. A designação da especificação do gás natural comercializado no Brasil está contida na Resolução ANP nº 16, de 18 de junho de 2008.

### **3.1.2 A Energia Elétrica**

A energia elétrica é a energia armazenada entre partículas carregadas dentro de um campo elétrico. A atração ou repulsão de tais partículas gera uma força eletromagnética, que pode ser utilizada para criar um fluxo (corrente) de energia elétrica. A energia elétrica pode ser obtida a partir da transformação das energias químicas ou mecânicas. A energia elétrica pode ser disponibilizada para uso final, na forma de corrente contínua ou alternada, e transformada para produzir trabalho, na forma de luz, movimento ou calor.

A indústria da energia elétrica surgiu no final do século XIX, nos Estados Unidos. Desde então, a energia elétrica é gerada em grande escala por meio de usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas, fotovoltaicas, dentre outras. Um sistema elétrico é composto por instalações de geração, transmissão, distribuição e de consumo.

Apesar da introdução da energia no Brasil ter ocorrido em 1897 (CEMIG, 2019), os valores das tensões nominais da energia elétrica adotados no sistema elétrico de potência brasileiro somente foram padronizados em 26 de fevereiro de 1957, com a entrada em vigor do Decreto nº 41.019, e, posteriormente, atualizados em 1973 e 1988.

O marco regulatório do setor de energia elétrica no Brasil foi instituído com a publicação das Leis nº: 8.987/1995 (concessão de serviços públicos), 9.074/1995 (concessão de serviços de energia elétrica), 9.427/1996 (criação da ANEEL) e 9.648/1998 (criação do Operador Nacional do Sistema – ONS).

O sistema elétrico brasileiro é composto por sistemas isolados e por sistemas regionais interligados, que formam o Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN é operado pelo ONS, que monitora e controla o despacho dos empreendimentos de geração e transmissão em função da demanda de energia elétrica observada. A integração dos sistemas regionais viabiliza o intercâmbio de energia entre tais sistemas, bem como aumenta a confiabilidade do abastecimento e possibilita a operação eficiente e otimizada.

### 3.1.3 O Setor do Gás Natural

Caracteristicamente, as atividades econômicas realizadas em países desenvolvidos podem ser agrupadas em setores ou indústrias. Neste contexto, cabe destacar que historicamente, os temas relacionados com o gás natural sempre foram tratados no âmbito do setor do petróleo. Isto porque no início do século passado, o gás natural não tinha importância relevante na matriz energética mundial.

No fim do século passado, no entanto, o consumo de gás natural mundial passou a apresentar uma grande expansão. Nesse período, surgiram relevantes inovações tecnológicas na indústria de gás natural, como, por exemplo, os avanços tecnológicos no processo de liquefação de gás natural e na produção de gás não convencional, que inclui o *shale gas*. Tais inovações tecnológicas contribuíram para a expansão do suprimento de gás natural ao mercado mundial.

As principais publicações relacionadas com o setor energético mundial ressaltam que o gás natural acrescenta flexibilidade na oferta de energia, é a fonte energética com maior perspectiva de crescimento no cenário mundial até 2035 (BP, 2014), e se tornará, por volta de 2030, o principal combustível da matriz energética dos 34 países membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE. Atualmente o gás natural é a fonte de energia de origem fóssil que apresenta os maiores índices mundiais de crescimento e ocupa a terceira colocação na matriz energética mundial (IEA, 2014).

Observa-se, então, que em muitos países está atualmente em curso um processo de transição, cujo principal objetivo é ter uma menor dependência do petróleo e seus derivados líquidos e uma maior utilização do gás natural. Em países como a Alemanha, por exemplo, já está em curso um processo de transição para reduzir a dependência do gás natural.

A indústria do gás natural compreende o conjunto das atividades econômicas relacionadas com exploração, desenvolvimento, produção, importação, exportação, processamento, tratamento, transporte, carregamento, estocagem, acondicionamento,

liquefação, regaseificação, distribuição e comercialização de gás natural.

Os principais mercados mundiais de gás natural estão localizados na América do Norte, América Central / Latina, Europa, Comunidade dos Estados Independentes, Oriente Médio, África e Ásia / Oceania. Os mercados detentores das maiores reservas de gás não são os maiores consumidores. Já os mercados das Américas Central e do Sul são os que menos produzem. A figura 1 exibe os atuais valores percentuais de participação dos mercados de gás natural, acima citados, em termos de reservas, produção e consumo.

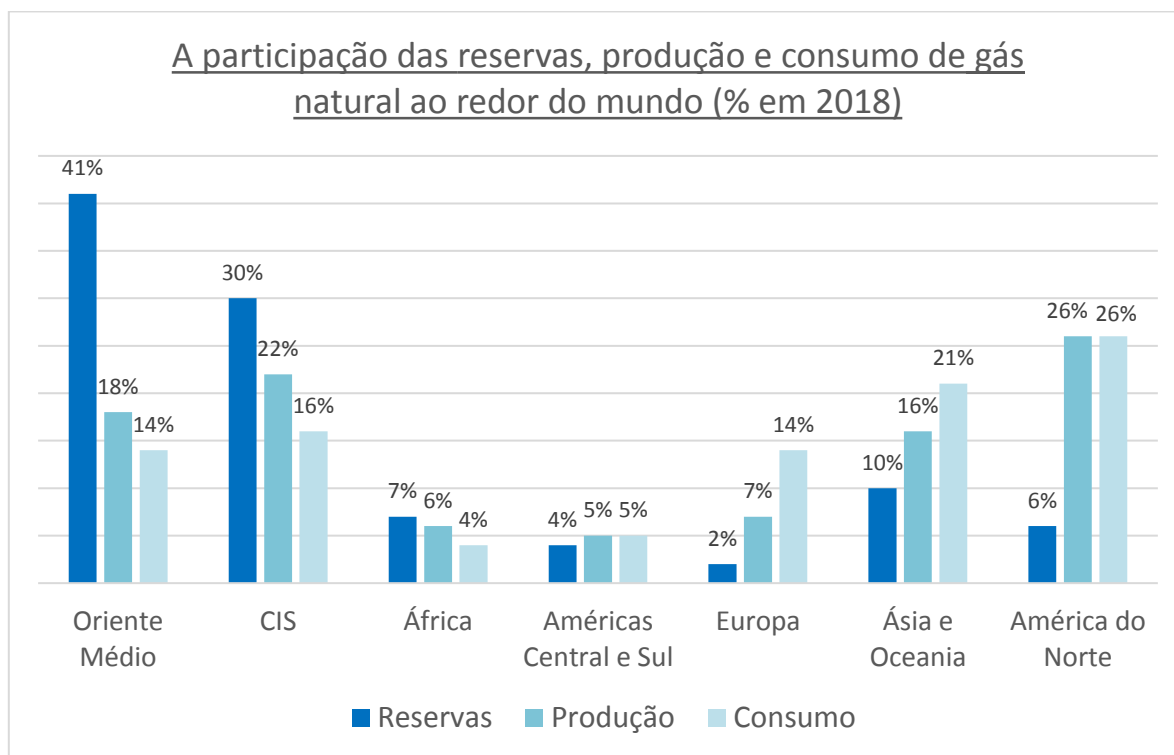


Figura 1 – Reserva, produção e consumo de gás natural no mundo – Fonte: BP, 2018.

Historicamente, o desenvolvimento dos mercados de gás natural se deu de forma regionalizada, dado que o modal de transporte mais utilizado para movimentar o gás natural, desde o local onde era produzido até o local de consumo, foi, predominantemente, o modal dutoviário. Desde o final do século passado, no entanto, o transporte de gás natural passou a ser realizado também através do modal marítimo. Neste caso, o gás natural é liquefeito, passando a ser denominado Gás Natural Liquefeito (GNL) e seu transporte

passou a usufruir de flexibilidades que o modal dutoviário não possui. O transporte marítimo possibilitou o consumo de gás natural em regiões antes limitadas apenas ao suprimento local.

#### **3.1.4 O Setor do Gás Natural no Brasil**

A indústria de gás natural no Brasil teve início em 1940, quando ocorreram descobertas de óleo e gás na Bahia. Após a Segunda Guerra Mundial, teve início no Brasil um processo de reorganização da indústria do petróleo. Em 3 de outubro de 1953 foi promulgada a Lei nº 2004/1953, que estabeleceu o monopólio da União na exploração, produção, refino e transporte de petróleo no Brasil. Esta Lei também criou a empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) para exercer o supracitado monopólio (ANP, 2015).

Somente a partir da década de 80 é que houve o aumento gradativo da participação do gás natural na matriz energética nacional, com a descoberta e exploração das reservas de gás na Bacia de Campos, no litoral do Rio de Janeiro. O crescimento da supracitada participação ganhou mais envergadura no final da década de 90, quando entrou em operação o gasoduto Brasil-Bolívia (GASBOL) e o Brasil passou a ter um acréscimo de 30 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia.

Cabe citar que, em 1997, a Lei do petróleo criou a Agência Nacional do Petróleo – ANP, que passou a regular as atividades econômicas da indústria do petróleo e do gás natural. Esta Lei também revogou a Lei nº 2004/1953, acabando com o monopólio da União no setor, ou seja, as atividades de exploração, refino, transporte, importação e exportação de petróleo e derivados passaram a ser permitidas por quaisquer empresas constituídas sob as leis brasileiras, sob a regulação e fiscalização da União. Compete destacar que o § 2º do Art. 25 da Constituição Federal de 1988 estabeleceu que cabe aos Estados explorar diretamente, ou mediante concessão, os serviços locais de gás canalizado. Ou seja, enquanto a outorga da concessão ou autorização do serviço de transporte de gás é de competência federal, a concessão da distribuição de gás é de tema de competência estadual.

No início dos anos 2000 o Brasil enfrentou uma grave crise no setor elétrico, que culminou no racionamento de eletricidade aos consumidores brasileiros em 2001 e, com o isso, o governo federal optou por incentivar a construção de usinas termelétricas movidas a gás natural, através da criação do Programa Prioritário de Termelétricas – PPT (FARIA, 2010).

Com a massificação do uso do gás natural nas suas principais classes de consumo, tais como a industrial, a comercial e a de geração de energia elétrica, a oferta de gás passou a não mais ser suficiente para atender, simultaneamente, a todos os consumidores.

Esta situação, entretanto, foi revertida a partir de 2008 devido à redução do consumo industrial e da geração de energia elétrica provocada pela crise econômica internacional. Justamente nesta época foi promulgado o marco legal do setor do gás natural no Brasil, por meio da Lei nº 11.909/2009, também denominada Lei do Gás. Desde então, o Brasil passou a importar maiores quantidade de GNL por meio de seus três terminais de GNL, bem como também aumentou as reservas provadas de gás com a descoberta da província do pré-sal.

A partir de 2014, a Petrobras passou a ser investigada por participar de um grave esquema de corrupção e de lavagem de dinheiro no Brasil, envolvendo agentes políticos, operadores financeiros e empreiteiras (MPF, 2019). Este fato contribuiu para uma acentuada queda do valor das ações desta empresa, que teve que mudar a estratégia de seu planejamento e iniciar um processo de priorização de investimentos e de venda de ativos. Com isso, uma série de projetos nos segmentos de exploração e produção de petróleo e gás, que estavam em andamento, e outros que estavam por iniciar, acabaram sendo paralisados. A paralisação dos projetos acabou por agravar a crise já instalada e afetou outros setores industriais e a sociedade brasileira como um todo.

Especificamente com relação ao setor do gás natural, outra crise acometeu a Petrobras neste mesmo período, que passou a ser investigada pelo Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), por praticar o abuso de poder na oferta de gás ao mercado. Uma das principais questões observadas neste caso foi a dificuldade que as outras empresas operadoras que realizam exploração de gás no pré-sal enfrentavam para ter acesso às

infraestruturas essenciais da indústria do gás natural (escoamento, importação, tratamento e transporte), para efetivamente viabilizar a comercialização do natural para o mercado nacional, sem depender da Petrobras. O fato é que esta dependência contribuiu para o não surgimento de novos investimentos para a expansão das indústrias do petróleo e gás natural.

Para solucionar esta crise, ou seja, congelar o processo sancionador instaurado pelo CADE, a Petrobras teve que aceitar as condições estabelecidas em Termo de Compromisso de Cessação – TCC, firmado junto ao órgão supracitado, no qual se comprometeu a iniciar um processo de reposicionamento no mercado do gás natural (CADE, 2019), por meio da venda de ativos de transporte de gás natural.

As diretrizes do acordo foram objeto da Resolução nº 16/2019 do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Tal acordo contemplou a venda de participações da Petrobras nas distribuidoras de gás natural no país, bem como a venda na participação de ativos nos segmentos de refino e transporte, dentre eles, a participação majoritária no GASBOL. O principal objetivo das supracitadas diretrizes é realizar a abertura do mercado gás natural, de modo a atrair novos investimentos e aumentar a geração de emprego, renda e a arrecadação de tributos diretos e indiretos. Esta iniciativa foi rotulada pelo atual governo federal, como as medidas de estímulo à concorrência no mercado de gás natural no país, de modo a estabelecer um “Novo Mercado de Gás”. Tais medidas também incluíram propostas de harmonização e de aperfeiçoamento da regulação da distribuição de gás no país, a criação de mercados livres estaduais e as propostas de soluções para questões tributárias (CNPE, 2019).

Um dos efeitos esperados pelo governo federal com a entrada em vigor do “Novo Mercado de Gás” é o crescimento do parque térmico para geração de energia elétrica utilizando o gás natural como combustível.

Recentemente, a Petrobras anunciou que realizou seis novas descobertas de grandes quantidades de gás natural e de óleo de excelente qualidade, em uma região de águas profundas na Bacia de Sergipe-Alagoas (SEAL). Estimativas da Companhia indicam que a

produção de gás desses reservatórios seria capaz de produzir um terço da atual produção de gás no país. O Plano Estratégico 2040 (PNG 2019-2023) da Petrobras contempla o investimento em projetos de escoamento e processamento do gás natural proveniente dos campos situados em águas profundas na Bacia de Sergipe-Alagoas (PETROBRAS, 2019).

Estas novas descobertas poderão ser propulsoras de uma nova fase desenvolvimento do país, em especial no Nordeste, bem como na efetiva recuperação da Petrobras.

A seguir, serão apresentadas as principais características da infraestrutura da indústria do gás natural no Brasil.

Dados do MME, publicados em abril de 2019, indicam que a rede de gasodutos de transporte de gás natural no Brasil totaliza 9.409 km, e é formada por 48 gasodutos, enquanto a rede de gasodutos de distribuição, em 2018, totalizou 34.649 km (ABEGAS, 2019).

A figura 2 exibe a rede de gasodutos de transporte de gás natural. Vale ressaltar que uma parte das usinas termelétricas brasileiras está interligada imediatamente à jusante de citygates de gasodutos de transporte, em gasodutos de distribuição.

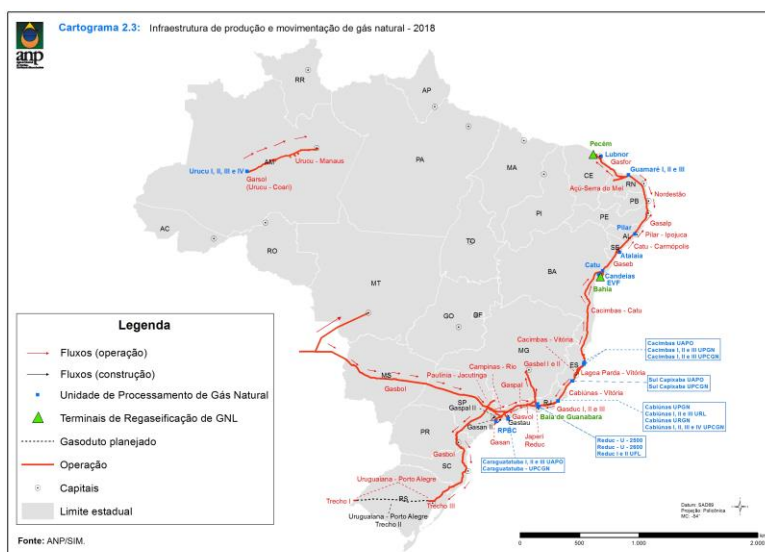


Figura 2 – A rede brasileira de gasodutos de transporte de gás natural (ANP, 2019).

As 22 Termelétricas que estão interligadas imediatamente após os pontos de entregas de gasodutos de transporte possuem capacidade instalada de 8.826 MW, valor este, que corresponde a 77,13% da capacidade instalada total gerada pelas termelétricas a gás natural (ONS, 2019).

Percebe-se, portanto, que a preferência de que termelétricas a gás natural estejam próximas das instalações de gasodutos de transporte visa minimizar o comprimento dos gasodutos de distribuição operados por empresas distribuidoras estaduais de gás canalizado. Uma das variáveis utilizadas pelas distribuidoras estaduais de gás canalizado, para calcular a tarifa do serviço de distribuição é a distância percorrida pelo gás até o consumidor.

A seguir, serão apresentados os principais dados de oferta e demanda de gás natural, bem como os de sua participação na matriz energética brasileira.

Desde 2000, o comportamento de tendência da participação do gás natural na matriz energética brasileira tem sido de crescimento, em sintonia com o observado em outros países em desenvolvimento.

Um dos principais aspectos que aponta para o potencial aumento da utilização do gás natural do Brasil está relacionado com o fato da combustão do gás natural alcançar maiores temperaturas que seus combustíveis alternativos e, com isso, possibilitar para uma maior eficiência energética de seus sistemas de combustão (DIKCOW, 2011). Tal importante característica de eficiência energética potencializa o uso estratégico do gás natural, com o objetivo de aumentar a competitividade da indústria nacional.

As figuras 3 e 4 exibem a participação (%) das fontes renováveis e não renováveis na matriz energética brasileira, conforme dados do Balanço Energético Nacional (BEN).

Entre 2003 e 2017, em termos de energia não renovável, observou-se no Brasil um comportamento estável na oferta de petróleo e derivados, diferentemente das tendências de oferta do gás natural e do carvão mineral/coque, que foram, respectivamente, de crescimento e de leve retração, como mostrados na Figura 3.



Em 2017, a participação do gás natural na oferta de energia interna brasileira foi de 37.792 mil tep (tonelada equivalente de petróleo), ou seja, cerca de 12,8% da matriz energética nacional (EPE, 2019).

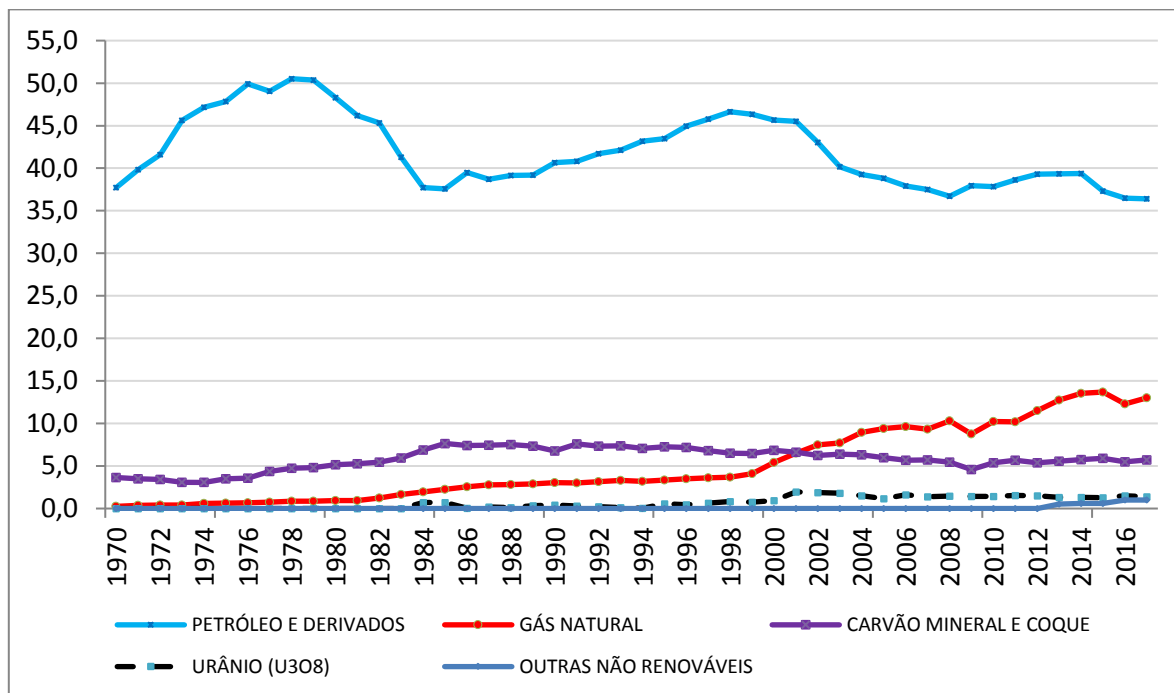


Figura 3 – Participação (%) das fontes não renováveis na matriz energética brasileira entre os anos de 1970 e 2017 (EPE, 2019)

Nos próximos anos presume-se que haverá relevante potencial de crescimento do uso do gás natural no Brasil, devido ao aumento da oferta de gás natural provenientes da província petrolífera do pré-sal e da Bacia de Sergipe-Alagoas (PETROBRAS, 2019). A exploração planejada do pré-sal pode alavancar o desenvolvimento socioeconômico do Brasil (TOLMASQUIM, 2012).

Em termos de energia renovável, entre 2003 e 2017 observou-se uma tendência estável na oferta de energia, via fonte hidráulica nacional e importada, diferentemente das tendências de oferta dos derivados da cana-de-açúcar e da lenha/carvão vegetal, que foram, respectivamente, de crescimento e retração conforme exibido na Figura 4. O gás natural é, atualmente, a fonte energia com maior taxa de crescimento, em contraste com o carvão mineral/coque e a lenha/carvão vegetal, que estão cada vez mais com tendência de

retração (EPE, 2014). Esta tendência de crescimento poderá possibilitar que o gás natural se torne a segunda fonte de energia com mais participação na matriz energética brasileira, à frente da fonte de energia dos derivados da cana, cuja participação em 2013 era de 16,1%, e ficando atrás apenas da fonte petróleo e derivados, cuja participação em 2013 era de 39,3%.

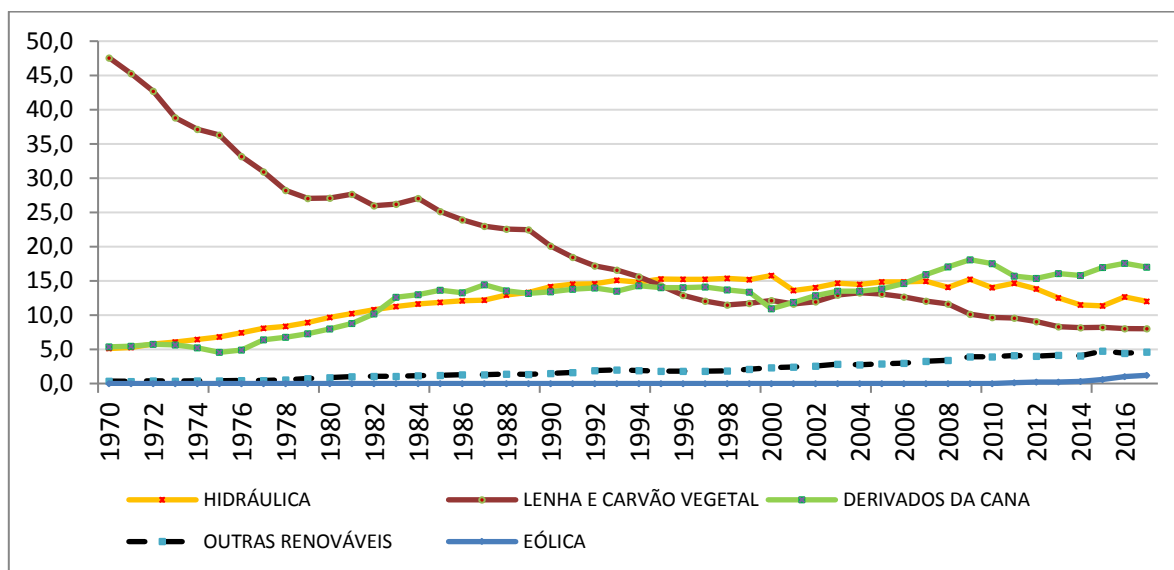


Figura 4 – Participação (%) das fontes renováveis na matriz energética brasileira entre os anos de 1970 e 2017 (EPE, 2019)

Cabe ressaltar que, desde 1970, a participação do gás natural na matriz energética nacional era inferior ao montante de energia proveniente da fonte hidráulica. Observa-se que, a partir de 2013, quando a participação do gás natural atingiu cerca de 12,5% e a energia proveniente da fonte hidráulica atingiu cerca de 12%, esta situação se inverteu. Este fato demonstra que a geração de energia elétrica no Brasil, décadas atrás limitada às usinas hidrelétricas, cada vez mais tem sido realizada por termelétricas a gás natural, principalmente.

A tendência de crescimento da participação do gás natural pode também ser explicada pelo aumento da oferta do gás natural no Brasil, seja ele nacional ou importado, conforme pode ser observado na Figura 5, referente ao período de janeiro de 2007 a fevereiro de 2019, elaborado a partir dos dados do Boletim Mensal de Acompanhamento

da Indústria de Gás Natural, publicado pelo Ministério de Minas e Energia – MME (MME, 2019).

Esse comportamento de crescimento do uso do gás natural no Brasil, em boa parte deste período, manteve-se, mesmo tendo ocorrido uma crise mundial iniciada no final de 2008 e a desaceleração da economia nacional a partir de 2016. Outra consideração relevante, é que a produção *offshore* de gás natural continua maior que a produção em terra. O tipo predominante de gás nacional produzido ainda é do tipo associado, apesar da parcela de gás não associado estar com tendência de crescimento. Desde o final de 2015, a oferta de gás importado tem sido inferior à oferta de gás nacional (MME, 2019), por conta dos efeitos da recessão econômica no país iniciada em 2014.

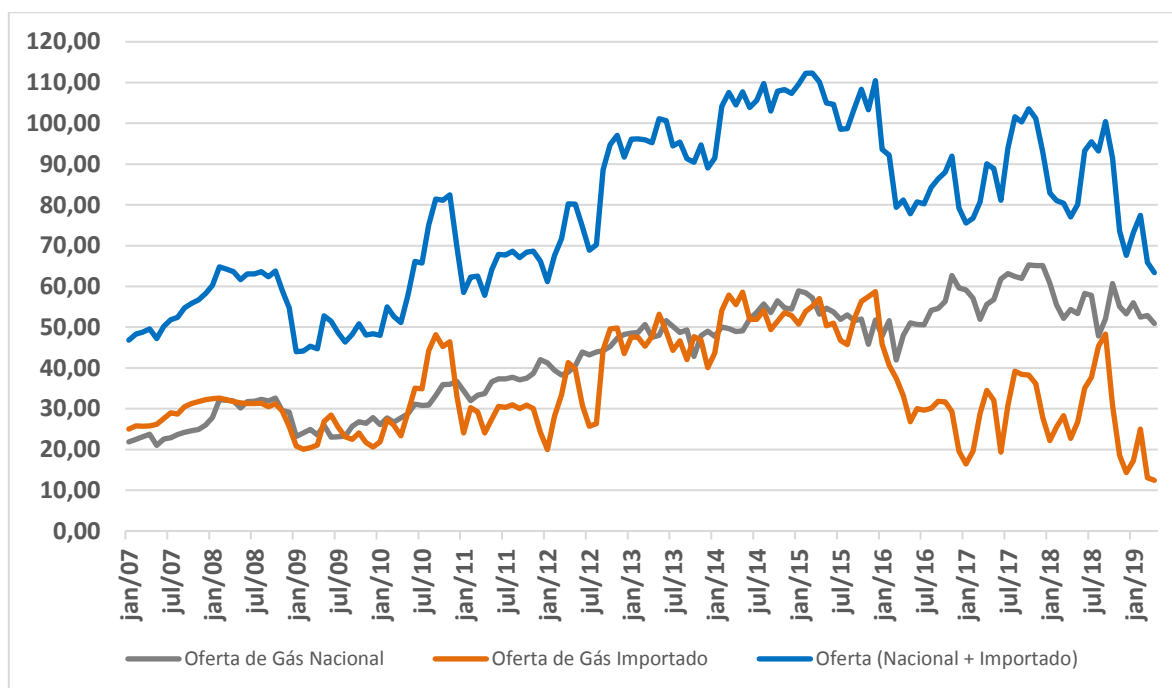


Figura 5 – Oferta de gás natural no Brasil (milhões de m³/d) no período de Jan/2007 a Fev/2019 (MME, 2019).

Na Figura 6, observa-se a tendência de crescimento da reinjeção e do consumo de gás natural nacional produzido no setor de E&P no Brasil, concomitantemente com a redução da sua parcela de queima e perda. Parte do consumo gás natural no setor de E&P é utilizado na geração de energia elétrica em Unidades de Produção (plataformas). Já a

redução da queima de gás natural pelas empresas concessionárias do setor de E&P do Brasil é uma exigência da ANP. Chama a atenção a grande quantidade de gás natural reinjetado nos poços de produção neste último ano, dada a crescente dificuldade de escoar o gás natural até a costa. O aumento na injeção observado nos últimos 3 anos, também pode ser explicado pela paralização de projetos nos segmentos de exploração e produção de petróleo e gás, afetados pela recente crise na Petrobras.

Ao longo dos próximos anos está prevista a construção de diversas infraestruturas de produção, escoamento, processamento e transporte de gás natural no Brasil, tais como a construção de novos terminais de GNL e a construção de gasodutos para o escoamento da produção de gás natural, que contribuirão para o aumento da oferta de gás natural ao mercado.

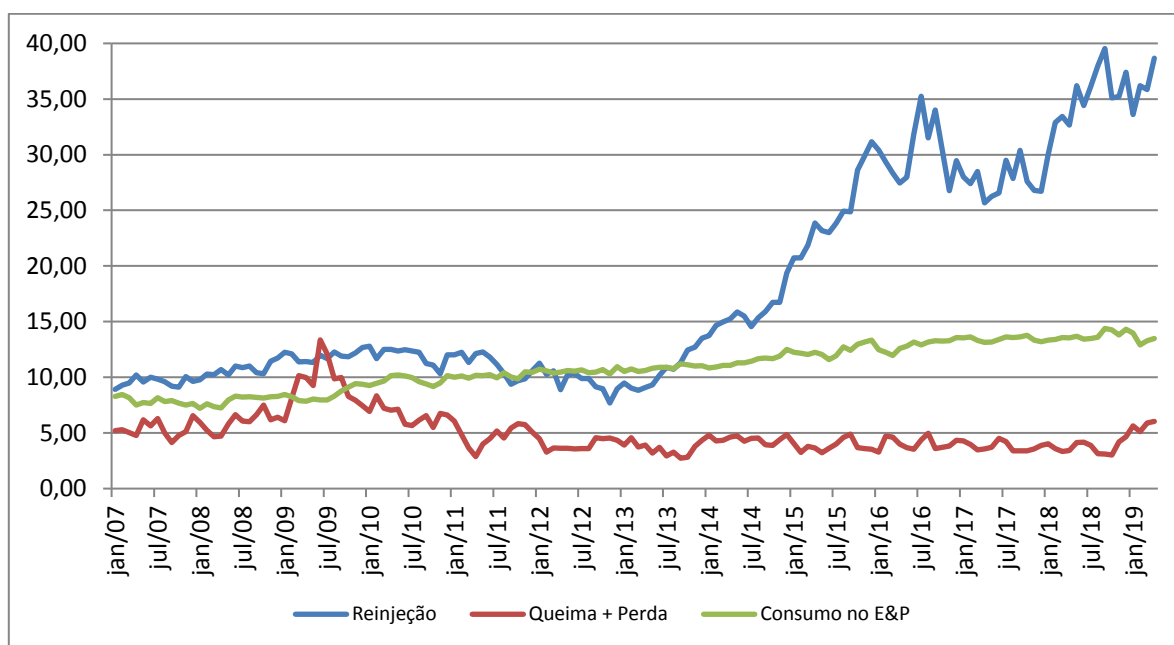


Figura 6 – Reinjeção, ‘Queima+Perda’ e Consumo de gás natural no setor de E&P brasileiro (milhões de m<sup>3</sup>/d) Jan/2007 a Fev/2019 (MME, 2019).

Grande parte desta oferta de gás natural será utilizada para atender as futuras necessidades do segmento de geração de energia elétrica (EPE, 2013).

A Figura 7 ilustra as tendências de consumo de gás nas refinarias brasileiras e em

termelétricas interligadas direto ao produtor ou caracterizadas como consumidores livres, no período de janeiro de 2007 a fevereiro de 2019. Novamente é possível observar os efeitos da recessão econômica no país iniciada em 2014, uma vez que a demanda por energia elétrica e, conseqüentemente, a demanda pelo acionamento das termelétricas e de outras fontes de energia tem sido menor. Nesta análise não deve ser desconsiderada a influência do regime das chuvas, ou seja, o nível dos reservatórios das hidrelétricas como um fator que contribui para o menor acionamento das termelétricas e parte do período pós recessão econômica no país iniciada em 2014.

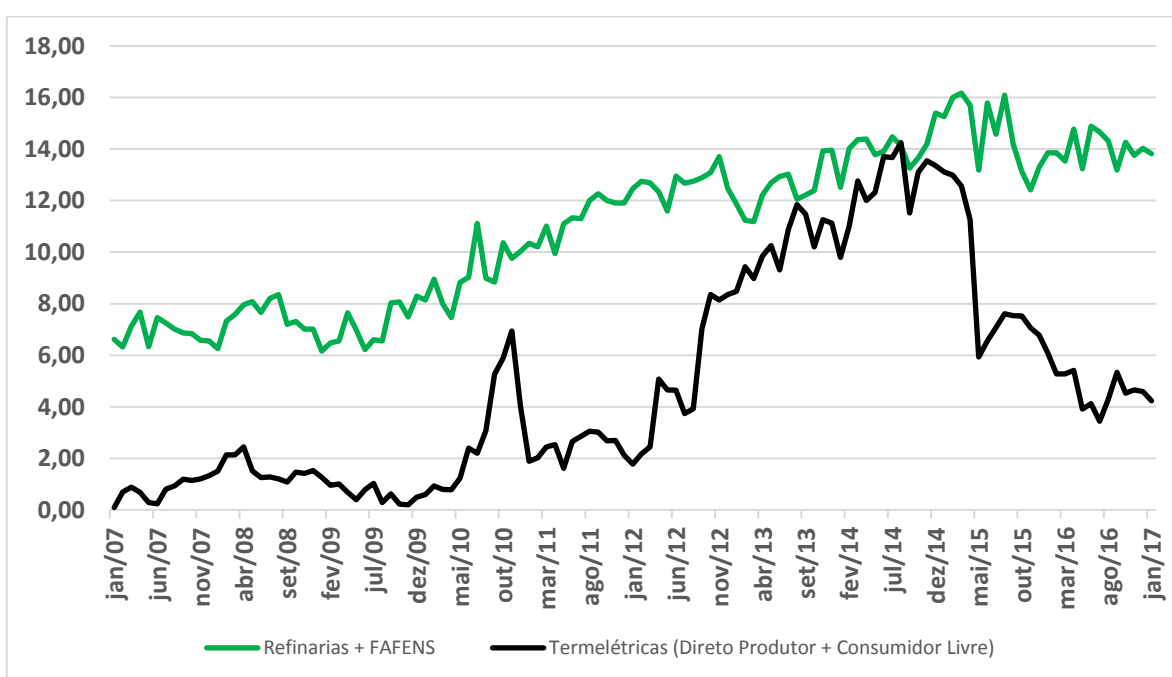


Figura 7 – Consumo de gás em ‘Refinarias + FAFENS’ da Petrobras e UTEs (Direto do Produtor + Consumidor Livre), em milhões de m<sup>3</sup>/d, no período de Jan/2007 a Fev/2019 (MME, 2019)

Uma análise mais detalhada do consumo de gás natural, por classe de consumo, observado no período de 2009 a 2018, indica que o setor de geração de energia elétrica apresentou um comportamento diferente dos demais setores. É possível notar, conforme exibe a figura 8, de um modo geral, que nos anos em que houve a diminuição da geração de energia elétrica a gás natural, houve também o aumento do consumo nas outras classes.

De fato, considerando que a geração de energia elétrica consome elevadas quantidades de gás natural, é de se esperar que, quando este tipo de consumidor não está em operação, existe uma maior quantidade de gás que pode ser disponibilizada para os diversos outros tipos de consumidores.

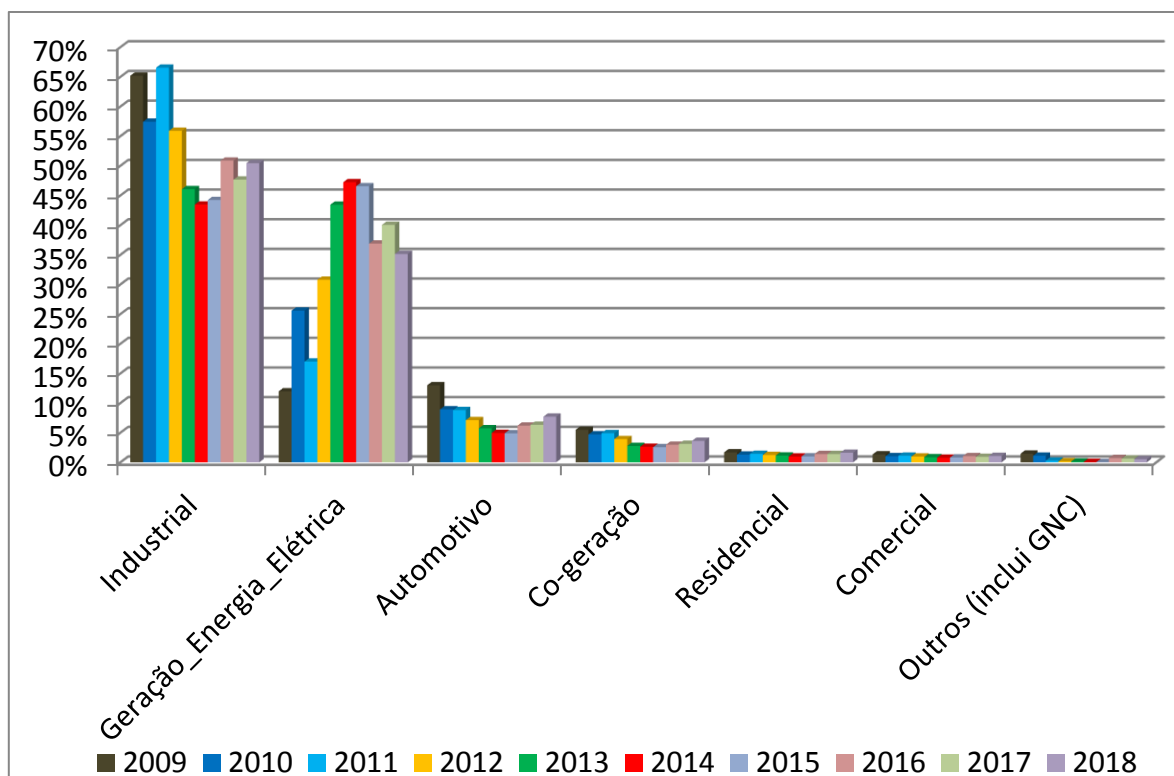


Figura 8 – Consumo médio (%) de gás natural no Brasil – 2009 a 2018, segmentado por classe de consumo (MME, 2019)

Neste contexto de ascensão de esforços para consolidar os regulamentos e o planejamento no setor do gás natural, o Ministério das Minas e Energia publicou no final de 2013, o Plano de Expansão Decenal da Malha de Gasodutos de Transporte – PEMAT 2022, sinalizando aos agentes de mercado quais as perspectivas de oferta e demanda de gás no ciclo 2013 – 2022.

### 3.1.5 O Setor da Energia Elétrica

O escopo da presente revisão histórica será concentrado nos principais aspectos relacionados com a geração de energia elétrica por meio de termelétricas, dado que não é objetivo desta tese abordar as inúmeras características e questões deste setor.

De um modo real, o setor da energia elétrica, desde seu surgimento, alternou ocasiões em que a prestação dos serviços de geração e transmissão em vários países ora se deu através de empresas estatais (após a Segunda Guerra Mundial), ora por empresas privadas (na década de 90), ainda que parte de suas infraestruturas, fossem indústrias de rede e possuíssem características de monopólio natural.

Esta transição na organização do setor elétrico mundial teve início no Reino Unido, na década de 80, e incluiu a introdução da desverticalização, de mecanismos de promoção da concorrência, de inovações no regime tarifário, de nova estrutura e sistemática de contratos, de um novo regime regulatório e da estratégia de privatização (ZANFELICE, 2007).

A geração total de energia elétrica que movimenta a economia de cada país ou região, também denominada matriz elétrica mundial, sofreu muitas mudanças desde o final do século passado até a presente década. A partir da comparação entre os valores observados no ano de 1973, por exemplo, com os observados na presente década, pode-se notar a diminuição da utilização de óleo, concomitantemente com o aumento do uso do gás natural. Também se observa o aumento da utilização de outras fontes, tais como a eólica e a solar. A figura 9 exibe a geração elétrica segmentada por fonte no mundo. Os valores totais de geração nos anos de 1973, 2015 e 2016 foram, respectivamente, 6115 TWh, 24255 TWh e 24789 TWh.

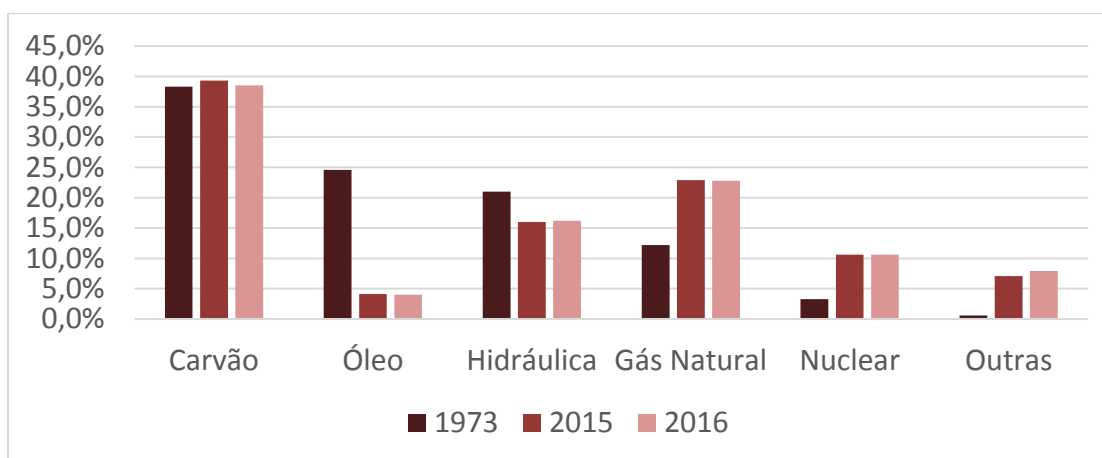


Figura 9 – Geração elétrica por fonte no mundo (ANEEL, 2017)

As mudanças na matriz elétrica mundial, ainda estão em curso, e estão ocorrendo com maior ou menor grau de intensidade. Uma análise da utilização da quantidade de energia elétrica gerada, segmentada por região no mundo, indica um comportamento de leve tendência de aumento desse tipo de geração, em todas as regiões como um todo, com exceção da região da Ásia e Oceania, que apresenta uma elevada tendência de crescimento, por conta do crescimento econômico da China. A figura 10 exibe a geração elétrica segmentada por região no mundo.

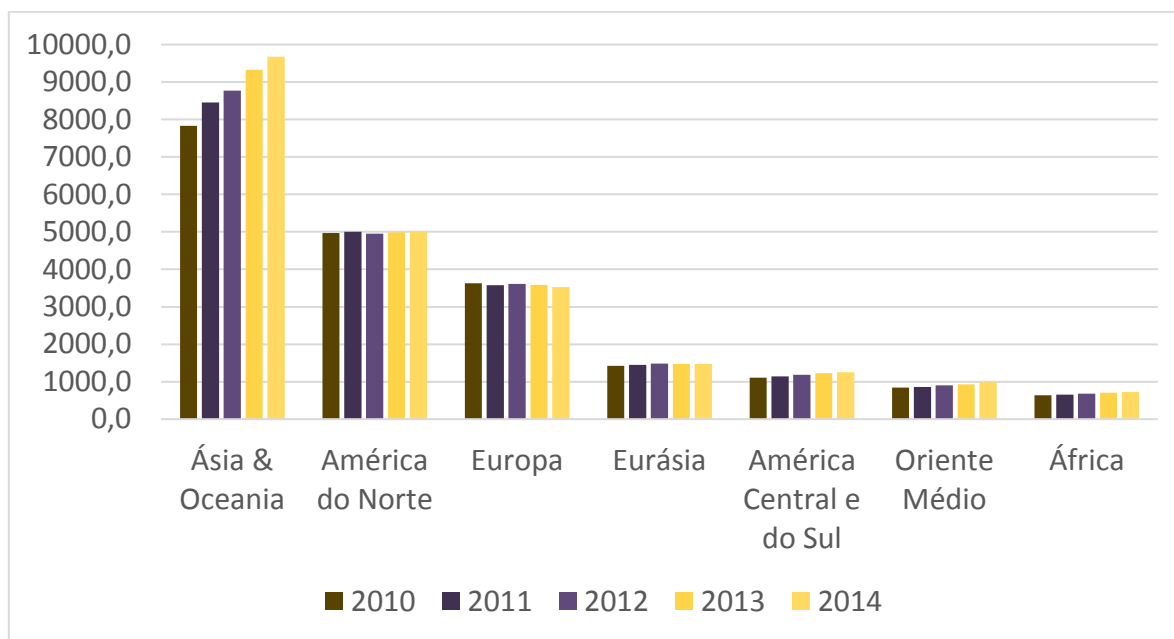


Figura 10 – Geração elétrica por região no mundo (ANEEL, 2017).

Em 2016, o consumo médio de energia elétrica por habitante no mundo foi de 3.052 kWh. Merecem destaque os consumos médios de energia elétrica por habitante nos seguintes países industrializados e desenvolvidos economicamente: Estados Unidos (12.833 kWh/hab), Japão (7.865 kWh/hab), Alemanha (7.014 kWh/hab), Reino Unido (5.082 kWh/hab), França (7.044 kWh/hab), Itália (5.099 kWh/hab) e Canadá (15.189 kWh/hab). Neste mesmo período, o consumo médio de energia elétrica por habitante no Brasil foi de 2.555. Cabe destacar que dos países acima citados apenas os Estados Unidos possuem população maior do que a do Brasil.



Especificamente, com relação à geração termelétrica a partir do gás natural, observa-se que, em 2014, os Estados Unidos foi quem mais gerou energia utilizando esta fonte fóssil. A figura 11 exibe o percentual da geração térmica a gás natural, segmentada por país, em 2014. Destaque para o Japão, que praticamente não possui reservas de gás natural, mas que produz elevada quantidade de energia elétrica por meio da regaseificação de GNL importado.

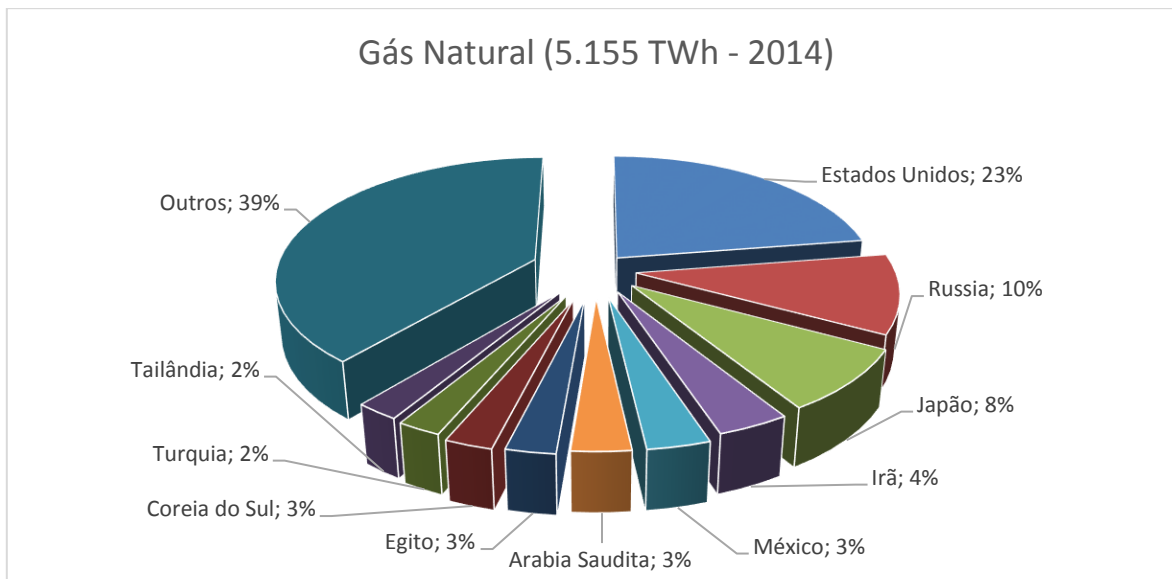


Figura 11 – Geração Térmica a gás natural em 2014 (%), por país (ANEEL, 2017)

### 3.1.6 O Setor da Geração de Energia Elétrica no Brasil

A indústria de energia elétrica foi introduzida na região sudeste do Brasil a partir de 1897. Nesta época praticamente não havia o controle federal sobre a concessão de serviços públicos de energia, que era realizada por empresas privadas estrangeiras.

Após a crise de 1929, o governo brasileiro aumentou a presença do Estado na indústria de energia elétrica, que passou a ter um papel estratégico e, portanto, não poderia estar sob controle estrangeiro. A partir de então, o governo passou a investir na produção de energia visando reduzir a escassez de oferta. Em 1993, o governo iniciou o processo de abertura do setor elétrico permitindo o livre acesso ao sistema de transmissão.

Entretanto, observou-se à época que a falta de investimento na geração de energia elétrica por meio de usinas hidrelétricas, consideradas mais caras e de elevado prazo de construção, demandou uma maior implantação de projetos de usinas termelétricas, que utilizavam combustíveis fósseis, pois a essa altura a produção de derivados do petróleo no Brasil estava em ascensão. O governo brasileiro, então, lançou em 2000, o Programa Prioritário de Termelétricidade – PPT, que contemplava vários incentivos aos projetos de geração de energia elétrica desta modalidade, inclusive aqueles que utilizassem gás natural como combustível. Desta forma, a possibilidade de utilização do gás natural importado da Bolívia por meio do gasoduto Bolívia-Brasil, já em fase final de construção, , foi considerada uma alternativa para a solução do problema de oferta de energia elétrica. Contudo, a desvalorização do real frente ao dólar, observado no final da década de 90, aumentou a percepção do risco associado ao preço do gás natural importado, principalmente da Bolívia, pelos investidores de parte dos projetos do PPT, fato este que justifica a não implantação de grande parte dos supracitados projetos (ZANFELICE, 2007).

Em 2001, o baixo nível de água nos reservatórios de boa parte das hidrelétricas nacionais, bem como a dificuldade em conciliar o fluxo de energia entre as regiões produtoras e consumidoras de energia elétrica, contribuíram para a ocorrência de um apagão. O Governo à época, na tentativa de minimizar o risco da falta de energia elétrica, implantou um programa de racionamento de energia, estabelecendo metas de consumo e penalidades aos consumidores, que violassem tais metas. Tal fato causou uma mudança no comportamento dos consumidores, tais como a alteração de processos industriais, a substituição de equipamentos e a mudança no perfil diário de consumo de energia elétrica.

Desde então, com a implantação do novo modelo do setor elétrico brasileiro em 2002, o setor da energia elétrica alternou ocasiões de maior ou menor risco de falta de energia elétrica, bem como uma maior variedade de fontes geradoras. A figura 12 exibe a geração total de energia elétrica no Brasil, segmentada por fonte. Os valores totais de geração nos anos de 1973, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017 foram, respectivamente, 64.7 TWh, 552.5 TWh, 570.8 TWh, 590.5 TWh, 581.7 TWh, 579 TWh e 624 TWh.

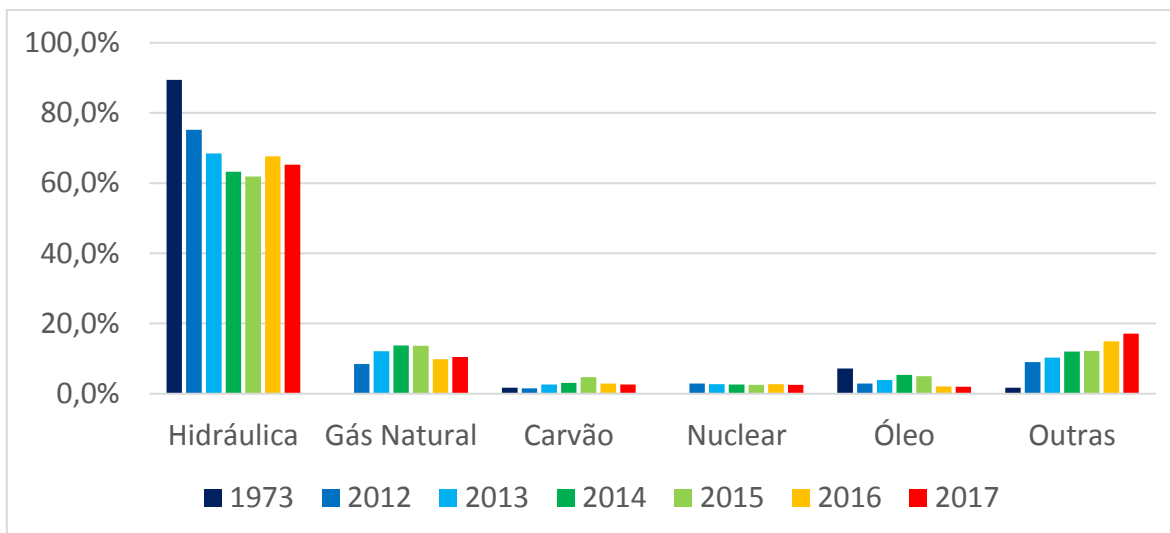


Figura 12 – Geração elétrica por fonte no Brasil (ANEEL, 2017).

Dentre as várias alterações, impostas no novo modelo deste setor, está a forma de contratação de energia através de leilões, promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com a finalidade de estimular a competição no segmento de geração.

A estrutura do mercado do setor elétrico é composta por diversos agentes regulados, a saber: comercializador, produtor independente, gerador, consumidor especial, consumidor livre, autoprodutor, autoimportador e distribuidor. Neste contexto, cabe à Eletrobrás, empresa criada em 1962, o papel da coordenação do desenvolvimento da indústria de energia elétrica no Brasil, por meio de suas subsidiárias: CHESF, Furnas, Eletrosul e Eletronorte.

Com relação à quantidade de instalações de geração de energia elétrica em operação, dados publicados pela ANEEL em 2015 indicam um total de 4.089 (ANEEL, 2015). Quanto aos tipos de instalações, tem-se o seguinte arranjo: (i) Usinas Termelétricas (UTE): 2.627; (ii) Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH): 501; (iii) Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH): 475; (iv) Usinas Eolioelétricas (EOL): 258; (v) Usinas Hidrelétricas (UHE): 200; (vi) Usinas Fotovoltaicas (UFV): 23; e (vii) Usinas Termonucleares (UTN): 2. O total de UTEs inclui tanto as usinas para geração para uso próprio, quanto as utilizadas para geração de energia elétrica como serviço público, ou seja, para consumidores externos. Das 2.627 UTEs em

operação 139, cerca de 5,29%, utilizam gás natural como combustível principal.

Com relação ao sistema de transmissão brasileiro, cabe ressaltar que existem diversas linhas de transmissão no Sistema Interligado Nacional - SIN, conectando todas as suas regiões, com diversos níveis de tensão, dentre elas 138kV, 230kV, 345kV, 440kV, 500 kV, 750kV, 600kV cc e 800kVcc, conforme exibido na figura 13. As linhas que operam com tensões inferiores à 138kV são linhas de distribuição e não são controladas pelo ONS.

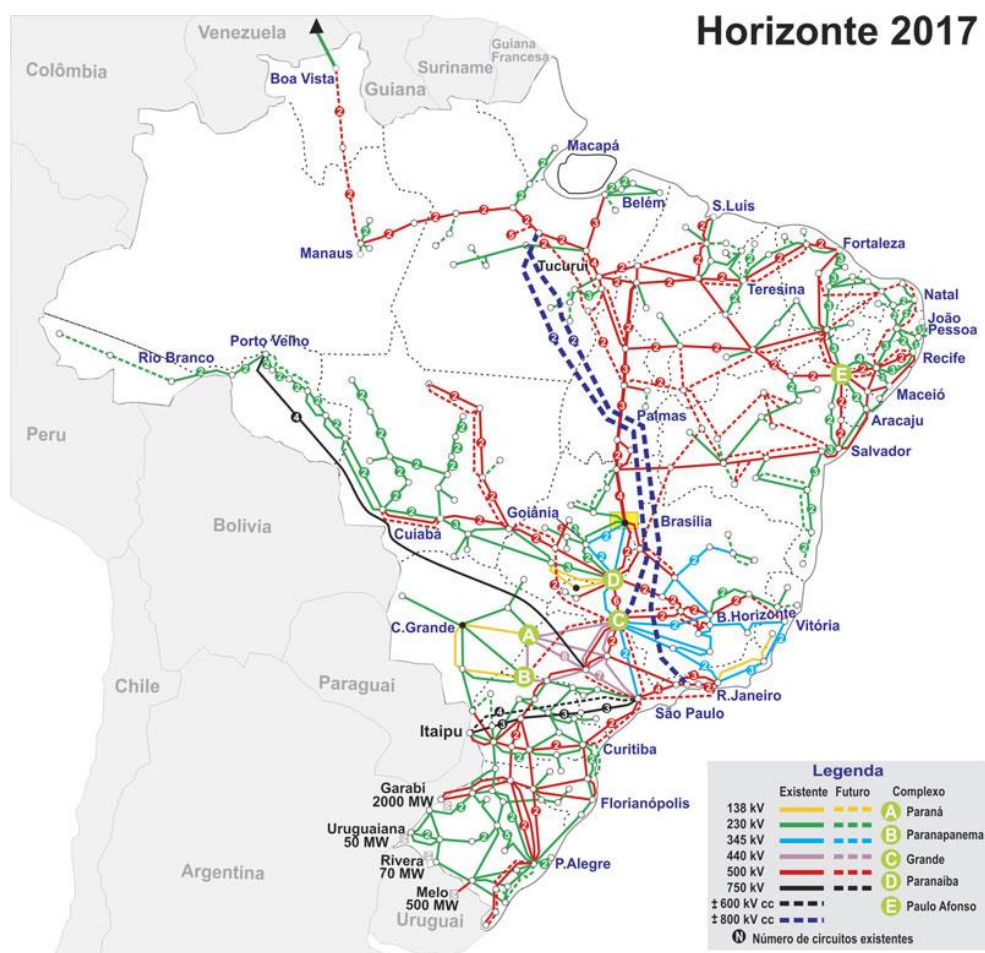


Figura 13 – Sistema Interligado Nacional – SIN, por nível de tensão (ONS, 2017).

A operação centralizada do sistema elétrico brasileiro é realizada pelo ONS. As distintas características dos diversos tipos de instalações de geração, tais como o funcionamento intermitente e a operação em modo bicomcombustível, dentre outras, fazem com que a produção e a transmissão de energia elétrica em um país de grandes dimensões,

como é o caso do Brasil, seja considerando um desafio. A maior parte do sistema elétrico brasileiro opera em rede, e é considerado do tipo hidrotérmico. Os sistemas hidrotérmicos ficam sujeitos a exposição de riscos de déficit e superávit energético, dado que a energia hidráulica para produção de eletricidade depende de regimes hidrológicos, submetidos a incertezas. Tais incertezas podem ocasionar a necessidade de vertimentos desnecessários, ou situações de racionamento para economia de água, tornando os procedimentos operacionais mais complexos. Convém destacar que, o fato de que, parte da produção de combustível (óleo combustível ou gás natural) está associada, em um maior ou menor grau a depender de sua origem, à produção de petróleo, aumenta a quantidade de incertezas associadas aos sistemas hidrotérmicos (CORREIA, 1989).

As termelétricas a gás natural, considerando as formas de aproveitamento do calor gerado durante a produção de energia elétrica, podem ser classificadas (LORA e NASCIMENTO, 2004) como: (i) do tipo ciclo aberto; ou (ii) do tipo ciclo combinado (com aproveitamento para geração de energia elétrica excedente a partir de turbinas a vapor). Tipicamente, a eficiência das termelétricas do tipo ciclo aberto está em torno de 40%, enquanto a eficiência de termelétricas do tipo ciclo combinado está limitada a 60%.

Com relação às instalações auxiliares, as mesmas podem incluir: (i) gasoduto; (ii) linha de transmissão; e (iii) dutos emissários para suprimento / descarte de água. Com relação ao objetivo da produção de energia elétrica utilizando como combustível o gás natural, observou-se que este pode ser: (i) para uso interno; (ii) para uso externo; ou (iii) para uso interno e externo. Convém salientar que, dependendo de como a energia elétrica é geograficamente disponibilizada, sua geração pode ser classificada como centralizada ou distribuída (localizada próximo do consumidor final).

Com relação às finalidades, observou-se que estas podem ser para: (i) utilização como backup, em caso de emergência ou falha de fornecimento de uma fonte principal de energia elétrica; (ii) utilização, em complemento ou substituição, de uma fonte de energia elétrica durante uma parte do dia, principalmente nos horários de pico de demanda; e (iii) utilização como fonte principal de energia elétrica, de forma contínua.

Com relação aos equipamentos, eles podem ser classificados como: (i) motor de grande porte; (ii) turbina de grande porte; (iii) motor de pequeno porte; e (iv) microturbina. Tais equipamentos podem utilizar o gás natural como único combustível ou como um dos combustíveis utilizados na combustão, caracterizando, desta forma, o equipamento como bicomcombustível. Cabe salientar que, um equipamento bicomcombustível pode funcionar com um tipo de combustível por vez ou com uma mistura de vários combustíveis. Parte das termelétricas inicialmente construídas para operarem com um único combustível, posteriormente foi convertida para operarem como sendo do tipo bicomcombustível. Também foram construídas no Brasil usinas para operar em ciclo aberto e depois foram convertidas para ciclo combinado para que operassem com maior rendimento.

A empresa pública brasileira responsável pelos estudos e pesquisas, visando o planejamento integrado do setor energético do Brasil, conforme disposto na Lei nº 10.847, de 15/03/2004, é a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, criada em 2004.

### **3.1.7 A integração dos mercados de gás natural e energia elétrica no Brasil**

Primeiramente, compete destacar que desde a criação destes setores observa-se a falta de sincronismo na implantação de ações estratégicas entre os mesmos, ou seja, a falta de um efetivo planejamento integrado. Frequentemente, observou-se que a tomada de decisões de investimento em infraestruturas nos dois setores foi realizada em momentos distintos. Um exemplo desta situação foi a implantação do Plano Prioritário de Termelétricas (RODRIGUES, 2011) no ano 2000, que previu a utilização de 49 termelétricas para gerar energia elétrica, mas seus projetos tiveram grandes dificuldades para obter financiamento e/ou o combustível (gás natural), como foi o caso da Usina Termelétrica de Santa Cruz, de propriedade de Furnas Centrais Elétricas.

A conversão da UTE Santa Cruz teve início em 2002, com previsão de término para 2007, porém isso só foi possível cerca de 10 anos após, uma vez que não havia escala no projeto que justificasse o investimento no gasoduto. Somente após a conclusão da obra do

gasoduto de distribuição pela empresa estadual de gás canalizado (CEG), para suprimento da referida termelétrica é que, em 2011, foi assinado um contrato entre Furnas e Petrobras, para fornecimento do gás para a UTE, com início de fornecimento a partir de janeiro de 2012.

Outros casos de ineficiência na tomada de decisões das empresas de geração de energia elétrica também foram observados, sendo que em parte destes casos foram percebidos atrasos na implantação de empreendimentos, que culminaram na crise do setor de geração de energia elétrica em 2001 (ABREU, 2009).

Um exemplo desta situação foi o atraso na implantação do gasoduto Urucu – Coari – Manaus (UCM), empreendimento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) lançado pelo governo federal em 2007. O referido atraso, principalmente na construção do trecho Coari-Manaus, contribuiu para que os consumidores desta região deixassem de economizar com a redução do valor da conta de energia elétrica. Essa redução seria aplicada, por conta da redução do subsídio de combustível, para funcionamento do sistema isolado da região norte do país, concomitantemente com o funcionamento de termelétricas a gás natural, que seriam supridas pelo gasoduto UCM.

Algumas vezes observou-se que, as ações para a garantia da disponibilidade da oferta de energia elétrica, proveniente de termelétricas, acarretavam o menor desempenho operacional dos agentes participantes da indústria do gás natural. Tal situação pode ser exemplificada através do aumento da complexidade na contratação da aquisição de grandes quantidades de gás natural liquefeito importado, algumas vezes adquirido com maior custo em um ambiente com grandes incertezas, devido à importação de GNL no mercado spot, como foi observado no ano de 2008 (DEMORI, 2008).

Com a elaboração do Plano de Expansão da Malha de Transporte (PEMAT) de gás natural pela EPE, realizada entre 2013 e 2014, mais um exemplo da falta de planejamento integrado ficou patente na relação entre estes dois setores: a definição da localização de termelétricas a gás natural e de suas infraestruturas não foi realizada de forma integrada, apenas elaborada pela EPE e encaminhada para outras instituições e agentes para validação

(EPE, 2013). A ausência da caracterização dos gargalos de suprimento de energia elétrica e gás natural nestes tipos de estudo, por vezes, dificultou a escolha do melhor local para implantação de usinas termelétricas. Evidência desta ausência de sinal locacional pode ser observada no fato de a ANEEL ainda não ter efetivamente realizado um Leilão de Energia Nova (ANEEL, 2014), no qual seja explicitado a partir de qual *citygate* (existente ou novo) ou gasoduto, uma nova termelétrica melhor atenderá a expectativa de mitigação de gargalos existentes ou futuros.

Alguns dos principais efeitos associados à falta de planejamento integrado entre os setores decorrem da participação verticalizada da Petrobras nestes setores, acarretando, em alguns casos, a falta de competitividade por parte de outros agentes do setor (FARINA et al, 2011), sem garantia de que o melhor projeto será sempre implantado. Atualmente a Petrobras está em processo de reposicionamento no mercado do gás natural (CADE, 2019).

Cabe destacar também, a histórica falta de integração no planejamento observada pelos regimes de outorga de autorização ou concessão de infraestruturas. No Brasil, uma linha de transmissão ou uma termelétrica (seja a gás natural ou outro combustível) são empreendimentos concedidos, enquanto gasodutos sempre foram empreendimentos autorizados, até que em 2009 foi promulgada a Lei do Gás que alterou o regime para concessão para novos gasodutos de transporte, permanecendo autorização apenas para alguns casos restritos. A autorização é uma modalidade de outorga precária, que pode ser revogada a qualquer tempo. Já a concessão é uma modalidade mais vinculante, pois o poder concedente firma um contrato de concessão com vigência de vários anos e que só pode ser antecipadamente extinto caso as condições estipuladas no referido instrumento não sejam cumpridas. Importante destacar que, desde a promulgação da Lei do gás até a presente data, não houve a licitação de nenhum gasoduto de transporte.

A expansão dos dois setores quase sempre dispensou a conciliação de interesses que beneficiariam ambos os setores. Pode-se citar o caso em que as dimensões das infraestruturas de gasoduto e linha de transmissão, do projeto de uma termelétrica a gás natural inscrita no Leilão de Energia Nova da ANEEL de 2015, não eram os menores possíveis



(WÄRTSILÄ, 2019). Caso fossem, tal fato reduziria o custo de implantação. Outro exemplo, desta constatação, pode ser simbolizado pela escolha do local de construção de uma termelétrica a gás natural: caso seja escolhido um local situado na margem de um rio, oposta ao local de onde vem o gasoduto, será acrescido ao projeto o elevado custo de um furo direcional para a tubulação passar seguramente por debaixo do rio, quando tal custo poderia ser evitado se a termelétrica fosse instalada na mesma margem do gasoduto e se fosse a linha de transmissão que cruzasse o rio, sem custos adicionais dada a facilidade desse tipo de infraestrutura transpor obstáculos na superfície terrestre.

Convém destacar, ainda, que nunca foi realizada no Brasil uma licitação integrada “gasoduto - usina termelétrica - linha de transmissão”. Nesta situação, uma única empresa seria responsável por construir os três empreendimentos e, com isso, o custo final seria menor do que contratar três empresas diferentes para construir cada “módulo” da solução.

Dentre os piores efeitos da falta de planejamento integrado entre os setores do gás natural e o da geração de energia elétrica foi a incapacidade da entrada em operação de termelétricas do PPT no Nordeste, em janeiro de 2004, por conta da falta de gás natural para atender demanda da termelétrica em plena carga, conforme dados da Nota Técnica nº43/2018-SRG/ANEEL-SIM-SDL/ANP. Foram observados casos em que termelétricas não entraram em operação, após terem sido solicitadas pelo Operador Nacional do Sistema – ONS, mesmo tendo todas as condições necessárias para entrar em operação (ANEEL, 2007). Em alguns casos, para realizar o suprimento de gás para as termelétricas da Petrobras em 2004, foi necessário que esta reduzisse o consumo de gás natural em suas refinarias. Essa aparente benéfica flexibilidade criou incerteza no mercado. Qual seja, se a Petrobras não havia se comprometido em fornecer gás ao mercado, em uma quantidade superior à quantidade que era capaz de entregar.

Um último exemplo do efeito da falta de planejamento integrado entre os setores em estudo decorre da forma desorganizada de como foram criadas as instituições do governo, em nível de ministério e de agências reguladoras, e os agentes de mercado integrantes destes setores. A criação do Ministério de Minas e Energia se deu após a criação

de Furnas Centrais Elétricas e da Petrobras, dentre outros agentes. A ANEEL, por exemplo, foi criada em data posterior à primeira licitação de hidrelétrica no Brasil. A ANP e a ANEEL foram criadas cerca de 30 anos após a entrada em operação da Usina Termelétrica de Santa Cruz. A maioria das termelétricas construídas na década de 90 teve seus contratos redigidos sem que houvesse o marco regulatório promulgado pelo governo federal para cada um dos setores envolvidos.

### **3.1.8 Discussões e Considerações**

Uma das principais características da interface entre os setores de energia elétrica e do gás natural é a produção de energia elétrica durante as etapas de produção, regaseificação, processamento, transporte, distribuição e consumo de gás natural.

No passado, a coordenação e o planejamento integrado entre tais setores estavam concentrados em reduzir principalmente as perdas de cada setor, ou seja, o problema da queima ou reinjeção do gás versus o problema do vertimento de água.

Até então, o planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro, predominantemente hidrotérmico e de grande porte, teve seus desdobramentos em função de uma decisão básica: (i) despachar usinas termelétricas para manter os níveis dos reservatórios de hidrelétricas em alta; ou (ii) economizar ao máximo o gasto com combustível de termelétricas, esvaziando os reservatórios das hidrelétricas.

Neste contexto, a termelétrica a gás natural aparece como uma instalação consumidora de gás natural capaz de gerar elevada quantidade de energia com grande flexibilidade, sendo, portanto, uma boa alternativa para atender as flutuações de demanda por energia elétrica.

Nesta última década, o sistema elétrico brasileiro está sofrendo mudanças, principalmente com o acréscimo da geração proveniente de usinas eólicas e fotovoltaicas, que são fontes que, no longo prazo, irão substituir as fontes fósseis não renováveis. Entretanto, tais fontes possuem características de geração intermitente, pois a disponibilidade de vento ou luz possui características cíclicas, que muitas vezes, não

coincidem com a demanda por energia elétrica, principalmente nos horários de pico.

O planejamento integrado dos setores do gás natural e de energia elétrica deve minimamente considerar os quatro fatores citados a seguir. O primeiro refere-se a necessidade de atendimento da crescente demanda de gás natural e de energia elétrica em função do crescimento demográfico da população brasileira. O segundo é a influência do Produto Interno Bruto (PIB) como elemento que causa o crescimento ou a retração da demanda por energia elétrica. O terceiro é a necessidade da interiorização do uso do gás natural e da energia elétrica no Brasil. Por último, mas não menos importante, é a crescente necessidade do governo brasileiro de mitigar as emissões de gases causadores de efeito estufa e de poluentes nos setores de energia e de transportes, inclusive com o uso de biocombustíveis. O grau como esses fatores ganham prioridade como metas governamentais a serem alcançadas nos curto e médio prazos faz com que se torne ainda mais necessário o planejamento integrado dos setores do gás natural e de energia elétrica pelos agentes de mercado e pelo governo, em especial o Conselho Nacional de Política Energética – CNPE.

Atualmente, vários cenários de crescimento estão sendo considerados para o Brasil nos próximos anos, sendo alguns destes moderados e outros de baixo crescimento. Independentemente destes cenários, faz-se necessário a construção e a entrada em operação de novos empreendimentos despacháveis de geração de energia, dado que empreendimentos existentes vão deixar de operar por estarem no final de sua vida útil.

Nestes termos, observa-se que, os empreendimentos do tipo usina termelétrica a gás natural possuem custos de investimento e prazos de implantação menores do que, por exemplo, os observados em empreendimentos do tipo usinas hidrelétricas. Adicionalmente, as poucas usinas hidrelétricas que estão sendo construídas no Brasil são do tipo fio d'água, ou cada vez mais possuem pequenos reservatórios, por questões ambientais, ou por questões do não favorecimento das características topográficas das bacias hidrográficas ainda disponíveis para exploração.

Ademais, por conta dos efeitos da recessão econômica iniciada em 2014, observa-

se que o Brasil possui restrições financeiras, ou seja, na maioria dos casos depende de investimentos privados, para construir todos os empreendimentos que necessita para suprir a demanda de energia elétrica prevista para o médio prazo e, tal fato, corrobora com a necessidade de implantação de soluções otimizadas e de baixo custo, considerando, principalmente a possibilidade de menor impacto na tarifa de transporte e distribuição de gás natural e de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

O fato de existir uma relevante interface entre os setores em estudo caracteriza a necessidade de uma visão de planejamento energético multisetorial, considerando a operação simultânea de todas as diferentes formas de energia disponíveis e levando em conta as substituições energéticas que sazonalmente ocorrem ao longo do tempo.

O planejamento da expansão e da operação de ambos os setores deve, portanto, primar por realizar a compensação mútua entre os desequilíbrios energéticos dos sistemas elétrico e do gás natural, bem como reduzir a exposição de riscos de déficit energético.

Especificamente com relação ao planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro, por meio da implantação de novas termelétricas a gás natural, uma série de decisões precisa ser tomada e, podem ser resumidas a partir das seguintes perguntas:

- (i) Qual a melhor maneira de interligar uma nova termelétrica no SIN?
- (ii) Qual a melhor localização de uma nova termelétrica?
- (iii) Qual o melhor traçado da sua linha de transmissão?
- (iv) Qual o melhor traçado de seu gasoduto?
- (v) Qual horizonte deve se considerar no planejamento de implantação de uma nova termelétrica?
- (vi) Qual a demanda (quantidade e capacidade de geração) de novas usinas termelétricas que necessita ser suprida para atender a demanda de consumo de energia elétrica prevista para o horizonte considerado?

Uma alternativa para mitigação da falta de planejamento, observada nos setores em análise, foi muito pouco estudada de forma integrada. Esta mitigação está relacionada com

a necessidade da tomada de decisão para implantação de termelétricas e de suas infraestruturas auxiliares com localização estratégica e otimizada, visando, resumidamente, eliminar ou minimizar gargalos entre os setores, minimizar seus custos de investimento considerando a escassez de recursos, diminuir a capacidade ociosa em gasodutos de transporte e contribuir para a redução das tarifas de transporte de gás natural e de transmissão de energia elétrica, reduzindo desta forma o preço da energia elétrica para o consumidor final.

Uma das relevantes ações do Ministério de Minas e Energia que estão em curso, no tocante ao planejamento da expansão da rede dutoviária de gasodutos de transporte, é a elaboração de um “Plano Indicativo de Gasodutos”, elaborado pela EPE, em atendimento ao disposto no Decreto nº 9.616/2018 do governo federal.

Esta é mais uma das ações incorporadas para o desenho do um “Novo Mercado de Gás”, que visa viabilizar novos investimentos e o crescimento do parque térmico para geração de energia elétrica, utilizando o gás natural como combustível.

### **3.2 Aspectos Técnicos do Projeto de Termelétricas a Gás Natural e suas Infraestruturas**

Segundo a metodologia do *Project Management Institute* – PMI, um Projeto é um esforço realizado para criar um produto ou serviço único, considerando um prazo previamente definido. O gerenciamento de projetos é a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto, a fim de satisfazer seus requisitos (TERZIAN, 2005).

Os projetos de duas termelétricas a gás natural com a mesma configuração e capacidade sempre vão possuir peculiaridades. Por mais que seus equipamentos sejam idênticos, cada termelétrica estará localizada em um local diferente e, desta forma, estará sujeita a diferentes condições de operação. Uma infraestrutura de longa distância, como é o caso de um gasoduto ou de uma linha de transmissão, é um sistema complexo e tem relação direta e específica com a sua localização geográfica, com o meio ambiente e com a

condição geológica do terreno percorrido pela infraestrutura [YILDIRIM et. al., 2007].

Tipicamente um projeto de empreendimento de grande porte, como é o caso de termelétrica a gás natural, é dividido em vários subprojetos e seus estudos e documentos são elaborados e revisados à medida que as fases do projeto vão sendo concluídas. As principais fases de um projeto são: projeto conceitual, projeto básico e projeto executivo, também denominado como projeto detalhado. Em boa parte dos casos, principalmente aqueles relacionados com os projetos de obras públicas, o autor (ou sua empresa) que tenha realizado um projeto não pode participar da sua licitação, conforme dispõe a Lei 8.666/93 – Lei de Licitações e Contratos Administrativos.

Ainda que possam existir diferenças significativas entre um projeto de um gasoduto e de uma linha de transmissão, existem algumas atividades em comum, como por exemplo, a elaboração de estudos de traçado, travessias, levantamento topográfico, dimensionamento de equipamentos, classificação de áreas, análise de custos, simulação, dentre outros. Outros relevantes estudos que são realizados nos projetos dessas infraestruturas e nos projetos de termelétricas são: o Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica e Ambiental (EVTEA) e a Análise de Risco (AR) (CORTELETTI, 2009).

Os estudos que antecedem a realização dos projetos de termelétricas, gasodutos ou linhas de transmissão podem ser realizados pela iniciativa privada ou pelo governo. No caso dos estudos de planejamento de expansão da transmissão de energia elétrica, que apontam as alternativas de empreendimentos de subestações e linhas de transmissão em cada estado ou região do país, existe uma divisão de responsabilidade pela sua elaboração. No Brasil, tais estudos são divididos em 5 relatórios padronizados (R1, R2, R3, R4 e R5), sendo que cabe à EPE realizar o R1 (Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica e Socioambiental). Os demais relatórios, que são elaborados pelas empresas transmissoras do setor, por solicitação do MME, são: R2 (Detalhamento da Alternativa de Referência), R3 (Caracterização e Análise Socioambiental), R4 (Caracterização da Rede Existente) e R5 (Custos Fundiários). Em alguns casos os estudos R2 também são realizados pela EPE (EPE, 2019).

A expansão e a operação são dois elos importantes da cadeia de gestão do sistema elétrico brasileiro. Ambas as funções têm como meta final a economicidade, a confiabilidade e a sustentabilidade do setor elétrico. Na grande maioria dos países que conduziram suas reformas no setor elétrico, as atividades de planejamento, sobretudo da transmissão, e operação estão integradas em uma única instituição. No Brasil estas atividades foram alocadas em duas instituições diferentes: a EPE e o ONS (ONS, 2019).

No caso do planejamento da expansão da capacidade de geração, que inclui as termelétricas a gás natural, o objetivo é assegurar a existência de recursos no sistema que possam atender a demanda total projetada ao longo de um horizonte de planejamento, ao menor custo possível e dentro de critérios de segurança aplicáveis. No Brasil, a contratação da expansão da geração ocorre em dois ambientes de comercialização distintos. O Ambiente de Contratação Regulada (ACR) contrata sua expansão através de leilões regulados de contratos de energia de longo prazo. Estes leilões são organizados pelo Poder Concedente e possuem intensa participação da EPE. Já o Ambiente de Contratação Livre (ACL) contrata a sua expansão de forma bilateral (gerador e consumidor) e independente de ações do Poder Concedente (EPE, 2019).

A EPE realiza uma série de estudos, de caráter indicativo e considerando os horizontes de curto, médio e longo prazos, de expansão da capacidade de geração, tais como o Plano Decenal de Energia (PDE) e o Plano Nacional de Energia (PNE). Estes estudos auxiliam agentes econômicos na tomada de decisão pelos investimentos em geração de energia elétrica (ZIMMERMANN, 2007).

O planejamento da expansão da rede dutoviária de gasodutos de transporte, por sua vez, é atualmente uma obrigação imposta pela Lei do gás ao MME e, para tal, cabe à EPE realizar o Plano de Expansão Decenal da Malha de Gasodutos de Transporte (PEMAT). O único PEMAT elaborado pela EPE desde a entrada em vigor da Lei do gás (PEMAT 2013) apontou a viabilidade para construção de apenas 1 (um) novo gasoduto no Brasil, de 13 km, que nunca teve seu processo de licitação concluído, por conta de divergência quanto aos custos de referência e ao cronograma de implantação da obra (TCU, 2015).

Ao longo de 2019 a EPE elaborou o “Plano Indicativo de Gasodutos - 2019”, com o objetivo de apontar quais projetos de gasodutos de transporte devem ser candidatos à construção pelos agentes econômicos. A versão preliminar deste estudo apontou, dentre outros projetos, que há possibilidade da construção de um gasoduto no Paraná, desde a cidade de Siderópolis até Chapecó.

Um aspecto comum a todos estes projetos e que possui grande importância no seu planejamento é a necessidade de estudo prévio ambiental, previsto no inciso IV, § 1º do Art. 225 da Constituição Federal do Brasil. A Resolução Conama nº 237 / 1997, cita que compete ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) o licenciamento das atividades da indústria do petróleo, gás e energia elétrica, dado que estas atividades são potencialmente causadoras de significativa degradação ao meio ambiente. Tipicamente os estudos prévios de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) são: o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). O IBAMA, conforme disposto na Instrução Normativa nº 8/2019, pode realizar a delegação de licenciamento ambiental de competência federal para Órgão Estadual de Meio Ambiente - OEMA ou Órgão Municipal de Meio Ambiente - OMMA.

Para padronizar os estudos ambientais, os órgãos ambientais competentes disponibilizam documentos denominados Termos de Referência, nos quais constam as diretrizes, as regulamentações aplicáveis e a abordagem metodológica para a elaboração do EIA-RIMA, dentre outros documentos. Nestes estudos deve ser feita a identificação, a caracterização e descrição do empreendimento, a área de influência, a análise das alternativas, o diagnóstico ambiental, a identificação e avaliação dos impactos ambientais, as medidas mitigadoras e compensatórias, bem como os planos, programas ou projetos de controle e monitoramento de tais medidas. Os estudos devem abranger o projeto como um todo, ou seja, devem incluir as alternativas possíveis analisadas e, o mais importante, indicar aquela selecionada para ser implementada, acompanhado de uma Análise de Risco – AR (CORTELETTI, 2009).

Riscos são todos os fatores cuja ocorrência podem impedir a viabilização de um



projeto. Os principais tipos de risco que normalmente incidem sobre um projeto são: o risco de não conclusão, o risco tecnológico, o risco de mercado, o risco cambial, o risco ambiental, o risco político, o risco de financiamento, o risco de força maior e o risco de oferta de insumo (BRITO, 2009).

Alguns órgãos ambientais brasileiros recomendam, na forma de condicionante da Licença Prévia (LP), a elaboração de uma de AR do empreendimento. A AR contempla, dentre outros, um estudo denominado Análise Preliminar de Perigos – APP, no qual é realizada a análise de perigos causados por falhas humanas (incluindo erros operacionais) e defeitos ou falhas de componentes e de sistemas. Após definida a localização de cada empreendimento é realizada a avaliação de riscos, que consiste na verificação dos níveis de frequência e severidade das hipóteses de ocorrência de um acidente e o respectivo número de vítimas fatais (DNV, 2006).

Com relação aos recursos computacionais, tipicamente o projeto de infraestruturas de longa distância é realizado com o auxílio de um Sistema de Informações Georreferenciada (SIG, ou simplesmente GIS, na língua inglesa). O GIS é uma das ferramentas utilizadas para realizar, de forma eficaz, funções analíticas, tais como manipulação, cálculo e consulta de dados em camadas ou superfícies, e que também pode substituir métodos manuais e tradicionais de planejamento de rotas de infraestruturas [YILDIRIM et al., 2012].

A análise de caminhos de menor custo usando um software GIS permite que os projetistas de infraestruturas de grandes extensões encontrem a maneira mais econômica de conectar dois locais dentro de uma superfície de custo, que pode ser elaborada combinando vários critérios e, portanto, considerando os diferentes fatores que afetam a tomada de decisão [EFFAT & HASSAN, 2013]. A identificação de caminhos de menor custo é uma das funções mais básicas dos Sistemas de Informações Geográficas (GIS) baseados em método de busca [SHIRABE, 2016].

Dentre os recursos de software utilizados para o dimensionamento, custeio e otimização do projeto de linhas de transmissão, cabe ressaltar o software ELEKTRA,

desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (CEPEL, 2019). Já com relação aos recursos de software utilizados para o balanço térmico, custeio e projeto de engenharia de usinas termelétricas, merece menção o software Thermoflow (NÓBREGA, 2008). E, os recursos de software mais utilizados para a simulação do escoamento de fluidos monofásicos, como é o caso do gás natural, em dutos, atualmente são os softwares SIMONE (SIMONE, 2019) e Pipeline Studio (EMERSON, 2017).

A seguir serão apresentadas algumas alternativas de resolução de problemas na área de otimização onde foram utilizadas ou avaliadas outras opções de softwares.

DIAS (2005) analisou a combinação de opções reais com outras teorias – opções reais híbridas, visando resolver problemas complexos de alocação de recursos e investimentos sob incertezas, especialmente do setor petróleo.

Por sua vez, Francisco (2007) fez a análise de investimentos usando a teoria das Opções Reais para avaliar o projeto de construção de uma planta GTL com flexibilidade na troca de insumo e/ou combinação de produção, um projeto deste porte só será viável caso o valor criado pela flexibilidade seja maior do que o custo necessário para implementá-la.

Já Dozza (2012) achou importante ressaltar que a abordagem tradicional para avaliação de investimentos de infraestruturas tipicamente é realizada fazendo-se uso da técnica de fluxo de caixa descontado ou do valor presente líquido.

E, segundo Mendes (2012) a teoria de Opções Reais busca valorar e mensurar flexibilidades gerenciais que podem vir a acontecer durante o ciclo de vida de um projeto de investimento complexo em um ambiente de incerteza. Destaca também que esse tipo de opção que as empresas possuem, de investir ou não em um determinado projeto irreversível, associado a uma incerteza, é denominada opção real.

Já Guazzelli e Cunha (2015) avaliaram a utilização de um modelo de programação inteira mista aplicado a um problema real de localização de centros de distribuição na Região Nordeste do Brasil para uma indústria que tem toda sua produção em uma região remota do Brasil. O problema foi abordado dessa forma em função de sua complexidade,

que permite uma quantidade combinatória de soluções. O modelo permite a determinação dos melhores locais para centros de distribuição e do modal utilizado para seu abastecimento, de forma a maximizar o valor da solução.

Dias et. al (2016) propuseram o uso da técnica de aprendizagem de máquina realizada por supercomputadores para auxiliar no cruzamento de informações e relações oriundas da análise de dados de sistemas biológicos complexos, pois proporcionam um ganho tanto na quantidade de informações obtidas quanto na interpretação dos dados.

Para Amaral (2017) a simulação e modelagem econômica são vitais em projetos de exploração e produção de petróleo envolvendo riscos e o elevado número de incertezas nesses negócios origina decisões com alto nível de complexidade.

Por base nessas informações pode-se optar pelo software mais adequado para a resolução de cada problema específico.

### **3.2.1 Aspectos Técnicos do Projeto de Gasodutos de Transporte no Brasil**

Tipicamente, um gasoduto é uma tubulação utilizada para realizar a movimentação de gás desde uma instalação de origem até uma instalação de destino. No Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para movimentação de petróleo, derivados e gás natural (RTDT), anexo à Resolução ANP nº 6/2011, consta que no seu escopo são considerados gasodutos: os dutos terrestres de transporte, transferência e de escoamento da produção que movimentam gás natural, conforme definições da Lei do gás, e os dutos que movimentam hidrocarbonetos gasosos ou misturas gasosas que contenham hidrocarbonetos. O RTDT também destaca que um duto é a designação genérica de instalação constituída por tubos ligados entre si, incluindo os componentes e complementos (estações de recebimento, compressão e entrega, por exemplo), destinada ao transporte ou transferência de fluidos, entre as fronteiras de unidades operacionais geograficamente distintas.

Os principais componentes integrantes dos gasodutos são: válvulas (que podem desempenhar as funções de alívio, segurança, retenção, bloqueio ou controle), isolamento

térmico, acessórios de curvas, acessórios de repartição/união de fluxos, acessórios do sistema de proteção catódica, acessórios para alteração de diâmetro, instrumentos (indicadores e transmissores de pressão, vazão, temperatura, dentre outros) e acessórios que possibilitam a limpeza (canhões, também conhecidos como *scraper* ou *pig trap*, lançadores e recebedores de *pigs*).

Os principais complementos em um gasoduto, também conhecidos como unidades, conforme exibido na figura 14, são: Estação de Recepção (PTR), Estação de Medição (EMED, EMR ou ETC), Ponto de Entrega ou *city-gate* (PTE), Estação de Compressão (ECO ou ECOMP), Estação de Limpeza, Estação de Redução e Regulagem de pressão (ERP) e Estação de Distribuição de Gás (EDG). O Brasil ainda não possui nenhuma Unidade de Estocagem Subterrânea (UES) de gás natural (CONFORT, 2006).

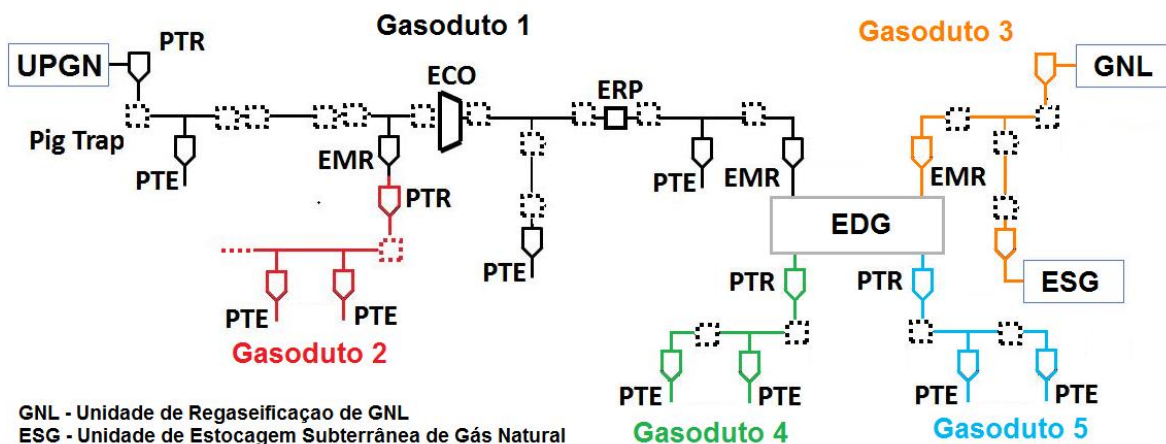


Figura 14 - Instalações típicas de gasodutos de transporte (elaborado pelo autor).

A Estação de Recepção (ou Ponto de Recebimento - PTR) é instalação, referenciada nos contratos de transporte, onde o proprietário do gás, ou seja, o agente Carregador, disponibiliza o gás natural para que o transportador realize o serviço de transporte.

A Estação de Medição – EMED é uma das mais importantes instalações de um gasoduto. Esse tipo de instalação geralmente é localizado onde se necessita fazer uma série de medições relacionadas com transferência de custódia, ou seja, nos locais onde um

gasoduto se interliga com outros gasodutos. Neste caso esse tipo de instalação também é conhecido como Estação de Transferência de Custódia – ETC. Quando a medição não é utilizada para fins de transferência de custódia diz-se que a EMED é operacional.

As estações de compressão possuem a função de acrescentar energia ao fluido transportado, elevando a pressão do gás que chega em sua entrada (sucção) para um valor maior em sua saída (descarga).

As Estações de Redução e Regulagem de Pressão (ERP), ao contrário da Estação de Compressão, retiram energia do fluido transportado, diminuindo a pressão do gás e, ao mesmo tempo, mantendo-a dentro da Máxima Pressão de Operação Admissível – MPOA.

Um dos principais objetivos de uma Estação de Limpeza é possibilitar a preservação das condições físicas de todas as demais instalações, tubulações e acessórios que fazem parte do gasoduto, possibilitando a remoção de resíduos, a detecção de defeitos mecânicos e a detecção de perdas de espessura das paredes internas na tubulação. No Brasil as estações de limpeza são conhecidas como *scraper*, enquanto em outros países utiliza-se o termo *pig trap*.

A Estação de Entrega (EE), Ponto de Entrega (PTE) ou “*city-gate*” é a instalação onde ocorre o ajuste das condições do gás natural àquelas firmadas em contrato antes de sua utilização pelo consumidor final. Um *city-gate* de um gasoduto de transporte é a fronteira delimitadora da competência regulatória entre o transporte (serviço regulado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP) e a distribuição de gás natural no Brasil (serviço regulado pelas agências reguladoras estaduais, conforme artigo 25 da Constituição Federal).

Uma Estação de Distribuição de Gás Natural (EDG), também conhecida como *hub*, é uma instalação que interliga dois ou mais gasodutos, de tal modo que possam ser realizados alinhamentos, simultâneos ou não, entre diversas origens e destinos.

A principal norma internacional aplicável ao projeto de gasodutos e suas instalações auxiliares é a norma *Petroleum and Natural Gas Industries - Pipeline Transportation Systems*

(ISO 13623). Esta norma abrange, basicamente, os tópicos abordados em outros importantes códigos, padrões e normas da comunidade internacional, dentre os quais: *American Petroleum Institute API 5L Standard, Code of Practice for Design and Installation of Gas Transmission Pipelines* (IS 328) e *Gas Transmission and Distribution Piping Systems* (*American Society of Mechanical Engineers - ASME B31.8*). Os países da Comunidade Europeia adotam a ISO 13623 sob o número EN 14161.

As principais leis e normas brasileiras aplicáveis ao projeto de gasodutos de transporte e suas instalações auxiliares são: ABNT NBR 12712:2002 (Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível), ABNT NBR 15280-1 (Dutos Terrestres – Parte 1: Projeto), ABNT NBR 5418 (Equipamentos à prova de explosão), Lei 6938/1981 (Licenciamento Ambiental) e a Resolução CONAMA 01/1986. Adicionalmente, devem ser consideradas as recomendações contidas nas Normas Regulamentadoras – NR estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego, hoje Secretaria de Trabalho do Ministério da Economia.

Um dos principais critérios básicos relacionados com o projeto de um gasoduto é a classe de locação. Trata-se de um critério utilizado para a classificação de uma área geográfica de acordo com sua densidade populacional aproximada, e em função da quantidade de construções para ocupação humana localizadas nesta área. A classe de locação é um parâmetro que traduz o grau de atividade humana situada no raio de 200m da diretriz do gasoduto e serve para propósitos de projeto, construção e operação. A classe de locação, conforme disposto na norma NBR-12.712, é o critério fundamental para o cálculo da espessura de parede do gasoduto, a determinação da pressão de ensaio e a distribuição de válvulas intermediárias. Ou seja, quanto mais próximo de construções destinadas à ocupação humana, maior terá que ser a espessura do gasoduto e, portanto, maior será o seu custo.

Um dos principais aspectos construtivos de um gasoduto é o seu raio de curvatura mínimo. O raio mínimo de curvatura que o traçado de um gasoduto deve possuir é um aspecto relevante, pois uma das atividades da manutenção de um gasoduto é a limpeza

pela passagem *pigs*, que devem escoar internamente no gasoduto sem risco de ficarem presos em curvas acentuadas e com isso restringir ou interromper o fluxo do gás natural.

Os principais documentos integrantes do projeto de um gasoduto são: memorial descritivo, planta geral de locação, fluxogramas de processo e de engenharia, folhas de dados dos equipamentos, plantas de traçado e perfil do duto, relatório de simulação ou cálculo termo hidráulico, lista de materiais, dentre outros. O estudo de viabilidade técnico-econômica e ambiental (EVTEA) de um gasoduto é realizado concomitantemente com o estudo do escoamento (análise das alternativas de configuração e de dimensionamento das estações auxiliares). Um gasoduto projetado para transportar uma mesma vazão diária pode possuir várias configurações distintas de diâmetros e de custos de transporte. Maiores diâmetros possibilitam a movimentação com menores custos operacionais, visto que estes decrescem com o aumento da vazão (FREIRE, 2009).

Para Pazmino (1983), que avaliou a utilização da Programação Linear com Objetivos Múltiplos na análise e resolução do problema de planejamento do desenvolvimento da indústria do metano no Equador, esta técnica consegue conjugar num modelo, vários objetivos conflitantes e obter uma solução que os satisfaz segundo uma escala de prioridades previamente estabelecida.

Oliveira (2011), propõe uma metodologia de projeto de gasodutos fazendo uso das técnicas de simulações de escoamentos e das técnicas de simulação de Monte Carlo como ferramentas de auxílio no cálculo dimensional de gasodutos. Também destaca que o uso destas técnicas possibilitou determinar estatisticamente a probabilidade de sucesso do transporte gás natural em um gasoduto de forma eficiente, otimizada e econômica.

De acordo com (ALVES et al., 2007), a simulação de Monte Carlo é um método crescentemente popular para valorar derivativos complexos, inclusive opções reais. Salientam que esta simulação é uma ferramenta flexível para manusear detalhes específicos de problemas da vida real, dentre eles a análise da viabilidade da indústria gás-químico na região do Amazonas.

A viabilidade da construção de um gasoduto depende, principalmente, da escala de movimentação do gás ao longo de sua vida útil. Logo, o volume diário de gás que se pretende transportar ao longo dos anos de operação do duto deve ser o suficiente para permitir que o preço da tarifa a ser paga pelo transporte seja competitivo em relação a preço praticado para transportar o gás por outros modais (SILVA et al., 2016).

Uma vez aprovado o EVTEA e emitida a Licença de Instalação pelo órgão ambiental competente, o empreendedor formaliza o pedido e envia os documentos básicos para obtenção da autorização de construção (AC) junto à ANP, conforme a Resolução ANP nº 52/2015.

Uma metodologia bastante utilizada no Brasil para gestão da implantação de gasodutos é a FEL (*Front End Loading*) criada pela empresa “*Independent Project Analysis*” – IPA (IPA, 2009). Através desta metodologia vários documentos de projeto são elaborados em etapas (FEL 1, 2 e 3), sendo que ao final de cada uma delas, o gestor pode cancelar, adiar, reavaliar ou continuar com o projeto. O EVTEA é realizado durante o FEL 1, ocasião em que é iniciado o estudo ambiental. Durante o FEL 2 é gerado o Projeto Conceitual e o EIA-RIMA para obtenção da Licença Prévia. Na etapa FEL 3 é gerado o Projeto Básico e é obtida a Licença de Instalação).

Especificamente em relação às medidas de mitigação dos riscos associados a gasodutos, duas estratégias possíveis seriam: a) restringir o acesso à faixa de servidão; e b) fazer uso de métodos que dificultem o acesso (por escavação) ao duto, tais como a instalação de placas de concreto, uso de tubos camisa e o uso de faixas de sinalização de advertência sobre o gasoduto (CORTELETTI, 2009). No caso de gasodutos de grande extensão, observa-se que estas medidas não são usualmente adotadas. Como alternativa, busca-se instalar o duto o mais distante possível de centros populacionais.

Dado que o objeto desta tese abrange os aspectos relacionados com a determinação da seleção da localização e traçado das infraestruturas auxiliares de uma UTE, tais como gasodutos, será realizado a seguir um detalhamento dos serviços tipicamente integrantes do projeto básico da faixa de gasodutos. Compete esclarecer inicialmente que estes serviços



abrangem tanto a elaboração de estudos e levantamento de campo como a elaboração documentos e projetos, tais como (LEAL, 2012): levantamento planimétrico, levantamento cadastral, estudos ambientais, estudos geológicos, estudos geotécnicos, estudos hidrológicos, projeto de drenagem, projeto de terraplanagem, projeto de cruzamentos e travessias, projeto de obras de contenção e estabilização das margens, memoriais descritivos, plantas de situação, desenho unifilar de vegetação, planta de faixa, perfil do duto, especificações técnicas e memórias de cálculo, dentre outros.

### **3.2.2 Aspectos Técnicos do Projeto de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil**

A seguir serão abordados os aspectos específicos do projeto de linhas de transmissão (LT). Tipicamente, o transporte da energia elétrica é realizado através de linhas aéreas ou subterrâneas. Uma linha de transmissão aérea é um sistema que realiza o transporte da energia em alta tensão gerada nas usinas até as estações transformadoras, também conhecidas como subestações, bem como possibilita a interligação com outros sistemas de transmissão.

No Brasil as linhas operam em diversas classes de tensão e são classificadas em linhas de transmissão (classe de tensão igual ou maior que 230 kV) ou linhas de subtransmissão (classe de tensão abaixo de 230 kV). Os dois principais tipos de linhas para transporte da energia elétrica são as de transmissão e as de distribuição.

Os principais componentes integrantes das linhas de transmissão, exibidos na figura 15, são: condutores, torres e isoladores. Os condutores são fios maciços ou cabos, geralmente de forma cilíndrica e formado por material metálico, como cobre ou alumínio, utilizados para transportar energia elétrica ou transmitir sinais elétricos. Em LTs também são instalados cabos para-raios. Os isoladores são dispositivos que isolam eletricamente um condutor, fixando este último à torre. As torres são as estruturas que suportam os cabos e os isoladores. As torres são dotadas de fundações e sistema de aterramento e estão sujeitas à cargas verticais, transversais e longitudinais. Mais do que uma linha de transmissão pode ser instalada em uma torre e, neste caso, tem-se as seguintes classificações: circuito simples

(uma LT), circuito duplo (duas LTs) ou múltiplos circuitos (mais que duas LTs).

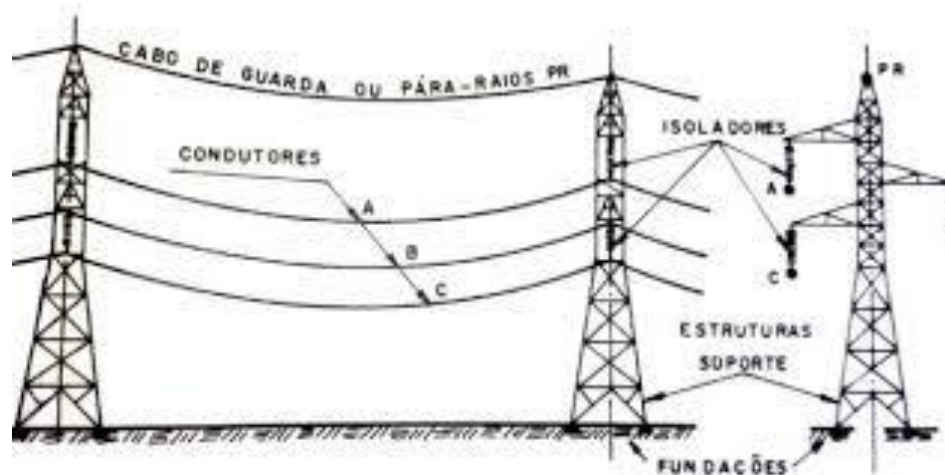


Figura 15 - Componentes típicos de linhas de transmissão (SILVA et al., 2016).

Existem várias referências internacionais, aplicáveis ao projeto e à instalação, operação e manutenção (O&M) de linhas de transmissão, dos quais merecem destaque: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, *National Electrical Safety Code (NESC)* e *International Electrotechnical Commission (IEC)*.

As principais leis e normas brasileiras aplicáveis ao projeto de linhas de transmissão são: Decretos nº 84.398/1980 e nº 86859/1982 (ocupação de faixas de domínio por linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica), Lei 11.934/2009 (limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos), ABNT NBR 5422 (projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica) e ABNT NBR 7117 (sinalização para identificação de linha aérea de transmissão de energia elétrica), NBR 7276 (sinalização de advertência em linha aérea de transmissão de energia elétrica) e NBR 8449 (dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica).

Os principais critérios básicos relacionados com o projeto de uma linha de transmissão são: a confiabilidade, o custo, as perdas, a previsão de condições favoráveis que permitam realizar a manutenção, a amplitude dos vãos entre as estruturas, a adequação dos materiais com o clima e a atmosfera e a minimização de conflitos com a

legislação ambiental, principalmente no tocante às distâncias de segurança e restrições ou proibições de proximidade com locais sensíveis, tais como os locais de cultura agrícola sujeitos à queimadas, pedreiras, usinas de produtos químicos, terrenos pantanosos, áreas sujeitas à erosão e os locais de circulação ou concentração de pessoas.

Justamente devido ao fato da necessidade de manter a distância de segurança acima citada é que uma linha de transmissão possui uma faixa de passagem, cuja largura depende da tensão de operação, como, por exemplo, 40 metros de largura total para uma linha de transmissão de 230 kV. Cabe ressaltar que uma linha de transmissão produz rádio interferência e ruído acústico, motivo pelo qual também se procura determinar a supracitada distância.

Os principais aspectos construtivos de uma LT estão relacionados com seu projeto estrutural e mecânico. Questões como a velocidade do vento e a precipitação pluviométrica são fatores que influenciam bastante estes tipos de projeto, pois as soluções para minimizar seus efeitos podem aumentar o custo total.

Os principais documentos integrantes do projeto de uma LT são: levantamento planialtimétrico, mapa chave do traçado, estudos de sondagens, memoriais de cálculo (mecânico e faixa de passagem), lista de materiais, memoriais descritivos, projetos de locação de estruturas, fundações, estruturas e travessias.

A viabilidade da construção de uma linha de transmissão depende dos benefícios que serão proporcionados para as populações das regiões atendidas. Também depende do valor da tarifa de transmissão, que deve cobrir os custos operacionais e o investimento. De um modo geral, o cálculo do valor da tarifa de transporte considera a vida útil do empreendimento e o montante de energia transportada nesse período.

Uma metodologia bastante utilizada no Brasil para planejamento, execução e gerenciamento de projetos da implantação de linhas de transmissão é CCPM (Gerenciamento de Projeto pela Corrente Crítica), desenvolvida por Eliyahu M. Goldratt em 1997. O principal objetivo desta metodologia é diminuir a duração total de projetos e

facilitar a priorização e o gerenciamento de tarefas. Esse método considera a Teoria das Restrições (GOLDRATT & COX, 1994), e é uma alternativa ao método baseado no “Caminho Crítico”, que é vulnerável às incertezas inerentes aos projetos (SILVA et al., 2012). Esta metodologia se adequa aos empreendimentos que abrangem multiprojetos, como é o caso do projeto de uma linha de transmissão. A preocupação com o cumprimento do prazo para construção de uma LT é um aspecto relevante, pois em alguns casos a conclusão da obra antes do prazo estipulado em um contrato com a ANEEL pode gerar um benefício financeiro para o empreendedor.

Especificamente em relação às medidas de mitigação dos riscos associados às linhas de transmissão, merecem destaque as seguintes ações para reduzir a frequência e intensidade das suas consequências: instalação de proteção nas torres, placas orientativas, de advertências e ou proibitivas e realização de constantes treinamentos nas equipes de operação e manutenção (LIMA, 2012).

A seguir será realizado um detalhamento dos serviços tipicamente integrantes do projeto básico da faixa de linhas de transmissão: escavação, terraplanagem, drenagem, obras de contenção, elaboração da fundação das torres, instalação da faixa de servidão, montagem das tores de transmissão, lançamento de cabos, instalação de sinalizadores e do sistema de aterramento.

### **3.2.3 Aspectos Técnicos do Projeto de Usinas Termelétricas a Gás Natural no Brasil**

A seguir serão abordados os aspectos específicos do projeto de usinas termelétricas. Esse referencial teórico não tem intenção exaurir a discussão de todos os tópicos relativos ao projeto de termelétricas, mas sim realizar uma revisão que subsidie a compreensão sobre as termelétricas a gás natural.

Uma usina termelétrica (UTE), segundo o disposto na Resolução Normativa ANEEL nº 674/2015, é uma usina elétrica acionada por energia térmica, obtida pela combustão de um combustível fóssil ou biomassa. Como citado anteriormente, uma UTE pode operar em ciclo aberto ou combinado. A figura 16 exibe uma UTE a gás natural brasileira.



Figura 16 - Usina termelétrica de ciclo combinado – UTE Santa Cruz (Furnas, 2019).

Uma usina termelétrica operando em ciclo combinado combina a operação de uma turbina à gás, movida pela queima de combustível fóssil ou biomassa, diretamente acoplada a um gerador. Os gases quentes de exaustão da turbina a gás transformam a água em vapor para o acionamento de uma turbina a vapor acoplada a um gerador.

Os componentes típicos de usinas termelétricas a gás natural de configuração de ciclo combinado são exibidos na figura 17.

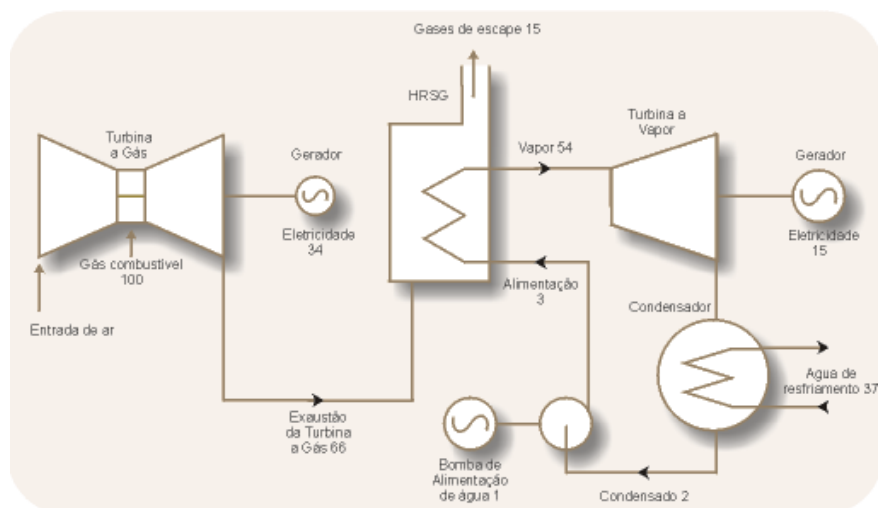


Figura 17 - Componentes de termelétricas de ciclo combinado (GASNET, 2019).

Os componentes típicos de usinas termelétricas que merecem destaque são: turbinas a gás, turbinas a vapor, geradores, caldeiras de recuperação de calor (HRSG), bombas de água de resfriamento e condensadores. Suas infraestruturas auxiliares são: gasoduto e linha de transmissão e tubulação de captação de água de resfriamento.

Existem várias referências internacionais, aplicáveis ao projeto e à instalação, operação e manutenção de usinas termelétricas (SARKAR, 2015), a saber: NPFA 37 (*Standard for Installation and Use of Stationary Combustion Engines and Gas Turbines*), ASME B31.1 (*Standards of Power Piping*), ASME B31.2 (*Standards of Fuel Gas Piping*), ISO 16528-1 e ISO 16528-2 (*boiler and pressure vessel*) e NFPA 54 (*National Fuel Gas Code*).

As leis e normas brasileiras aplicáveis ao projeto de usinas termelétricas que merecem destaque são: Resolução CONAMA n° 420/2009 (Programas de Monitoramento da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas), Resoluções CONAMA n° 357/2005 e 430/2009 (Condições e padrões de lançamento de efluentes), Lei Federal n° 5.197/67 (Proteção à fauna), Resolução CONAMA n° 382/2006 (limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas), Norma Regulamentadora n° 15 (NR15- atividades e operações insalubres), NBR 10.152 (Níveis de ruído para conforto acústico) e NBR 15358 (Rede de distribuição interna para gás combustível em instalações de uso não residencial).

Os principais critérios básicos relacionados com o projeto de uma termelétrica são eficiência, os custos com investimento, custos de operação e manutenção, disponibilidade de combustível e acessibilidade. Adicionalmente, são consideradas restrições relacionadas com o impacto ao meio ambiente, dentre as quais merece destaque (MARIANO & ROVERE, 2006): a quantidade de água que será captada permanentemente, a descarga (quantidade e qualidade) de efluentes líquidos e sólidos, a qualidade do ar e nível de ruído.

Os principais documentos integrantes do projeto de uma usina termelétrica são: a ficha técnica (folha de dados de equipamentos motrizes, geradores, caldeiras, dentre outros), fluxograma de processo, memorial descritivo, diagrama de arranjo geral, diagrama elétrico unifilar, relatório sobre a disponibilidade do combustível.

A análise das alternativas de construção de uma UTE considera, principalmente, o distanciamento de centros urbanos e a disponibilidade de área para instalação da usina, de recursos humanos para implantação e operação, a disponibilidade de infraestrutura para conexão com a rede elétrica e fornecimento de combustível (CELBA, 2017).

Os principais impactos negativos ao meio ambiente associados às usinas termelétricas são: alteração da qualidade do ar e nos níveis de ruídos, alteração geomorfológica e compactação do solo, alteração na qualidade do solo, aumento da susceptibilidade a processos erosivos, alteração na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, risco de incêndio em nuvem de gás, redução da cobertura vegetal, morte de indivíduos de fauna, redução de habitat e de oferta de alimento à fauna terrestre e aquática, perturbação e perda de espécimes da fauna, intervenção em áreas prioritárias para conservação, atração de animais vetores de doenças, alteração no tráfego, aumento da ocorrência de acidentes de trabalho, aumento da demanda por bens e serviços, deslocamento de pessoas e atividades econômicas (CELBA, 2017).

Compete destacar que os empreendimentos de usinas termelétricas fazem uso de diversos produtos químicos destinados aos processos de tratamento de água e efluentes, tais como a cloração, floculação, filtração, purificação, desmineralização e a aeração, que podem afetar o meio ambiente (MARIANO & ROVERE, 2006).

Merecem destaque os produtos: coagulante (policloreto de alumínio ou sulfato de alumínio), ácido sulfúrico, hidróxido de sódio, metabissulfito de sódio, inibidores de corrosão (cromatos, nitritos, molibdatos, polifosfatos e polifosfonatos), hidrazina, biocida (hipoclorito de sódio e outros oxidantes clorados, peróxido de hidrogênio e ácido peracético), anti-incrustantes (polifosfatos, fosfonatos e EDTA) e amônia (CELBA, 2017).

A seguir serão listados os principais serviços tipicamente integrantes do projeto de usinas termelétricas: construção das entradas de acesso e serviço, obras civis das estruturas (tais como casa de máquinas e sala de comando), montagem eletromecânica de caldeiras e das unidades motrizes e geradoras, montagem do sistema de proteção contra incêndios, montagem dos sistemas de automação (incluindo sistemas de medição e monitoramento

contínuo de emissões), montagem dos sistemas de captação e tratamento de água, montagem do sistema de tratamento de efluentes, montagem da linha de transmissão interna (LT de interesse restrito) e montagem da subestação elevadora.

Cabe ressaltar que o gás natural é um combustível, cuja combustão não apresenta a presença de cinzas e de enxofre, ou seja, não há emissões de particulado e  $SO_x$ . Por outro lado, a quantidade inadequada de ar utilizado na câmara de combustão da turbina a gás pode levar à emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados. Adicionalmente, a combustão de gás natural em turbinas a gás de usinas termelétricas pode emitir óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), cuja quantidade deve ser mantida dentro dos limites estabelecidos pelo Resolução CONAMA n° 382/2006.

#### **3.2.4 Discussões e Considerações**

Conforme apresentado ao longo deste capítulo, observa-se que o projeto de termelétricas a gás natural e suas infraestruturas é, na verdade, um multiprojeto complexo. A chance que o projeto de uma UTE não atenda seus objetivos plenamente por conta dos riscos e desafios decorrentes de um mau planejamento dos projetos das suas infraestruturas essenciais (gasoduto e linha de transmissão) não é desprezível.

O despacho cada vez mais frequente da geração termelétrica é uma realidade atualmente no Brasil, ou seja, o aumento da necessidade de regularização dos reservatórios de usinas hidrelétricas associado ao aumento da intermitência de outras fontes de geração, como por exemplo a eólica e a solar, tem feito com que continue sendo necessária a construção de usinas termelétricas para operem na base da carga.

Uma alternativa para que esses multiprojetos sejam realizados de forma sincronizada é a implantação desse tipo de empreendimento na modalidade de projeto estruturante, ou seja, por meio de uma licitação da energia gerada a partir de um projeto específico, com caráter estratégico e de interesse público, que assegura a otimização do binômio modicidade tarifária e confiabilidade do sistema elétrico, bem como garanta o atendimento à demanda nacional de energia elétrica, considerando o planejamento de



longo, médio e curto prazos (MME, 2016). O MME, por meio da EPE e ANEEL, tem realizado nos últimos três anos a licitação de projetos estruturantes de hidrelétricas e de termelétricas, estas últimas associadas ao gás proveniente da regaseificação de GNL. Nestes casos, o papel da EPE ganha relevância, pois a modalidade de projeto estruturante surge como uma oportunidade de orientar os investidores e os órgãos ambientais.

Um estudo de caso apresentado para o sistema colombiano demonstra que o planejamento integrado da expansão dos dois setores possibilita atingir ganhos da ordem de 2% dos custos totais (investimento e operação), quando comparado ao planejamento não integrado. Atualmente, parte dos investimentos do setor de gás natural são feitos para atender às necessidades requeridas pelo planejamento do setor elétrico (KELMAN, 2009).

Com relação às abordagens para avaliação de investimentos citadas neste capítulo, dentre elas o uso das técnicas de opções reais, simulação de Monte Carlo, Programação Linear com Objetivos Múltiplos e o uso do método de aprendizagem de máquina, compete destacar que estas alternativas de software que implementam estas técnicas são muito boas para resolução de problemas de avaliação econômica, mas não manipulam dados georreferenciados de forma nativa, pois não possuem foco na busca do caminho mínimo entre pontos de uma superfície formadas por dados georreferenciados. Ou seja, tornam ainda mais complexa a tomada de decisão gerencial. Por esta razão, considera-se estratégico o uso das funções e algoritmos, dentre eles o algoritmo de busca Dijkstra, disponíveis em software GIS, preferencialmente gratuitos, ou mesmo as funções de solver disponível no pacote MS-Office, disponíveis de forma fácil no meio acadêmico e no profissional.

### **3.3 Métodos de avaliação do projeto de faixas das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural**

Existem várias razões para que a matriz energética de uma nação não seja dependente de um único tipo de fonte de energia. O agravamento dos problemas

decorrentes das mudanças climáticas e o aumento das preocupações sociais e de eficiência energética demandam que o planejamento energético de um país seja diversificado e esteja baseado em um planejamento integrado de recursos.

Os estudos que subsidiam os vários tipos de leilão para contratação da energia gerada por uma nova usina, seja no Brasil ou no exterior, necessitam considerar quais são as regiões do país onde é mais indicado cada tipo de tecnologia de geração, de tal modo que, por exemplo, uma usina eólica não deve ser indicada para ser localizada em uma região onde não há regime favorável de vento.

Outro exemplo da preocupação com a localização está relacionado com a implantação estratégica de novos reforços de geração do tipo não hidrelétrica, com a função complementar ou de *backup*, em locais onde existem atualmente usinas hidrelétricas que possam ser afetadas durante os períodos de seca. Não haveria sentido implantar uma usina de função complementar ou *backup* que não pudesse entrar em operação por conta da mesma limitação local (indisponibilidade de água) que impediu a fonte principal desempenhar seu papel.

No caso brasileiro, observa-se que o planejamento deve contemplar vários tipos de fonte de energia visando a complementaridade hidrotérmica e que, neste contexto, a usina termelétrica a gás natural aparece como a tecnologia que tem maior probabilidade de fornecer a flexibilidade necessária para lidar com os desafios técnicos introduzidos pelas fontes variáveis de energia renovável nos sistemas de energia [HENRIOT et al., 2012].

Desta forma, será apresentada a seguir uma visão geral do processo de tomada de decisão sobre a localização das infraestruturas de uma UTE a gás natural, considerando tanto a experiência nacional sobre o tema, quanto a experiência internacional.

### **3.3.1 Escolha da Região para Localização de Termelétrica**

A escolha da região de estudo para implantação de uma termelétrica é a primeira tomada de decisão que deve anteceder a realização dos estudos conceituais ou preliminares.

Cabe destacar que os estudos que são realizados para selecionar o local de instalação de uma termelétrica ou de suas infraestruturas são atualizados e revisados na medida em que são realizados novos levantamentos ou o detalhamento dos existentes.

Antes de se iniciar um projeto básico de uma termelétrica a gás natural e de suas infraestruturas é necessário que sejam analisadas as alternativas de locais de: a) destino da energia, ou seja, a subestação (SE); b) localização da termelétrica; e c) localização do ponto de origem que irá fornecer o gás natural.

Desta forma, percebe-se que, para se determinar todas as alternativas possíveis de traçado no projeto de uma faixa de linha de transmissão, deve-se, antes, conhecer os locais “a” e “b” acima citados. O mesmo que se aplica ao projeto de um gasoduto, ou seja, deve-se, antes, conhecer os locais “b” e “c”.

É importante observar que na maioria das vezes não se conhece esses três locais no início do projeto, ou, melhor explicando, não se tem certeza sobre quais dos locais inicialmente conhecidos ou previstos são os melhores locais para serem utilizados nos estudos conceituais que determinarão as diretrizes preliminares e que, posteriormente, serão detalhados para concepção dos projetos básico e de detalhamento.

Tal fato sugere que pode existir mais do que uma sequência de etapas para a elaboração dos projetos de faixas das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural.

A tabela 1 exibe as alternativas de sequências mais utilizadas para elaboração desses projetos. Se forem consideradas as possibilidades em que podem ocorrer escolhas simultâneas, outras 4 alternativas seriam possíveis, inclusive a alternativa em que a escolha de todas as localizações seria realizada em uma única etapa.

O fato de as escolhas poderem ser realizadas em etapas distintas reforça a ideia que não há um padrão de solução e que tais escolhas podem ser realizadas por organizações e em ocasiões distintas.

Tabela 1 - Sequências possíveis utilizadas para elaboração de projetos de usinas termelétricas a gás natural (fonte: elaboração própria)

	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>	<b>Etapa 3</b>
<b>1</b>	A SE destino é escolhida	O PTE de origem é escolhido	Determina-se o local da UTE
<b>2</b>	A SE destino é escolhida	O local da UTE é escolhido	Determina-se o PTE de origem
<b>3</b>	O PTE de origem é escolhido	A SE destino é escolhida	Determina-se o local da UTE
<b>4</b>	O PTE de origem é escolhido	O local da UTE é escolhido	Determina-se o local da SE
<b>5</b>	O local da UTE é escolhido	A SE destino é escolhida	Determina-se o PTE de origem
<b>6</b>	O local da UTE é escolhido	O PTE de origem é escolhido	Determina-se o local da SE

A sequência adotada por cada organização de determinado país é fortemente afetada pela maneira como seu planejamento integrado de recursos é realizado.

O projeto da linha de transmissão, por exemplo, na grande maioria das vezes é derivado da existência de um projeto de geração de energia elétrica em determinado município, estado ou região. Construir um projeto de geração de energia elétrica visa criar uma oferta de energia para uma demanda localizada e identificada, seja no curto, médio ou longo prazo. Ou seja, a principal justificativa para se construir a termelétrica está situada no destino da linha de transmissão, que é atendimento dos consumidores do setor elétrico.

No caso da termelétrica a gás natural essa lógica é um pouco diferente. O que se observa muitas vezes é a estratégia do empreendedor de querer construir um gasoduto para ofertar gás nacional para consumidores em uma região onde atualmente não existe gás. Para tal, tenta identificar possíveis projetos de UTE a gás natural, considerados grandes consumidores de gás, para servirem de âncora para o projeto do gasoduto. Quanto mais gás for transportado pelo gasoduto, mais cedo o projeto se paga e isso é tema relevante para o empreendedor. Há também o caso em que se deseja construir um terminal de regaseificação de GNL e necessita-se de um projeto de UTE, ou seja, um consumidor cativo que justifique a realização de um projeto com investimento e risco elevados, como é o caso dos projetos de terminais de regaseificação de GNL.

Percebe-se que em ambos os casos a motivação principal da construção do gasoduto não é entregar gás para uma UTE, tampouco resolver o problema da falta de oferta de energia elétrica. No caso do projeto do gasoduto que movimenta gás nacional, a motivação é dar destinação para um gás que provavelmente seria reinjetado no local de produção. Ou seja, a principal justificativa para se construir o referido gasoduto estaria situada na sua origem. O fato da principal justificativa para realização dos projetos de linhas de transmissão e de gasodutos ora estar presente na origem do gasoduto, ora estar na subestação da LT, reitera a existência de mais do que uma sequência de etapas para a elaboração dos seus projetos.

Se um empreendedor tivesse uma única opção para destino da energia gerada, ou seja, o atendimento de energia para uma única região (ou unidade da federação) com uma única opção de subestação e com apenas uma opção de origem do gás natural, ou seja, um único gasoduto com uma única opção de ponto de entrega do gás para suprimento da usina termelétrica, o estudo para a solução do problema seria menos complexo. A figura 18 ilustra que tal estudo estaria limitado à busca em um universo reduzido de número de possíveis alternativas, geralmente três, de linhas de transmissão e de alternativas de gasodutos, também três, tipicamente, que interligariam os pontos de interesse.

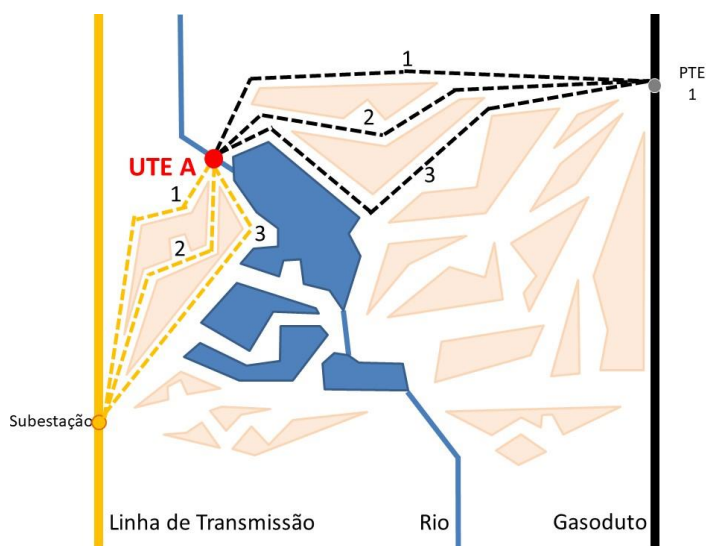


Figura 18 – Diagrama simplificado dos traçados das infraestruturas de uma UTE (fonte: elaboração própria)

Entretanto, na grande maioria das vezes o tomador de decisões sobre a construção de uma UTE a gás natural se depara com a situação de ter, por exemplo, várias regiões como opção de destino da energia, com mais do que uma alternativa de subestação em cada uma delas. Também é usual, conforme exibido na figura 19, se avaliar mais do que uma alternativa de localização do ponto de entrega da termelétrica, para cada um dos gasodutos situados próximos dessas regiões. Nestes casos, a tomada de decisão pode ser considerada bastante complexa, dado o elevado número de diferentes arranjos de gasodutos e linhas de transmissão para cada uma das possíveis localizações da usina. Tal complexidade requer o uso de técnicas de otimização para sua solução.

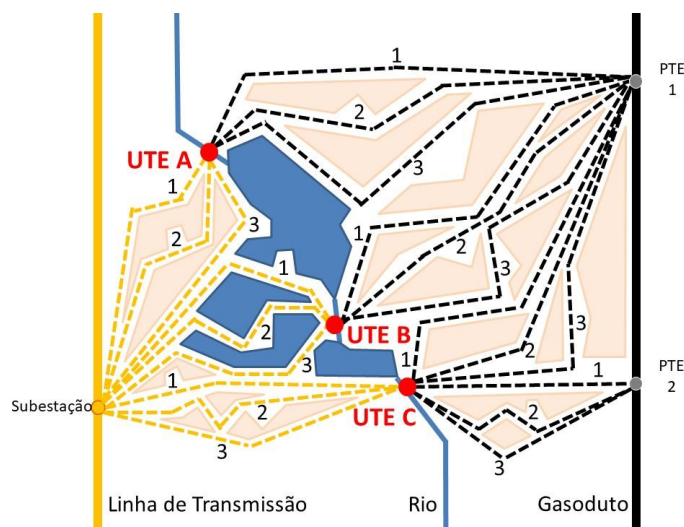


Figura 19 - Diagrama complexo dos traçados das infraestruturas de uma UTE (fonte: elaboração própria)

As soluções de otimização estariam, então, relacionadas à geração sucessiva de estruturas alternativas com diferentes arranjos de gasodutos e linhas de transmissão, a fim de obter uma solução ótima que tenha baixo custo de investimento e baixo custo de operação e manutenção, sem comprometer segurança [SANTOS & CHRISMAN, 2016].

O objetivo de escolher a melhor localização para uma UTE a gás é maximizar o valor geral da usina, reduzir seu custo de transmissão, minimizar o impacto no meio ambiente e maximizar a produtividade da usina [CHOUDHARY & SHANKAR, 2012].

### **3.3.2 Visão geral do processo de definição das alternativas de projeto de uma UTE a gás**

Compete inicialmente lembrar que os estudos prévios de uma termelétrica a gás devem considerar como premissa básica o cumprimento dos requisitos ambientais e de análise de risco do empreendimento. Em complemento à esta premissa básica existem outras relevantes considerações ou critérios que contribuem para reduzir o número de alternativas e, conseqüentemente, a complexidade do problema.

Existem vários fatores e critérios que afetam a seleção da melhor localização de termelétricas a gás e de suas infraestruturas. Os principais fatores e critérios observados nesta pesquisa foram: custo / impacto econômico, disponibilidade de recursos, acessibilidade, aspectos do meio biótico, aspectos do meio físico, desenvolvimento socioeconômico, preocupação social e aspectos técnicos.

Também se observou que abordagem tradicional para seleção de alternativas e para a tomada de decisão quanto à viabilidade do projeto de uma UTE está mais concentrada no critério de custo / impacto econômico e na disponibilidade de recursos, do que nos demais critérios. Desta forma, são consideradas áreas preferenciais, para fins de estudo, as alternativas localizadas próximo dos pontos de entrega (existentes ou novos) de gasodutos e que também estejam localizadas próximo de locais com água para resfriamento dos equipamentos da termelétrica.

Não se deve descartar que, além das alternativas citadas anteriormente, outras opções de localização estratégicas e/ou relacionadas com interesses políticos sejam avaliadas pelos empreendedores ou organizações.

Esta abordagem tradicional de tomada de decisão pode resultar em maiores custos operacionais e de transmissão, baixa produtividade e um alto impacto negativo para a sociedade por conta da poluição ambiental causada pela termelétrica [CHOUDHARY & SHANKAR, 2012].

A seguir serão detalhadas as características dos principais fatores e critérios levantados nesta tese, relacionados com a localização de UTE a gás e suas infraestruturas.

- Custo / Impacto Econômico

O critério de custo / impacto econômico considera o custo de aquisição do terreno onde será construída a UTE, o custo com o remanejamento de instalações ou de realocação de pessoas que eventualmente residam próximo do local escolhido, o custo de transporte do combustível e o custo de operação e manutenção do empreendimento.

- Disponibilidade de Recursos

A disponibilidade de combustível é um critério relevante, assim como a disponibilidade de água. Também é importante a disponibilidade de força de trabalho para construção e operação do empreendimento. A disponibilidade citada envolve tanto o aspecto da quantidade de recursos, quanto o aspecto da capacidade técnica.

- Acessibilidade

As facilidades de acesso ao sistema de transmissão existente, às áreas urbanas das cercanias do local onde será construída a usina, às infraestruturas existentes de transporte rodoviário, ferroviário e aéreo são fatores que são considerados no projeto de uma UTE.

- Aspectos do meio biótico

Aspectos ambientais relevantes compreendem evitar áreas alagadas próximo de corpos de água (rios, canais, lagos, pântanos e córregos) e áreas sensíveis (florestas nativas, unidades de conservação, parques nacionais, reservas e santuários).

Também é relevante a preocupação relacionada com a qualidade do ar no entorno de termelétricas a gás natural, por causa das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Há ainda a preocupação com as áreas com a presença de atmosfera corrosiva (zonas industriais ou costeiras). Esta última preocupação indica que é estratégico que o projeto de UTEs e LTs privilegie áreas que não aumentem os custos para evitar a corrosão das infraestruturas.

- Aspectos do meio físico

Um dos aspectos do meio físico mais considerados é evitar áreas de declive



acentuado. Evitar áreas montanhosas, cordilheiras, solos desfavoráveis, locais de erosão, locais de deslizamentos ou escorregamentos de terra, contribui para reduzir a complexidade do projeto. A preocupação com os fatores climáticos, como locais grandes áreas de chuva, vento, neve e relâmpagos, visa evitar possíveis paralisações na operação da usina.

- Desenvolvimento socioeconômico

Durante o projeto, para garantir o desenvolvimento socioeconômico, deve-se evitar a construção de uma termelétrica muito próxima de áreas agrícolas, pastagens e assentamentos. Nesse sentido, cabe ressaltar a preocupação com a escolha de locais onde já se identifique a possibilidade de limitação ou expansão do empreendimento. Por último, não se deve desconsiderar os efeitos de desenvolvimento que esse tipo de projeto pode agregar em regiões carentes por melhorias, como, por exemplo, a criação de emprego.

- Preocupação social

Um aspecto relevante relacionado com a preocupação social é evitar rodovias, estradas e os centros populacionais (áreas urbanas, cidades etc.). Também se observou a preocupação para que a localização de termelétricas não seja próxima de locais de instalações críticas, como áreas de defesa nacional, portos, aeroportos e aeródromos. Há ainda a preocupação de se construir uma UTE muito próximo de terras indígenas. Esta é uma questão muito sensível para países com grandes áreas de florestas, como o Brasil.

- Aspectos Técnicos

Um aspecto relevante é evitar problemas de geração de interferência eletromagnética para a população e outros empreendimentos situados próximo de uma UTE. A questão da influência da altitude (pressão atmosférica) na eficiência da combustão do gás natural em turbo-geradores também é relevante. O principal aspecto técnico considerado na locação de uma UTE compreende a coletânea de riscos que esse tipo de instalação proporciona para toda a comunidade em seu entorno.

É necessário ter cautela para atribuir pesos para os fatores. A tarefa mais criativa na tomada de decisão é escolher os fatores que são importantes para essa decisão [SAATY, 1990]. Foram avaliados os estudos que abordam a experiência internacional no uso dos fatores, critérios e pesos para determinar a melhor localização de termelétricas a gás [CHOUDHARY & SHANKAR, 2012], [FEIZIZADEH et al., 2014], [AJAYI & OLAMIDE, 2014]. Os principais critérios e fatores pesquisados pelo autor desta tese estão na tabela 2. Por sua vez, um estudo brasileiro sobre a localização de UTEs a gás [ZAMBON et al., 2005] considerou os seguintes critérios: i) custo / impacto econômico (0.804); ii) poluição (0.122); e iii) disponibilidade de recursos (0.074). Esse levantamento reitera a importância da consideração dos critérios de disponibilidade de recursos e de custo / impacto econômico.

Tabela 2 - Os critérios e pesos dos critérios adotados em projetos de UTEs

	[CHOUDHARY & SHANKAR, 2012]	[AJAYI & OLAMIDE, 2014]	[FEIZIZADEH et al., 2014]
1º	Availability of resources (0.290)	Availability of resources (0.238)	Accessibility (0.261)
2º	Biological environment (0.240)	Topography/slope (0.195)	Topography/slope (0.177)
3º	Cost / Economic Impact (0.140)	Risk (0.174)	Lithology (0.150)
	Others (0.330)	Others (0.393)	Others (0.412)

Há também muitas contribuições acadêmicas relacionadas com os problemas de tomada de decisão combinando múltiplos critérios [BHUSHAN & RAI, 2004], [ABUDU & WILLIAMS, 2015]. Existem vários tipos de combinações de critérios baseados em Métodos de Decisão com Múltiplos Critérios - MDMC, Análise de Decisão de com Múltiplos Critérios – ADMC e Análise Hierárquica de Processos - AHP [ABS, 2016].

A escolha, por exemplo, de uma área remota para instalar a termelétrica a gás, ou seja, a preferência por uma área distante dos centros populacionais, é uma alternativa positiva de acordo com os seguintes critérios: maior distância da área pública, menor custo de aquisição da terra, menor número de remanejamento de proprietários e maior aceitação pública. Por outro lado, a distância dos grandes centros pode contribuir negativamente para o custo de operação e manutenção, na disponibilidade de mão de obra qualificada, bem como na questão da acessibilidade do ponto de consumo de eletricidade.

### 3.3.3 Visão geral do processo de projeto de faixas das infraestruturas de uma UTE

Infraestruturas de grandes dimensões, tais como gasodutos e linhas de transmissão, são sistemas complexos e possuem relação direta com a localização geográfica, as condições geológicas e os aspectos do meio ambiente onde estão inseridas [YILDIRIM et al., 2007].

Dependendo dos critérios adotados em seus projetos, o comprimento de cada uma dessas infraestruturas pode ser maior ou menor, e isso pode contribuir para a redução dos riscos e custos de investimento [SANTOS & CHRISMAN, 2016].

Existem três métodos aceitáveis para identificar e selecionar rotas potenciais [ABS, 2016]: (i) o método manual de seleção de rota baseado em uma superfície de custos composta; (ii) o método baseado em simulação estocástica; e (iii) o método computacional que utiliza as técnicas de otimização para escolha do caminho de menor custo, baseado em uma ou várias superfícies compostas de custo.

O método manual é caracterizado pelo delineamento e elaboração manual de mapas topográficos de baixa escala em papel, acarretando imprecisões e desperdício de recursos [BALOGUN et al., 2013]. A abordagem de simulação estocástica é usada para avaliar a incerteza que está associada à otimização da rota de menor custo de infraestruturas situadas em áreas com restrições geológicas [HANENBERG, 2015]. O método computacional que utiliza as técnicas de otimização para escolha do caminho de menor custo está baseado no uso de software GIS para definir uma rota otimizada entre dois pontos localizados em uma superfície de custo composta. Um mapa que contém uma superfície de custo composto é uma combinação de vários mapas dos custos de múltiplos critérios agrupados em um único mapa [EFFAT & HASSAN, 2013], [ABS, 2016].

Uma vez que os projetistas elaboraram os mapas georreferenciados mostrando as oportunidades e restrições que existem na área em estudo, os fatores e atributos devem ser analisados, a fim de estabelecer os critérios e pesos que farão parte de um modelo que será utilizado para determinar as melhores rotas [GIMENES & AUGUSTO FILHO, 2013].

Um software GIS é uma ferramenta utilizada para realizar eficazmente a busca do menor caminho em uma superfície de custo e pode substituir os métodos manuais e tradicionais de projeto de roteamento de infraestruturas [YILDIRIM et al., 2012]. Os produtos do software ArcGIS da ESRI usam o algoritmo de Dijkstra para encontrar o caminho de menor custo [EROĞLU & AYDIN, 2015]. No Algoritmo de Dijkstra, toda a rede de pontos que compõe a superfície é pesquisada. O algoritmo de Dijkstra é considerado o melhor método de busca de caminho mínimo [KANG & LEE, 2017]. A biblioteca de análise de rede do software QGIS implementa o algoritmo de Dijkstra [MANDEL et al., 2016].

Cabe destacar que o uso de software por si só não basta, a menos que exista uma metodologia e um procedimento para escolher a melhor solução de rota. Além disso, a precisão dos resultados do modelo computacional é diretamente proporcional à qualidade da informação, dos fatores e dos atributos utilizados [YILDIRIM et al., 2012].

As diferenças entre os processos de modelagem de traçado de infraestruturas de grandes extensões foram averiguadas [GONÇALVES, 2010]. Estudos sobre a validação e confiabilidade de mapas elaborados por software GIS usando o método AHP apontam melhores resultados quando a escala atribuída aos critérios possui mais do que quatro valores [KHODADAD & JANG, 2015] [LIMA et al., 2017].

A seleção ótima de rotas de gasodutos pode ser obtida de acordo com a seguinte metodologia (CHAN, 2000): i) identificação das alternativas; ii) preparação de uma base de dados; iii) identificação dos fatores e subfatores aplicáveis; iv) formulação da estrutura de risco adotando a metodologia AHP; v) comparação par a par dos fatores e subfatores para cálculo da importância; vi) comparação dos fatores entre as alternativas; vii) utilização do método AHP para calcular o alternativa de maior importância, ou seja, a rota ótima.

As principais atividades de uma metodologia para avaliar a melhor rota de gasodutos são [GAMARRA, 2015]: obter os dados georreferenciados, realizar o pré-processamento (criação das camadas), realizar o processamento de dados GIS (classificação, atribuição de pesos aos critérios), criar uma superfície de custo, realizar a otimização por meio de um software GIS, preparar mapa composto e escolher alternativa.

### **3.3.4 A experiência internacional no projeto de faixas de gasodutos**

Os principais fatores e critérios que afetam a localização da faixa de gasodutos são:

- Custo / impacto econômico

Minimizar o custo de aquisição dos terrenos da faixa.

- Acessibilidade

Priorizar o compartilhamento de faixas de passagens existentes, dentre elas as utilizadas as infraestruturas por gasodutos de transporte e distribuição.

- Aspectos do meio biótico

Evitar corpos de água, áreas sensíveis, unidades de conservação, parques nacionais, reservas, santuários e áreas de fauna ameaçada.

- Aspectos do meio físico

Evitar áreas de declive íngreme, áreas montanhosas, cordilheiras, solos desfavoráveis, locais de erosão, locais de deslizamentos de terra.

- Desenvolvimento socioeconômico

Evitar a construção de um gasoduto muito próxima de áreas agrícolas, pastagens e assentamentos.

- Preocupação social

Centros populacionais, locais de instalações críticas, áreas de mineração, terras indígenas, locais turísticos e de recreação.

- Aspectos técnicos

Priorizar o menor comprimento possível para o gasoduto, evitar o cruzamento de linhas de transmissão, estradas, ferrovias, bem como evitar a travessia de rios de grande largura e/ou profundidade.

Estudos que abordam a experiência internacional no uso dos fatores, critérios e pesos utilizados para encontrar a melhor localização de gasodutos foram avaliados [NONIS et al., 2007], [WAN et al., 2011], [YILDIRIM et al., 2012], [GAMARRA, 2015] e [YILDIRIM et al., 2016]. Os principais critérios e fatores pesquisados pelo autor desta tese estão na tabela 3.

Tabela 3 – Os critérios e pesos dos principais critérios adotados em projetos de gasodutos

	[NONIS et al., 2007]	[WAN et al., 2011]	[YILDIRIM et al., 2012]	[GAMARRA, 2015]	[YILDIRIM et al., 2016]
1º	Forest (0.216)	Slope (0.550)	Land Cover (0.263)	Environ. Sensitive Areas (0.155)	Land Cover (0.179)
2º	Prohibited Areas (0.212)	Geology (0.210)	Slope (0.211)	Geohazards (0.136)	Soil (0.166)
3º	Rivers (0.133)	Forest (0.105)	Geology (0.162)	Achaeological Sites (0.136)	River (0.145)
4º	Railways (0.104)	Famrland (0.050)	Soil (0.130)	Social Conflicts (0.127)	Stand Type - Forest (0.138)
5º	Landcost (0.103)	Rivers (0.028)	Landslide (0.092)	Population Density (0.1)	Historically Protected Areas (0.1)
	Others (0.233)	Others (0.057)	Others (0.142)	Others (0.346)	Others (0.272)

A preocupação com o uso de direito de passagem existente ou roteamento próximo de estradas é critério bastante positivo. O objetivo desses critérios é fazer com que o projeto siga o mesmo caminho adotado pelos projetos existentes e que já tenham sido objeto de processos de licenciamento ambiental, uma vez que esses processos são grandes dificuldades para os projetos de dutos.

Esses critérios indicam que é estratégico que o projeto do gasoduto privilegie as áreas remotas, mas evite cruzar com áreas ambientalmente sensíveis. Evitar áreas de declive íngreme é um critério que contribui para a acessibilidade durante a operação e manutenção de gasodutos, bem como reduz a complexidade do projeto.

A estratégia de evitar cruzamentos de linhas de transmissão é relevante, pois esse fato demanda a instalação de sistemas de proteção catódica mais elaborados, que, por sua vez, requerem constante manutenção. A falha em manter o sistema de proteção catódica de um gasoduto pode causar problemas de corrosão e reduzir a vida útil de sua tubulação.

Outra preocupação é a de evitar o cruzamento de estradas, ferrovias e rios, principalmente os de grande largura e/ou profundidade. Tais cruzamentos são considerados interferências que aumentam a complexidade e o custo do projeto, pois a transposição das mesmas geralmente está associada com obras especiais, como, por exemplo, a perfuração de furos direcionais ou até mesmo a escavação de túneis.

### **3.3.5 O projeto de faixas de gasodutos no Brasil**

A norma brasileira NBR 12.712 – 2002 disciplina o projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível, estabelecendo os critérios para projetos de cruzamento e de travessias de gasodutos. A referida norma também destaca que os projetos de cruzamento e travessias requerem estudos e análises específicas, e ainda uma prévia autorização, se necessária, dos órgãos competentes.

A seguir será realizada a revisão dos estudos e métodos tipicamente utilizados no projeto de faixa de gasodutos no Brasil.

- PETROBRAS - EIA do trecho terrestre do gasoduto Rota 3 (PETROBRAS, 2014):

O método da Petrobras tem como premissa incorporar as alternativas que minimizem, mitiguem ou compensem impactos negativos, bem como potencializem os impactos positivos, no que se refere aos meios físico, biótico, antrópico e à análise de riscos. A análise dos aspectos socioambientais relacionados com as alternativas locais está dividida em 3 etapas: planejamento, atividade de campo e análise dos dados levantados. O planejamento contempla a análise dos dados e informações do projeto do gasoduto, a interpretação de imagens, e a consulta a estudos pretéritos e à legislação ambiental vigente, para identificar e avaliar aspectos socioambientais relevantes. A etapa de campo consiste na visita in loco, via terrestre e aérea, na região onde se deseja construir o gasoduto, visando realizar registros fotográficos. A análise dos dados é realizada com base em critérios de seleção da alternativa mais favorável, estipulados pelo órgão ambiental no Termo de Referência do empreendimento.

No método Petrobras, as variáveis relativas aos meios físico, biótico e socioeconômico são avaliadas em termos qualitativos e quantitativos.

As principais variáveis relativas ao meio físico avaliadas no método Petrobras para cada uma das alternativas de corredor de um gasoduto são: extensão total, declividade, curvatura, elevação, classe do solo, travessias de cursos d'água, áreas brejosas ou inundáveis, áreas de instabilidade ou de potencial erosivo, cruzamento com rodovias,

cruzamento com vias urbanas e estradas vicinais, cruzamento com linhas de transmissão e áreas com processos de exploração mineral.

Já com relação ao meio biótico as principais variáveis no método Petrobras são a interceptação ou a distância de: áreas de mata nativa, unidades de conservação, áreas prioritárias para conservação, áreas de preservação permanente, áreas de fauna terrestre endêmica e/ou ameaçada.

Por último, as principais variáveis do meio socioeconômico avaliadas no método Petrobras são: o número de municípios interceptados, a interferência sobre aglomerados urbanos e áreas de uso industrial ou de serviços, a proximidade de áreas com possibilidade de expansão urbana, o número estimado de residências a serem realocadas, a interceptação de áreas de culturas agrícolas e de pastagem, a interceptação de áreas com potencial arqueológico e a interferência no patrimônio histórico e cultural.

No método Petrobras é atribuído para cada variável uma pontuação de zero a três, não sendo atribuídos pesos. Em seguida é calculada a média aritmética de cada meio e, por último, a média total. A alternativa escolhida pela Petrobras é a que ao final do processo de avaliação apresente a maior média.

- EPE - Gasoduto Guapimirim - COMPERJ (EPE, 2014):

Os estudos e métodos da EPE possuem como principal premissa a caracterização e as análises socioambiental e socioeconômica do empreendimento.

Com relação ao aspecto da caracterização socioambiental do empreendimento a EPE observa a densidade demográfica dos municípios atravessados, bem como seu clima e qualidade do ar. A preocupação com as características do relevo como declividade e elevação também são consideradas, bem como a preocupação com possíveis inundações em terrenos da área em estudo. Outras relevantes questões avaliadas estão relacionadas com a interação de cada alternativa em estudo com hidrografia local e o grau de preservação da vegetação que cada uma delas proporciona. A preocupação com o crescimento urbano e com a fauna presente nos municípios atravessados também



merecem destaque, bem como a existência de atividades de mineração outorgadas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral e a presença de população indígena na região em estudo. Não menos importantes são as considerações relacionadas com o patrimônio histórico e arqueológico e com os impactos socioambientais apontados por “Estudo de Análise de Risco” solicitado pelo órgão ambiental competente.

A análise socioambiental do empreendimento avaliada no método EPE é realizada a partir da interpretação de mapas elaborados com dados, informações e imagens, tais como: mapa de corredores, mapa hipsométrico (modelo digital de elevação), mapa de processos minerários baseados em ortofotos, mapas de áreas protegidas e mapa de geodiversidade. As principais variáveis do meio socioambiental são: possibilidade de compartilhamento de faixa com outros dutos visando minimizar a supressão de vegetação, as interferências relacionadas com o uso de solo para fins agrícolas, a largura dos rios, a presença de áreas com restrição legal (incluindo áreas de preservação) e o tipo de solo.

Os principais aspectos considerados pela EPE para definição da alternativa mais promissora são os locais onde: i) seriam menores os gastos com equipamentos e desapropriações fundiárias; e ii) seriam menores as áreas que demandariam supressão vegetal e os impactos relacionados aos meios físico, biótico ou socioeconômico. A EPE avalia as variáveis em termos qualitativos, sem o uso de pontuação e pesos atribuídos às variáveis.

- SULGÁS – Projeto de Faixa de Dutos – Tales S. Mattos (SULGAS, 2012):

O método da SULGÁS tem como premissa básica a elaboração de estudos por uma equipe multidisciplinar para realização do projeto conceitual, ou seja, a definição da diretriz preliminar do duto (o corredor que conterá o gasoduto). Tais estudos são baseados na base cartográfica disponibilizada pelo IBGE e outras instituições, inclusive ambientais, em mapas de interferências e em imagens de sensoriamento remoto existentes (imagens de satélite).

O critério para determinação da diretriz preliminar engloba: aspectos de construtibilidade, distância de áreas ambientalmente sensíveis, lógica de construção e manutenção da faixa, distância de cursos d’água e interferências diversas, tais como LTs.

A definição da diretriz preliminar é pré-requisito para a realização de vistorias de campo, via terrestre e aérea, ambos fazendo uso de dispositivos mapeadores por GPS.

Os critérios para definição da faixa do gasoduto a partir da análise dos dados coletados no campo são os critérios citados anteriormente, acrescidos de: distanciamento quanto aos aspectos geomorfológicos, menor extensão, raio mínimo (15 graus), inclinação máxima (50%), distância de cidades e aglomerações urbanas e acessibilidade.

O projeto da faixa de dutos padrão da Sulgás é implementado em uma base cartográfica. A elaboração da referida base cartográfica contempla os serviços de: elaboração de ortofotocartas obtidas por aerolevantamentos, geração de mapas de elevação e de interferência, cadastramento fundiário e jurídico. Um dos produtos do projeto da faixa é geração de uma nova e detalhada diretriz, denominada diretriz básica.

A partir da diretriz básica são realizados novos desvios da malha viária, da hidrografia e de outras interferências visando uma maior redução do número de cruzamentos e travessias. É definida então a poligonal secundária (ou diretriz microlocalizada), que permite a elaboração da planta da faixa de dutos e a minuta do decreto de utilidade pública. O padrão de plantas do projeto básico da Sulgás possui 1,5km de largura e 10km de comprimento. Em complemento às plantas do projeto básico é elaborado o zoneamento geotécnico, contendo o detalhamento dos mapas geológicos e mapas de solos.

Também são elaborados pela Sulgás os estudos de travessias especiais, merecendo destaque, os estudos topográficos e batimétricos, bem como os estudos hidrológicos e hidráulicos. A partir desses estudos são definidos os métodos construtivos das travessias, sendo, tipicamente, adotado um dos seguintes métodos: convencional, furo direcional (que faz uso da técnica *Horizontal Directional Drilling* - HDD) ou microtúnel (que faz uso de equipamentos *Tunnel Boring Machines* – TBM).

A Sulgás não faz menção se faz avaliação dos critérios em termos quantitativos ou se adota o uso de pontuação e pesos atribuídos às variáveis.

- Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (FREIRE, 2009):

O estudo de traçado de dutos da Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABECM) abrange a análise dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

Previamente ao início da análise dos aspectos técnicos deve ser identificado o traçado preliminar, por meio da cartografia disponível (IBGE e Diretoria de Serviço Geográfico do exército) e imagens obtidas a partir de sobrevoos. Esse primeiro caminhamento, segundo definido pelo método da ABECM, é utilizado para elaboração do Termo de Referência (TR) do empreendimento, bem como para fins dimensionamentos e cálculos de estimativas preliminares.

A partir do traçado preliminar são introduzidas informações obtidas a partir de ortofotos coletadas durante sobrevoos adicionais, acompanhada de informações altimétricas e do relevo. O resultado desta composição é o traçado básico do duto, que pode ser utilizado para fins da elaboração dos estudos ambientais EIA-RIMA.

Os princípios para a definição de faixas de dutos elencados pela ABECM: minimizar a movimentação de terra na fase de construção, manter a diretriz ou poligonal secundária com o menor comprimento possível, minimizar a quantidade de interferências, manter distância de estradas vicinais e estradas de domínio público, situar preferencialmente a lateral da faixa junto às divisas de propriedades, evitar terrenos de baixa suportaçã ou susceptíveis a deslizamentos, priorizar cruzamentos em locais planos, sem afloramento, longe de habitações, ortogonais com o eixo da interferência, realizar travessias nos trechos mais curtos e ortogonais aos leitos dos rios, evitar locais com aglomerações de edificações, considerar o comprimento desenvolvido, evitar áreas de reservas minerais, ambientais, indígenas e locais de captação de águas, bem como evitar o paralelismo com linhas de transmissão.

A ABECM recomenda ainda que: i) entre suprimir reflorestamento e mata nativa, preferir sempre o primeiro; ii) entre reflorestamento e silvicultura, preferir sempre silvicultura; iii) entre silvicultura e áreas de pastagem ou agricultura, preferir estas.

A ABECM não cita se faz avaliação dos critérios em termos quantitativos ou se adota o uso de pontuação e pesos atribuídos às variáveis.

- ESTEIO – Métodos Analíticos para Tomada de Decisão na Transposição de Obstáculos (GIL, 2010), Aplicação de GIS em Projetos de Dutos (LEAL, 2012):

O método da ESTEIO tem como premissa básica a elaboração de levantamentos, criação de uma base de dados e a realização estudos visando conceber os projetos de pré-detalhamento.

As bases de dados contêm os dados de memoriais descritivos e das interferências relevantes para a elaboração do projeto de pré-detalhamento. Além da base de dados são utilizados: base cartográfica, mapa esquemático do corredor, mapa de interferências com pontos de sondagem e informações do relevo, dentre outras. O padrão de mapa de interferência da Esteio contém mais do que 25 tipos distintos de interferência (LEAL, 2011).

De posse dessas informações, segundo consta no método da Esteio, são definidos grupos de levantamento de campo, que realizam serviços de batimetria, topografia, sondagens, roçagem, abertura de picadas e levantamentos geofísicos, dentre outros.

Em seguida são realizados estudos para definição da diretriz do duto e projetos complementares, merecendo destaque: os projetos geométrico e de terraplanagem, o estudo e o projeto ambiental, o projeto de implantação geral, o estudo geológico, o estudo e o projeto geotécnico, o estudo hidrológico, o estudo hidráulico, o projeto de drenagem e o estudo e projeto de obras especiais (travessias e cruzamentos).

A Esteio faz uso de métodos analíticos para tomada de decisão na transposição de obstáculos, a saber: Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Processo Analítico em Rede (ANP). As seguintes opções de transposição são avaliadas: subterrânea, aérea ou via HDD.

Observa-se, portanto, que as variáveis relativas aos meios físico, biótico e socioeconômico são avaliadas pela Esteio em termos qualitativos e quantitativos para tomada de decisões. A Esteio também adota o uso de pontuação e pesos.

### 3.3.6 A experiência internacional no projeto de faixas de Linhas de Transmissão (LT)

Os principais fatores e critérios que afetam a localização da faixa de LTs são:

- Custo / impacto econômico

Minimizar o custo de aquisição dos terrenos da faixa e o custo de O&M.

- Acessibilidade

Priorizar o acesso às instalações existentes de transmissão, ou seja, subestações.

- Aspectos do meio biótico

Evitar corpos de água, áreas sensíveis, unidades de conservação, parques nacionais, reservas, santuários e áreas de fauna ameaçada. Evitar locais com atmosfera corrosiva.

- Aspectos do meio físico

Evitar áreas de declive íngreme, áreas montanhosas, cordilheiras, solos desfavoráveis, locais de erosão, locais de deslizamentos de terra ou neve.

- Desenvolvimento socioeconômico

Evitar a construção de uma linha de transmissão muito próxima de áreas agrícolas, pastagens e assentamentos, por conta do eventual risco de danos causado por queimadas.

- Preocupação social

Centros populacionais, locais de instalações críticas, áreas de mineração que possam causar perturbações nas torres, terras indígenas, locais turísticos e de recreação.

- Aspectos técnicos

Priorizar o menor comprimento possível para a LT, evitar o cruzamento com outras LTs, ferrovias, gasodutos, linhas de telecomunicações, bem como evitar a geração de interferências eletromagnéticas e a travessia de rios de grande largura e/ou profundidade.

Existem muitos estudos que abordam o uso dos fatores, critérios e pesos utilizados para encontrar a melhor localização de linhas de transmissão [YILDIRIM & NISANCI, 2010], [DEDEMEN, 2013], [EROGLU & AYDIN, 2015], conforme exibido na tabela 4.

Tabela 4 – Os critérios e pesos dos principais critérios adotados em projetos de LTs

	[YILDIRIM & NISANCI, 2010]	[DEDEMEN, 2013]	[EROGLU & AYDIN, 2015]
1º	Land Use (0.200)	Settlements (0.173)	Land cover (0.255)
2º	Building Density (0.150)	Protected Areas (0.156)	Distance to roads (0.150)
3º	Landslide (0.150)	Linear Structures (0.138)	Slope (0.131)
4º	Soil (0.100)	Slope (0.122)	Soil (0.097)
5º	Slope (0.100)	Land Use Capability (0.088)	Geology (0.083)
	Others (0.300)	Others (0.323)	Others (0.285)

Observa-se, da mesma forma como ocorre com gasodutos, que é estratégico que o projeto da linha de transmissão privilegie as áreas remotas. Adicionalmente, evitar áreas de declive íngreme também contribui para a acessibilidade na fase de operação e manutenção.

Selecionar rotas para as linhas de transmissão que estejam distantes de áreas de defesa nacional, aeroportos e aeródromos é um fator extremamente relevante, tanto do ponto de vista da segurança das pessoas quanto da preservação da integridade da LT.

Evitar o encaminhamento próximo a estradas minimiza a possibilidade de exposição de seres humanos e outros empreendimentos (ferrovias, dutos e linhas de telecomunicações) a campos elétricos ou interferência eletromagnética gerada pela LT.

A preocupação com os fatores climáticos inclui evitar grandes áreas de chuva, vento, neve e relâmpagos a fim de evitar possíveis paralisações na operação da linha de transmissão. Alguns critérios, como evitar as áreas de gelo ou neve, aplicam-se a determinados países, mas não se aplicam a outros.

### 3.3.7 O projeto de faixas de linhas de transmissão no Brasil

A norma brasileira NBR 5.422-1985 disciplina o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica e estabelece os critérios para projetos de linhas aéreas de transmissão que operam entre 38kV e 800kV, de modo a garantir níveis mínimos de

segurança e limitar perturbações em instalações próximas. A referida norma também destaca que as distâncias mínimas de segurança devem ser determinadas por estudos, que levem em consideração as várias solicitações elétricas a que a linha de transmissão será submetida.

Com relação ao distanciamento de áreas indesejadas, um estudo brasileiro sobre a localização de linhas de transmissão [LIMA, 2015] considerou os seguintes critérios, ordenados por peso: i) Lagos (0.394); ii) Aeroportos (0.138); iii) Áreas alagadas (0.130); iv) unidades de conservação (0.121); v) rios (0.072); e vi) outros (0.146).

A seguir será realizada a revisão dos estudos e métodos tipicamente utilizados no projeto de faixa de linhas de transmissão no Brasil.

- FURNAS – Modelo de tomada de decisão para projetos de LT (ARAÚJO, 2009)

O método de Furnas para a escolha do corredor e definição da melhor alternativa de traçado para a implantação de uma LT tem ênfase na dimensão socioambiental. A avaliação da melhor alternativa é realizada através de uma metodologia de ponderação que considera três níveis hierárquicos: o inicial, o intermediário e o detalhado. Em cada nível são avaliadas as características típicas de um projeto, agrupadas em módulos. O nível 1 possibilita a realização do estudo do corredor. Já o nível 2 possibilita o estudo do corredor e o estudo de traçado. Por último, o nível 3 viabiliza o estudo detalhado do corredor e de traçado. No método Furnas, cada variável tem uma pontuação, definida como grau de sensibilidade. Desta forma, a pontuação total da alternativa de projeto leva em consideração uma pontuação de pesos que cada módulo representa no projeto específico.

A seguir serão listados os módulos e as variáveis averiguadas nos níveis 1 e 2: módulo físico (relevo, solo, geologia, rios e recursos minerais), módulo biótico (unidades de conservação, florestas estaduais, rios, vegetação e fauna), módulo socioeconômico (propriedades atingidas, municípios atingidos, aldeias indígenas, proximidade com núcleos urbanos e avaliação de imóveis), módulo técnico (comprimento, vértices, relevo, fundação e travessias), módulo jurídico (licença prévia, licença de instalação, licença de operação,

autorização de supressão de vegetação e audiência pública), módulo institucional (compensação ambiental, controle ambiental na construção, implantação da faixa de servidão, comunicação social e recuperação de área degradada), módulo construção (supressão de vegetação, instalação de canteiros, contratação de mão-de-obra, apoio logístico e condições das estradas de acesso), módulo impactos (supressão de vegetação, alteração da paisagem, perdas patrimoniais, relocação da população e seccionamento de núcleos urbanos), módulo orçamento (altura das torres, comprimento da linha, número de torres, número de vértices e peso/torre), módulo operação (acessos principais, acesso às torres, comprimento, aglomerados urbanos e paralelismo), módulo de risco (embargo de proprietário, embargo de ação civil pública, embargo de organizações, estudo de variante e mobilização de organizações) e módulo de comparação (vegetação, unidades de conservação, centros urbanos, topografia, solos frágeis e alta declividade).

O método de Furnas é uma análise integrada da avaliação de todas as características que determinam a implantação de um projeto de linha de transmissão.

- EPE - Planejamento da Expansão da Transmissão (BARROSO, 2016)

A EPE realiza vários estudos, dentre eles os relacionados com planejamento da expansão da transmissão da energia elétrica no Brasil.

Resumidamente, o planejamento da transmissão considera a extensão das linhas, os corredores, a localização das subestações que irão receber a energia elétrica e os aspectos ambientais. Adicionalmente, o planejamento da transmissão considera o plano indicativo de geração. Ou seja, o planejamento da transmissão considera a conexão dos novos empreendimentos de geração, que são objetos dos leilões de energia da ANEEL.

A definição das alternativas de corredores das linhas de transmissão e a localização das subestações é realizada com base em uma avaliação socioambiental que é realizada no Relatório “Viabilidade Técnico-Econômica e Socioambiental - R1”. Através do relatório R1, a EPE analisa preliminarmente as alternativas de transmissão, define e caracteriza os corredores referenciais para as futuras linhas de transmissão e/ou áreas potenciais para



implantação de novas subestações, bem como apresenta as recomendações para a elaboração dos Relatórios R3.

Os aspectos socioambientais analisados pela EPE no relatório R1 são: áreas protegidas (terra indígena, terra quilombola, unidades de conservação, cavernas e sítios arqueológicos), uso do solo (vegetação nativa, silvicultura, áreas urbanas, benfeitorias rurais e planos diretores municipais), infraestrutura e energia (aeroportos/aeródromos, ferrovias, processos minerários, dutos e reservatórios) e outros aspectos (reserva da Biosfera, assentamentos rurais, corpos d'água e áreas alagáveis).

A definição de referencial da linha de transmissão, ou seja, do traçado da linha integrado à subestação destino é objeto do “Relatório Socioambiental – R3”. Através do relatório R3, a EPE detalha as características socioambientais do corredor, define a diretriz referencial de traçado da futura linha de transmissão ou localização referencial de nova subestação, bem como apresenta as principais interferências socioambientais do empreendimento. Aponta também os possíveis fatores de sobrecustos socioambientais e a eventual demanda de licenciamento ambiental mais complexo. O Relatório R3 é o documento utilizado pela ANEEL para subsidiar o leilão da linha de transmissão.

A EPE faz uso de software GIS para produzir os mapas que são utilizados nas análises e que fazem parte dos estudos R1 e R3 (MATOSINHO, 2010)

- Otimização de traçados de linhas de transmissão utilizando SIG e avaliação multicritério (LIMA et al., 2017)

Esta abordagem é baseada no uso de uma metodologia de roteamento de uma LT através de um software GIS utilizando Processo Analítico Hierárquico (AHP). Esse método adota fatores (solo, vegetação, área urbana e relevo) e critérios (aeroportos, áreas alagadas, áreas de preservação permanente, hidrografia, rios navegáveis, sistema interligado nacional, unidades de conservação, uso do solo e estruturas que possam causar interferências). Um mapa da superfície de custo composta a partir dos pontos e pesos de cada critério é inserido em um software GIS para cálculo do caminho de menor custo.

### 3.3.8 Discussões e Considerações

Primeiramente, cabe destacar que as empresas e instituições brasileiras e estrangeiras não adotam uma metodologia padronizada, seja com relação ao projeto de cada módulo do empreendimento em separado (UTE, linha de transmissão e gasoduto), seja em relação ao projeto de modo integrado.

Observa-se que alguns métodos adotam poucos critérios, enquanto outros consideram dezenas de critérios, muitas vezes diluindo a intensidade dos pesos que deveriam ser concentradas nos mais relevantes. O número elevado de critérios pode trazer complexidade computacional e causar lentidão na busca da solução do melhor traçado.

Percebe-se também que alguns métodos avaliam a melhor alternativa de traçado da infraestrutura em termos qualitativos, enquanto outros fazem a avaliação em termos quantitativos, utilizando pontuação e pesos para a apuração dos critérios.

O uso de uma abordagem matemática para a solução do problema de planejamento confere a ele transparência na metodologia aplicada, reprodutibilidade dos resultados e, sobretudo, imparcialidade (CHABAR, 2010).

Tipicamente, sob a ótica da engenharia de processos, os projetos podem ser considerados como problemas de otimização e podem ser resolvidos considerando o enfoque nos níveis tecnológico, paramétrico e estrutural. Os enfoques paramétrico e estrutural merecem destaque. No nível paramétrico, a preocupação é determinar o desempenho ótimo da estrutura objeto de análise, visando a obtenção de um lucro máximo ou a redução de custo para um patamar mínimo. Já com relação ao nível estrutural, as soluções de otimização estão relacionadas com geração sucessiva de estruturas alternativas com diferentes arranjos visando a obtenção de uma solução ótima que possua baixo custo de investimento e baixo custo de operação e manutenção (PERLINGEIRO, 2005).

É importante ressaltar que, atualmente, embora existam metodologias separadas para conduzir estudos de linhas de transmissão e de gasodutos, os agentes de ambos os setores utilizam o mesmo tipo de software (GIS) e utilizam as mesmas técnicas de tomada

de decisão combinando múltiplos critérios.

É possível verificar que nas metodologias atuais o estudo da seleção de rotas dessas infraestruturas ocorre de forma independente, muitas vezes realizadas em diferentes momentos e por técnicos, empresas ou instituições diferentes. O fato de realizar o cálculo da localização de cada infraestrutura separadamente sugere que a localização global da termelétrica, juntamente com suas infraestruturas, poderá não ser a melhor.

Cabe destacar que a escolha do traçado dessas infraestruturas pode envolver a análise simultânea de dados e informações coletadas em diferentes momentos. Esse fato exige que antes da contratação ou construção do projeto seja realizada uma visita ao longo do trajeto para verificar se há alterações que afetem a escolha feita.

A existência de múltiplos critérios conflitantes contribui para tornar a análise mais complexa. A influência positiva ou negativa que um aspecto proporciona sobre o outro é uma característica do problema e pode ser minimizada pela aplicação dos pesos dos critérios.

Vale destacar a aplicação simultânea de alguns critérios pode influenciar positivamente a implementação de parte do projeto (ex.: a termelétrica a gás e a linha de transmissão) e negativamente outra parte do projeto (ex.: o gasoduto). A aplicação simultânea de critérios como manter distância de áreas públicas e evitar os centros populacionais, embora aja positivamente quando analisada cada parte do projeto em separado, pode afetar o projeto como um todo.

É necessário ter cautela ao dimensionar os pesos a serem atribuídos aos critérios. Neste último caso, um peso superdimensionado aplicado ao critério de distância de centros populacionais poderia aumentar desnecessariamente a linha de transmissão e o comprimento do gasoduto, aumentando assim o custo total do projeto.

Por outro lado, embora a obtenção de uma rota mais curta possível de infraestrutura tanto para gasodutos e linhas de transmissão proporcione um menor desembolso de investimento quando observado isoladamente, pode, no entanto, produzir

um efeito oposto. A seleção de uma linha de transmissão mais curta pode resultar na necessidade de seleção de um gasoduto mais longo, fato este que pode ser indesejável. Um gasoduto de menor extensão permite uma menor queda de pressão entre o ponto de injeção de gás natural e o ponto suprimento de gás para a termelétrica. O valor da queda de pressão por quilômetro é um parâmetro relevante no projeto de um gasoduto [MOHITPOUR et. al., 2007]. Esse parâmetro pode determinar a necessidade de implementação de uma estação de compressão para aumentar a pressão, aumentando o custo do projeto. A seleção de um traçado de gasoduto de menor extensão pode resultar na necessidade de seleção de uma linha de transmissão mais longa.

Efeitos opostos também podem ser observados na aplicação simultânea de critérios relacionados à proximidade de outras infraestruturas, uma vez que no projeto de gasoduto deseja-se aproveitar as áreas existentes de direito de passagem das linhas de telecomunicações, visando reduzir o custo com licenciamento e aquisição de terra. Por sua vez, observa-se que durante o projeto da linha de transmissão é necessário manter distância dessas instalações, por causa das interferências.

Situação semelhante pode ser observada nos critérios relacionados à proximidade de locais com disponibilidade de água, pois enquanto o ideal é que uma UTE a gás esteja localizada próxima a locais com disponibilidade de água (um rio, por exemplo), as instalações de linha de transmissão e de gasoduto devem ser localizadas longe de tais lugares.

A utilização de forma padronizada dos critérios mais observados na experiência nacional e internacional para a investigação das rotas em corredores de gasodutos e linhas de transmissão deve ser realizada com a inclusão de critérios complementares associados às particularidades presentes na região atravessadas por cada infraestrutura.

A revisão das metodologias apresentadas neste capítulo não foi realizada com o objetivo de definir qual é a melhor metodologia ou sugerir que uma técnica, seja ela pelo uso de Métodos de Aprendizado de Máquina ou de Simulação por meio do Método de Monte Carlo, seja superior ou deva ser utilizada especificamente para determinado tipo de

projeto de faixa. Como será observado no próximo capítulo, a escolha do método e do software foi realizada considerando o uso de um método de busca consagrado no meio acadêmico e empresarial (Método de Dijkstra) implementado em um software de baixo custo.

A intenção deste capítulo, na verdade, foi mostrar as diferenças e semelhanças que existem nas metodologias atualmente utilizadas para definir o melhor traçado de infraestruturas de termelétricas a gás natural, com o objetivo de demonstrar que há oportunidade para o aprimoramento e a integração dessas metodologias.

#### **4 Metodologia**

Ao longo dos capítulos anteriores foram apresentadas as principais características dos setores do gás natural e da energia elétrica, bem como os principais aspectos considerados na etapa de projeto que afetam os processos de tomada de decisão de seleção de rota de gasodutos, linhas de transmissão e da localização de uma usina termelétrica a gás natural.

Observou-se que existem diversas teorias e métodos que auxiliam os executivos que atuam nos setores de energia elétrica e gás natural realizarem a tomada de decisões.

Apesar de existirem estudos que abordam metodologias para a realização, de forma isolada, do processo de seleção de rota de infraestruturas lineares (como é o caso de gasodutos e linhas de transmissão) e de localização de usina termelétrica, não existe uma metodologia integradora desses trabalhos. Não se dispõe de um método que oriente a aplicabilidade do encadeamento ou da simultaneidade de tais estudos, tampouco proponha uma lógica para o estabelecimento de premissas e de critérios que possibilitem a obtenção de uma solução ótima para o problema de seleção de rota do empreendimento (linha de transmissão + UTE + gasoduto) de forma integrada.

#### 4.1 Metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural

Realizar de forma integrada a tomada de decisão acerca da localização de uma usina termelétrica a gás natural e de suas infraestruturas requer uma metodologia robusta e que considere que tal decisão está inserida no contexto do planejamento do setor energético nacional.

Tipicamente a metodologia empregada para realização de pesquisas científicas engloba as seguintes etapas: (i) coleta de dados; (ii) seleção, tratamento e tabulação dos dados; (iii) análise dos dados; (iv) elaboração e validação de modelos; (v) elaboração, interpretação e validação de estudos de caso; e (vi) análise e discussão dos resultados.

As metodologias empregadas para a resolução de problemas de gestão que utilizam dados georreferenciados não necessariamente devem se ater as etapas supracitadas, ou seja, podem contemplar etapas adicionais.

Desta forma, será apresentada a seguir uma proposta de metodologia de seleção da rota ótima integrada da usina termelétrica e suas infraestruturas. O fluxo das ações a serem seguidas nesse método pode ser observado nas figuras 20 a 24.

Metodologia de Seleção de Rota Ótima Integrada



Figura 20 – Visão geral da metodologia de seleção de rota ótima integrada

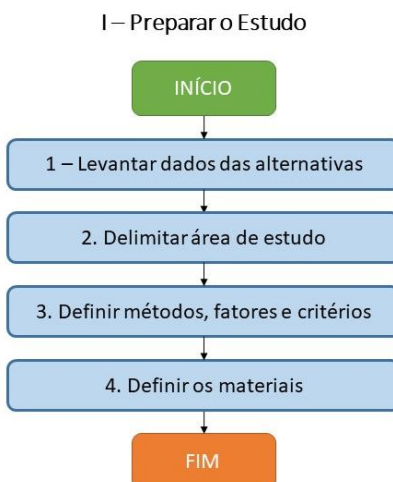


Figura 21 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe I)

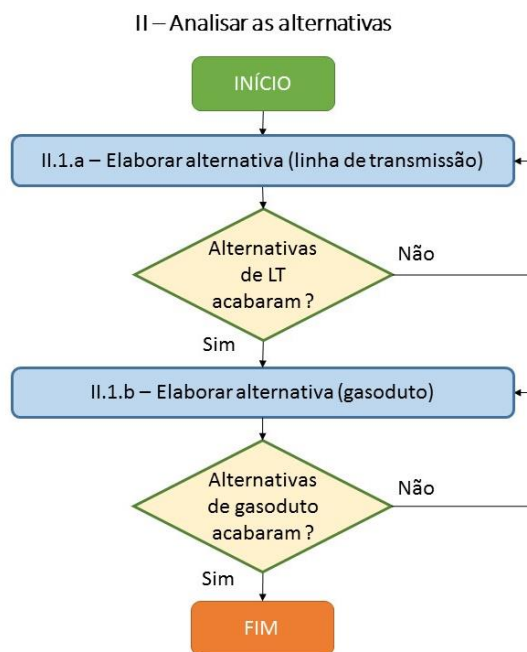


Figura 22 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe II)

Cabe destacar que as etapas da metodologia proposta nesta tese estão inseridas em contexto multifuncional, ou seja, devem ser desempenhadas por profissionais com diferentes formações e por participantes de diferentes organizações dos setores do gás natural, energia elétrica, meio ambiente e do mercado, atuando juntos com o objetivo de encontrar uma solução integrada de menor custo.

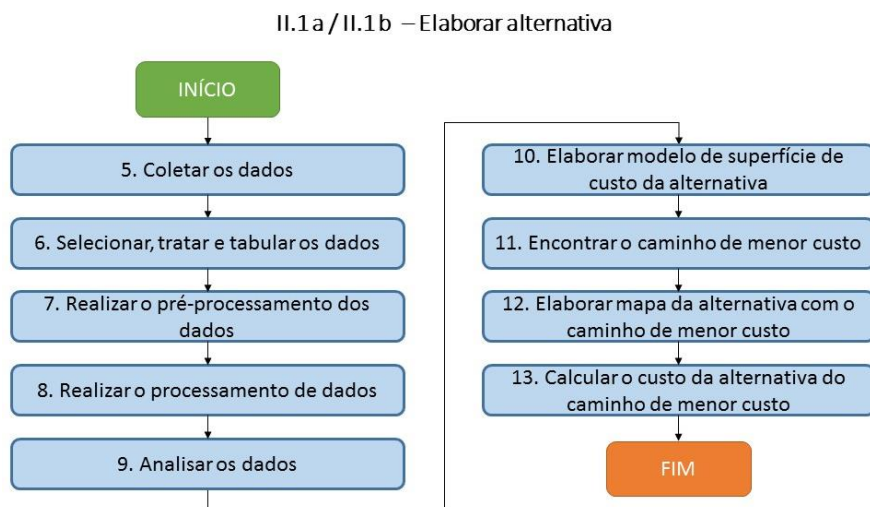


Figura 23 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe II.1.a / II.1.b)

### III – Encontrar Rota Ótima Integrada



Figura 24 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada (Detalhe III)

A seguir será realizado o detalhamento de cada uma das etapas da metodologia.

#### 4.1.1 Levantar dados das alternativas

- Descrição da etapa:

Levantar informações sobre os projetos de instalações de gasodutos e de instalações de geração e transmissão de energia elétrica apontadas nos estudos indicativos e determinativos já realizados pelo governo federal, visando identificar as alternativas.

- Atividades:



Pesquisar os dados de demanda e oferta de energia elétrica e de gás natural no Brasil. Pesquisar os estudos de planejamento dos setores de gás natural e energia elétrica. Pesquisar os estudos para a expansão da transmissão de energia elétrica. Identificar os pontos de sobrecarga no sistema elétrico. Pesquisar os gargalos ou restrições de oferta e de transporte de gás natural. Verificar a disponibilidade física (existente ou planejada) de equipamentos para interconexão das infraestruturas da termelétrica.

- Materiais:

Software GIS, Google Earth, planilha eletrônica, editor de texto e banco de dados.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE). Plano Nacional de Energia (PEN). Balanço Energético Nacional (BEN). Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Estudos para a expansão da transmissão de energia elétrica / Análise Técnico-Econômica de Alternativas: Análise socioambiental do atendimento elétrico - Relatório R1. Sistema de Informações Georeferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL). Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Boletim Mensal da Indústria do Gás Natural (MME). Plano Indicativo de Gasodutos. Plano Decenal de Expansão da Malha de Transporte Dutoviário (PEMAT). Base cartográfica integrada do Brasil, incluindo hidrografia, divisão territorial e sistema viário (IBGE). Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA). Análise de Risco (AR). Relatório Ambiental Simplificado (RAS). Relatório Ambiental Preliminar (RAP).

- Detalhamento da Atividade:

Identificar os pontos de origem, destino e, eventualmente, os intermediários, candidatos a integrarem o traçado das instalações de gasodutos e linhas de transmissão de uma UTE a gás natural, ou seja, registrar os dados que informam sobre a ampliação de subestações existentes, a construção de novas subestações, a construção de novas linhas de transmissão, a ampliação de pontos de entrega existente, a construção de novos gasodutos e pontos de entrega e a construção de novos terminais de regaseificação de GNL.

Identificar e/ou localizar as coordenadas das instalações existentes próximas dos pontos de gargalo ou restrição de oferta e de transporte de gás natural, bem como os pontos de sobrecarga no sistema elétrico. Identificar nas subestações, novas ou existentes, a disponibilidade de espaço e de equipamentos para a interligação da linha de transmissão da usina termelétrica. Identificar, nos pontos de entrega ou nas estações de compressão de gasodutos existentes, a disponibilidade de válvulas de espera para a interligação do gasoduto da usina termelétrica. Procurar sempre os documentos mais atualizados.

- Resultados:

Mapa do Brasil com a localização dos pontos de origem, destino e intermediários do traçado das instalações de linhas de transmissão e gasoduto. Banco de Dados sobre as alternativas identificadas, incluindo dados sobre as instalações existentes a partir das quais poderão ser realizadas as interligações das infraestruturas da UTE. Lista das alternativas, por município / estado.

#### **4.1.2 Delimitar área de estudo**

- Descrição da etapa:

Delimitar a(s) área(s) de estudo, contemplando os corredores que irão conter as alternativas de projeto de linhas de transmissão e de gasoduto, candidatas a se interligarem à termelétrica.

- Atividades:

Definir as premissas para delimitar a área de estudo considerando as principais limitações relacionadas com a localização da usina termelétrica, da linha de transmissão e do gasoduto. Delimitar a(s) área(s) de estudo, identificando (numerando) cada um dos corredores e suas alternativas candidatas.

- Materiais:

Software GIS, Editor de texto.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Memoriais descritivos, fluxogramas de engenharia, diagramas P&I e folhas de dados de equipamentos da instalação que fornecerá o gás natural para o gasoduto da usina termelétrica. Memorial Descritivo e Balanço de energia da UTE, ressaltando a capacidade instalada de projeto. Base cartográfica integrada do Brasil, incluindo hidrografia, divisão territorial e sistema viário (IBGE).

- Detalhamento da Atividade:

Estabelecer premissas para delimitar a área de estudo considerando as principais limitações relacionadas com a localização da usina termelétrica (proximidade de rios, aspectos de acessibilidade aos meios de transporte e disponibilidade de mão de obra), da linha de transmissão (as limitações relacionadas com atmosferas corrosivas e regiões costeiras) e do gasoduto (as limitações de comprimento mínimo e máximo do gasoduto, bem como as limitações de pressão mínima e máxima da instalação que fornecerá o gás natural para o gasoduto da usina termelétrica). Delimitar o(s) corredor(es) adotando as premissas estabelecidas. Criar um mapa para cada corredor delimitado abrangendo a termelétrica e os pontos de origem e destino das instalações de cada uma das alternativas de linha de transmissão e de gasoduto.

- Resultados:

Lista com a identificação de cada um dos corredores e suas alternativas candidatas. Mapas com a localização de corredores e alternativas. Lista de premissas adotadas na definição do corredor do gasoduto. Lista de premissas adotadas na definição do corredor da LT. Lista dos nomes dos rios com disponibilidade de água para a UTE. Lista dos nomes das estradas com cobertura asfáltica e largura compatíveis com o transporte de equipamentos de cargas e dimensões elevadas.

#### **4.1.3 Definir os métodos, fatores e critérios**

- Descrição da etapa:

Definir os métodos, fatores e critérios a serem adotados para solução do problema do caminho de menor custo, tanto para o traçado da linha de transmissão, quanto para o traçado do gasoduto. Definir os métodos e variáveis a serem adotados para resolver o problema do custo ótimo da solução integrada e identificar a alternativa promissora.

- Atividades:

Elaborar um banco de dados contendo os métodos, fatores e os critérios usualmente adotados para a solução dos problemas supracitados. Definir os métodos, fatores e os critérios a serem adotados para solução do problema do caminho de menor custo, considerando as características específicas de cada tipo infraestrutura. Definir os métodos e as variáveis a serem adotados para resolver o problema do custo ótimo da solução integrada 'linha de transmissão + gasoduto'.

- Materiais:

Software GIS, planilha eletrônica, editor de texto e banco de dados.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos elaborados nos itens anteriores, acrescido da relação de métodos, fatores e critérios tipicamente utilizados nos projetos de faixa de linhas de transmissão e de gasoduto no Brasil, conforme detalhado no capítulo anterior.

- Detalhamento da Atividade:

Selecionar os métodos, fatores e os critérios usualmente adotados para a solução dos problemas supracitados e armazenar em um banco de dados. Definir os métodos, fatores e os critérios a serem adotados para solução do problema do caminho de menor custo, considerando as características específicas de cada tipo infraestrutura e observando os aspectos técnicos, os custos / impactos econômico dos projetos, a disponibilidade de recursos, os aspectos de acessibilidade, o meio biótico, o meio físico, os aspectos de desenvolvimento socioeconômico e a questão da preocupação social. Definir a escala de importância para cada fator e critério. Definir o valor de importância para cada fator e

critério. Calcular a importância relativa de cada fator e critério. Calcular o peso de cada fator e critério, de acordo com o método estabelecido. Fazer uma análise de sensibilidade do peso atribuído a cada fator e critério, visando identificar se algum peso ou importância foi superdimensionado ou subdimensionado, ou mesmo se foram atribuídos valores de importância inconsistentes para critérios conflitantes. Definir os métodos e as variáveis a serem adotados para resolver o problema do custo ótimo da solução integrada 'linha de transmissão + gasoduto'. Verificar se as escolhas realizadas se aplicam para os corredores.

- Resultados:

Banco de dados de métodos, fatores, critérios e seus pesos.

#### **4.1.4 Definir os materiais**

- Descrição da etapa:

Definir o método de busca e o software (com algoritmo nativo ou incorporado via complemento ou *plug-in*) a serem adotados na solução do problema de seleção do caminho de menor custo das infraestruturas da termelétrica. Dar preferência para software gratuito.

- Atividades:

Pesquisar métodos de busca adotados para realizar análises espaciais. Pesquisar os softwares e bibliotecas de funções que realizam análises espaciais e que sejam compatíveis com os formatos de dados e mapas georreferenciados obtidos ou produzidos nas etapas anteriores. Avaliar a performance dos softwares, para realizar análises espaciais, adotando os métodos de busca pesquisados. Estabelecer o método de busca e o software a serem adotados na solução do problema de seleção do caminho com menor custo.

- Materiais:

Observação: o Software SIG usado até então era utilizado apenas para fazer mapas. A partir desta etapa, porém, o referido software adicionalmente será utilizado para fazer análises espaciais, fazendo uso de técnica(s) de busca do caminho de menor custo, associado ao traçado de linhas de transmissão e de gasodutos.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Manuais dos softwares SIG disponíveis no mercado. Literatura especializada.

- Detalhamento da Atividade:

Pesquisar métodos disponíveis. Pesquisar softwares disponíveis. Pesquisar compatibilidade dos formatos de dados georreferenciados suportados pelos softwares. Pesquisar complementos de funções de análises espaciais disponíveis. Avaliar a performance dos softwares / métodos. Definir o método de busca e o software (com algoritmo nativo ou incorporado via complemento ou *plug-in*) a serem adotados na solução do problema de seleção do caminho (traçado) com menor custo.

- Resultados:

Nome do método de busca. Nome do software SIG e, eventualmente, das bibliotecas e/ou complementos necessários para execução de análises espaciais.

#### **4.1.5 Coletar Dados**

- Descrição da etapa:

Coletar os dados de interesse relacionados com a alternativa em análise.

- Atividades:

Coletar os dados de interesse, inclusive os dados georreferenciados e os de custo de materiais, relacionados com a alternativa (linha de transmissão ou gasoduto) em análise. Armazenar os dados coletados em uma planilha eletrônica. Armazenar os dados georreferenciados em uma pasta de projeto. Elaborar uma planilha de controle dos dados coletados e armazenados.

- Materiais:

Software GIS, software de compressão/descompressão de arquivos, planilha eletrônica.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Dados e coordenadas geográficas de infraestruturas do setor elétrico disponíveis no Sistema de Informações Georeferenciadas do Setor Elétrico (ANEEL/SIGEL) e no Banco de Informações de Geração (ANEEL/BIG). Dados e coordenadas geográficas de infraestruturas de processamento e transporte de gás natural e de regaseificação de GNL (EPE/ANP). Base Cartográfica Integrada do Brasil, incluindo hidrografia divisão territorial e sistema viário (IBGE), Banco de Dados do Sistema de Gerenciamento do Patrimônio Arqueológico (IPHAN), Lista de Aeródromos Privados e Públicos (ANAC), Lista de Comunidades Quilombolas certificadas por município (FCP), Mapa das Áreas Prioritárias para a Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira (MMA/EMBRAPA), Mapa da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica (RBMA), Mapa de Declividade em Percentual do Relevo Brasileiro (CPRM), Mapa de Hipsometria (USGS), Modelo de Elevação Digital do Brasil (TOPODAT/INPE). Mapa de Ocorrência de Cavernas (CECAV), Mapa de Processos Minerários (DNPM), Mapa de Projetos de Assentamento (INCRA), Mapa de Projetos Elétricos Planejados e Existentes (EPE), Mapa de Reserva Particular do Patrimônio Natural (ICMBio), Mapa de Terras Indígenas (FUNAI), Mapa de Territórios Quilombolas (INCRA), Mapa de Unidades de Conservação Federais e Estaduais (MMA), Mapa dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica (FSOSMA/INPE), Mapeamento da Cobertura Vegetal e Uso do Solo dos Biomas Brasileiros (MMA), Traçado georreferenciado de linhas de transmissão existentes e subestações (ANEEL). Traçado georreferenciado de gasodutos existentes e pontos de entrega (ANP). Planos Diretores Urbanos dos municípios de interesse. Contratos de Materiais e Serviços da Transpetro/Petrobras publicados em atendimento à Lei nº 13.303/2016 (Lei das Estatais), Lei nº 9.755/1998, Instrução Normativa TCU nº 28/1999, Ofício Circular TCU/SEGCEX nº 04/1999. Outros dados obtidos através da Lei de Acesso à Informação (Lei nº 12.527/2011).

- Detalhamento da Atividade:

Coletar os dados de interesse, inclusive os dados georreferenciados e os de custo de materiais. Registrar a data da produção dos dados para verificação futura de sua validade.

- Resultados:

Planilha com dados de interesse relacionados com a alternativa (linha de transmissão ou gasoduto). Arquivos compactados dos dados georreferenciados. Planilha de controle dos dados coletados e armazenados.

#### **4.1.6 Selecionar, tratar e tabular os dados**

- Descrição da etapa:

Realizar a seleção, tratamento e tabulação dos dados de interesse.

- Atividades:

Converter os dados para as unidades do Sistema Internacional (SI). Converter os dados de custo para reais e aplicar o reajuste de acordo com os índices de preços aplicáveis. Converter os dados georreferenciados para o sistema SIRGAS 2000. Ajustar os nomes arquivos das camadas. Ajustar os elementos das camadas. Fazer tratamento estatístico dos dados. Armazenar os dados tratados de alternativa (linha de transmissão ou gasoduto) no Power BI.

- Materiais:

Software GIS, software estatístico, planilha eletrônica, Power BI.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos elaborados nos itens anteriores.

- Detalhamento da Atividade:

Converter os dados de outras unidades para as unidades do Sistema Internacional (SI). Converter os dados de custo para reais e aplicar o reajuste de acordo com os índices de preços aplicáveis. Converter os dados georreferenciados que estejam em outros sistemas de coordenadas para o sistema SIRGAS 2000. Ajustar os nomes das camadas de acordo com os nomes dos critérios. Ajustar a cores e os formatos das linhas dos elementos



das camadas. Fazer tratamento estatístico dos dados visando identificar medidas de tendências, correlações e possíveis inconsistências (*outliers*). Armazenar os dados tratados de alternativa (linha de transmissão ou gasoduto) no Power BI.

- Resultados:

Arquivo de vetores, *shapefiles* e *raster* para uso em software GIS. Planilha com dados de interesse relacionados com a alternativa, acrescida dos dados de custo. Banco de dados Power BI.

#### **4.1.7 Realizar o pré-processamento dos dados**

- Descrição da etapa:

Realizar o pré-processamento dos dados georreferenciados

- Atividades:

Realizar o pré-processamento dos dados georreferenciados, ajustando o *range* de cada uma das camadas.

- Materiais:

Software GIS.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos georreferenciados elaborados nos itens anteriores.

- Detalhamento da Atividade:

Realizar o pré-processamento dos dados georreferenciados, ajustando o *range* de cada uma das camadas (critérios). Atentar para utilização do sistema de coordenada do Brasil. Elaborar um mapa com todas as camadas elaboradas nos itens anteriores.

- Resultados:

Camadas dos critérios elaborados no software GIS. Mapas contendo os dados pré-

processados da alternativa (UTE e subestação da linha de transmissão ou ponto de entrega de gasoduto) dentro das regiões delimitadas.

#### **4.1.8 Realizar o processamento de dados**

- Descrição da etapa:

Realizar o processamento de dados GIS, por meio da classificação e ajuste de escala das camadas associadas aos critérios.

- Atividades:

Classificar as camadas ajustando os atributos de exibição de seus elementos em função de seu valor de importância, de modo que os critérios qualitativos sejam transformados em critérios quantitativos. Ajustar os atributos de cor de modo que valores baixos permaneçam com tom claro e valores altos sejam exibidos com tons mais escuros. Ajustar a escala do valor de importância de todas as camadas associadas aos critérios para que sejam normalizadas de acordo com a escala definida na etapa de definição de métodos, fatores e critérios. Converter dados vetoriais das camadas em dados de superfície.

- Materiais:

Software GIS.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos georreferenciados elaborados nos itens anteriores.

- Detalhamento da Atividade:

Realizar o processamento de dados GIS.

- Resultados:

Camadas dos critérios elaborados no software GIS. Mapas contendo os dados processados da alternativa (UTE e subestação da linha de transmissão ou ponto de entrega de gasoduto) dentro das regiões delimitadas.

#### 4.1.9 Analisar os dados

- Descrição da etapa:

Analisar os dados de interesse e identificar as oportunidades e restrições fazendo uso dos mapas das regiões delimitadas.

- Atividades:

Analisar os dados de interesse e identificar as oportunidades e restrições fazendo uso dos mapas das regiões delimitadas. Ajustar valores de importância das restrições identificadas em cada uma das camadas.

- Materiais:

Software GIS.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos georreferenciados elaborados nos itens anteriores. Banco de dados de métodos, fatores, critérios e seus pesos. Relação de métodos, fatores e critérios tipicamente utilizados nos projetos de faixa de linhas de transmissão e de gasoduto no Brasil.

- Detalhamento da Atividade:

Analisar os dados de interesse e identificar as oportunidades e restrições fazendo uso dos mapas das regiões delimitadas. Ajustar valores de importância das restrições identificadas em cada uma das camadas, de modo a classificar esses elementos (pontos ou polígonos) como regiões proibidas (*no go*). Ajustar valores de importância das oportunidades identificadas em cada uma das camadas, de modo a classificar esses elementos (pontos ou polígonos) como regiões prioritárias ou de passagem obrigatórias (*go*). Verificar se o estabelecimento de regiões proibidas não inviabiliza o projeto.

- Resultados:

Camadas dos critérios elaborados no software GIS. Mapas contendo os dados processados da alternativa (UTE e subestação da linha de transmissão ou ponto de entrega de gasoduto) dentro das regiões delimitadas, considerando as regiões de passagens proibidas e/ou prioritárias.

#### **4.1.10 Elaborar modelo de superfície de custo da alternativa**

- Descrição da etapa:

Criar um modelo de superfície de custo da alternativa, combinando os valores e pesos dos fatores e critérios das camadas em uma única superfície.

- Atividades:

Configurar o modelo da camada de superfície de custo da alternativa combinando os valores e os pesos dos fatores e critérios das camadas em uma única superfície. Criar a camada de superfície de custo da alternativa.

- Materiais:

Software GIS.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos georreferenciados elaborados nos itens anteriores.

- Detalhamento da Atividade:

Inserir a fórmula do modelo matemático que combina os valores e os pesos dos fatores e critérios das camadas em uma única superfície. Criar a camada de superfície de custo da alternativa, ajustando seus atributos de cor de modo a facilitar sua visualização considerando todos os elementos já inseridos no Sistema GIS.

- Resultados:

Camada da superfície de custo da alternativa elaborado no software GIS.

#### **4.1.11 Encontrar o caminho de menor custo**

- Descrição da etapa:

Utilizar o software GIS para encontrar a solução do problema de seleção do caminho com menor custo da alternativa.

- Atividades:

Executar o algoritmo de busca do software GIS para encontrar a solução do problema de seleção do caminho com menor custo da alternativa.

- Materiais:

Software GIS.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Documentos georreferenciados elaborados nos itens anteriores.

- Detalhamento da Atividade:

Selecionar os pontos de origem e destino da alternativa. Selecionar a camada da superfície de custo da alternativa. Executar o algoritmo de busca do software GIS para encontrar a solução do problema de seleção do caminho com menor custo da alternativa. Criar a camada do caminho com menor custo da alternativa, ajustando seus atributos de cor de modo a facilitar sua visualização considerando todos os elementos já inseridos no Sistema GIS

- Resultados:

Camada do traçado de menor custo referente à alternativa em estudo, elaborada no Sistema GIS.

#### **4.1.12 Elaborar mapa da alternativa com o caminho de menor custo**

- Descrição da etapa:

Elaborar o mapa da alternativa com o caminho de menor custo.

- Atividades:

Elaborar o mapa da alternativa com o caminho de menor custo, inserindo-o no mapa contendo o traçado de todas as alternativas de projeto em estudo.

- Materiais:

Software GIS.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Mapa contendo todas as alternativas de projeto em estudo. Camada do traçado de menor custo referente à alternativa em estudo.

- Detalhamento da Atividade:

Atualizar o mapa contendo o traçado de todas as alternativas de projeto, acrescentando o traçado da alternativa obtido na etapa anterior, ajustando seus atributos de cor, de modo a facilitar sua visualização, ou seja, levando em conta todos os elementos já inseridos no Sistema GIS. Verificar se os traçados calculados não geram conflitos entre si.

- Resultados:

Mapa atualizado elaborado no sistema SIG contendo todas as alternativas de projeto em estudo.

#### **4.1.13 Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo**

- Descrição da etapa:

Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo que foi obtida na etapa “encontrar caminho de menor custo”.

- Atividades:

Calcular os custos (CAPEX e OPEX) da alternativa do caminho de menor custo,

incluindo os seus custos com cruzamentos, travessias ou obras especiais.

- Materiais:

Software GIS. Planilha eletrônica.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Mapa atualizado elaborado no sistema SIG contendo todas as alternativas de projeto em estudo. Planilha com dados de interesse relacionados com a alternativa, contendo os custos unitários atualizados dos materiais e serviços necessários para a implantação da alternativa.

- Detalhamento da Atividade:

Obter o comprimento da alternativa. Identificar e totalizar as interferências, por tipo, que serão objeto de cruzamento, travessias ou obras especiais. Consultar os custos unitários atualizados dos materiais e serviços necessários para a implantação da alternativa. Calcular os custos de CAPEX e OPEX da alternativa do caminho de menor custo, considerando seu comprimento e levando em conta, os custos com cruzamentos, travessias ou obras especiais.

- Resultados:

Planilha com dados de interesse relacionados com a alternativa, contendo os custos unitários atualizados dos materiais e serviços necessários para a implantação da alternativa.

#### **4.1.14 Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas**

- Descrição da etapa:

Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas.

- Atividades:

Classificar o problema e método de solução. Descrever o modelo de custo integrado para resolver o problema da busca do menor custo de projeto. Definir as restrições do

problema e as variáveis de decisão. Documentar o modelo.

- Materiais:

Planilha eletrônica. Editor de texto.

- Documentação e/ou Normas Aplicáveis:

Planilha com dados de interesse relacionados com a alternativa, contendo os custos unitários atualizados dos materiais e serviços necessários para a implantação da alternativa.

- Detalhamento da Atividade:

Classificar o método segundo a natureza do problema e segundo a estratégia de solução. Classificar o problema de acordo com o número de variáveis e com os tipos de restrições. Criar um modelo de custo integrado (função objetivo) para resolver o problema da busca do menor custo de projeto. Definir as restrições internas e externas do problema. Definir as variáveis de decisão. Definir a região viável. Criar um documento contendo a descrição do modelo, das restrições e do método de solução. Criar uma planilha eletrônica com as fórmulas e variáveis desenvolvidas nesta etapa.

- Resultados:

Documento contendo a descrição do modelo, das restrições e do método de solução. Planilha eletrônica com as fórmulas e variáveis desenvolvidas nesta etapa.

#### **4.1.15 Encontrar o empreendimento integrado de menor custo**

- Descrição da etapa:

Utilizar o software de otimização para encontrar a solução do problema de busca pelo empreendimento integrado de menor custo. Dar preferência para software gratuito.

- Atividades:

Programar um código contendo a função objetivo e as restrições em um software de otimização para resolver o problema de busca pelo empreendimento integrado de



menor custo. Executar o algoritmo do software de otimização. É recomendado fazer uso de mais do que um software. Registrar os resultados obtidos após o cálculo de otimização.

- **Materiais:**

Planilha eletrônica (solver) ou outro software que realize o cálculo de otimização de problemas de programação linear e não linear. Editor de Texto. Planilha eletrônica.

- **Documentação e/ou Normas Aplicáveis:**

Documento contendo a descrição do modelo, das restrições e do método de solução. Planilha eletrônica com as fórmulas e variáveis desenvolvidas na etapa anterior. Manual do software de otimização. Literatura especializada.

- **Detalhamento da Atividade:**

Criar um arquivo com o código da função objetivo e as restrições do problema em um software de otimização, compatível com o tipo de problema e o método de solução identificados na etapa anterior. Executar o código do software de otimização para resolver o problema. Registrar os resultados obtidos após sucesso (convergência) do cálculo de otimização.

- **Resultados:**

Arquivo do software de otimização contendo os resultados do problema e os dados de desempenho do cálculo realizado. Documento contendo a descrição do modelo, as restrições, o método de solução e os resultados.

#### **4.1.16 Analisar e discutir os resultados**

- **Descrição da etapa:**

Analisar e validar os resultados obtidos na solução do problema de busca pelo empreendimento integrado de menor custo.

- **Atividades:**

Analisar os resultados obtidos na solução do problema de busca pelo empreendimento integrado de menor custo. Validar os resultados obtidos na solução do problema de busca pelo empreendimento integrado de menor custo, realizando uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos na solução e verificando as folgas de ajuste relacionadas com cada variável da função objetivo e das restrições. Analisar o mapa contendo todas as alternativas de projeto em estudo, visando identificar inconsistências em relação aos números de cruzamentos, travessias ou obras especiais associadas ao empreendimento integrado de menor custo. Fazer mapa final apontando as 3 (três) projetos de menor custo, destacando dentre eles qual é o empreendimento integrado de menor custo.

- **Materiais:**

Planilha eletrônica (solver) ou outro software que realize o cálculo de otimização de problemas de programação linear e não linear. Editor de Texto. Planilha eletrônica. Software GIS.

- **Documentação e/ou Normas Aplicáveis:**

Arquivo do software de otimização contendo os resultados do problema e os dados de desempenho do cálculo realizado. Documento contendo a descrição do modelo, as restrições, o método de solução e os resultados. Mapa atualizado elaborado no sistema SIG contendo todas as alternativas de projeto em estudo.

- **Detalhamento da Atividade:**

Analisar os resultados obtidos na solução do problema de busca pelo empreendimento integrado de menor custo. Validar os resultados obtidos na solução do problema de busca pelo empreendimento integrado de menor custo, realizando uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos na solução e verificando as folgas de ajuste relacionadas com cada variável da função objetivo e das restrições. Analisar o mapa contendo todas as alternativas de projeto em estudo, visando identificar inconsistências em relação aos números de cruzamentos, travessias ou obras especiais associadas ao

empreendimento integrado de menor custo. Fazer mapa final apontando as 3 (três) projetos de menor custo, destacando dentre eles qual é o empreendimento integrado de menor custo.

- Resultados:

Mapa contendo o empreendimento integrado de menor custo, ou seja, a localização da UTE, o traçado do gasoduto (incluindo o Ponto de Entrega) e o traçado da linha de transmissão (incluindo a subestação). Relatório do estudo da definição do empreendimento integrado de menor custo, incluindo um anexo com o detalhamento dos custos, outro apontando as 3 (três) alternativas de menor custo e, por último, um anexo detalhando dos os obstáculos ou interferências que deverão ser vistoriadas in loco para aprofundamento da análise antes de se iniciar o projeto básico do empreendimento. Memorial Descritivo do empreendimento, visando fundamentar o início do processo de licenciamento ambiental do mesmo.

#### **4.2 Vantagens do uso da metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural**

As vantagens ou benefícios que o uso da metodologia pode proporcionar podem ser classificados como tangíveis e intangíveis. As vantagens tangíveis somente podem ser calculadas realizando a comparação entre os custos de um projeto concebido com o uso da metodologia aqui proposta com o projeto concebido considerando o uso de outras metodologias.

Segue abaixo uma relação, não exaustiva, dos ganhos intangíveis:

- Maior interação, sinergia e troca de experiência entre os técnicos de diferentes áreas / formações e os tomadores de decisão dos setores elétricos e do gás natural.
- Maior possibilidade de redução do custo do empreendimento, principalmente com relação aos custos de aquisição de terreno da faixa de servidão, de materiais, de equipamentos e dos serviços de obras especiais.

- Maior possibilidade de aumento da competitividade de projetos de termelétricas a gás natural em leilões da ANEEL.
- Maior possibilidade da redução do impacto ao meio ambiente, incluindo o de supressão de vegetação, por conta da proposição de um empreendimento com dimensões restritas ao mínimo necessário.
- Dispor de uma metodologia padronizada para uso contínuo, que produza resultados obtidos de forma imparcial e que possam ser reproduzíveis.

### **4.3 Discussões e Considerações**

Foi proposto um método que possibilita encontrar a maneira mais econômica de conectar uma termelétrica a gás com suas infraestruturas.

Esta metodologia deve ser seguida por uma equipe formada por técnicos de diferentes áreas / formações e os tomadores de decisão dos setores elétricos e do gás natural, pois foi demonstrado que existem várias situações em que a relação entre os fatores e critérios adotados em cada um dos tipos de projetos pode ter efeitos positivos ou negativos.

Os participantes de um estudo para determinação da localização de uma termelétrica, que faça uso desta metodologia, devem aproveitar a sinergia das experiências obtidas com os casos de sucesso ou fracasso em ambos os setores, para potencializar os efeitos positivos e minimizar os negativos que poderiam surgir, se o empreendimento fosse ser realizado de maneira dessincronizada ou não integrada.

A análise da melhor rota deve ser realizada de forma integrada e levando-se em conta, a relação contendo os critérios mais utilizados nos estudos apontados ao longo da pesquisa, acrescida dos critérios associados às características específicas de infraestrutura e aqueles que devem ser considerados em função das características das localidades e condições de cada país.

Como algumas fontes de dados utilizadas para realizar a caracterização de

interferências e a confecção de mapas podem estar desatualizadas, recomenda-se que seja realizada uma vistoria (terrestre ou aérea) ao longo de toda a faixa do empreendimento para realização de coleta complementar de dados.

O produto final utilizando-se esta metodologia deve ser objeto de análise de risco antes de sua utilização para fins de elaboração de projeto básico ou de submissão para o processo de obtenção de licenciamento ambiental.

## **5 Estudos de Caso e Resultados**

### **5.1 Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso “UTE São Geraldo I (ES)”**

Para comparar a aplicação da metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural com a aplicação da metodologia tradicional foi desenvolvido um estudo de caso relacionado com um caso real de projeto de usina termelétrica. O referido estudo de caso está relacionado com a UTE São Geraldo I, que é um empreendimento de geração termelétrica a gás natural, localizado no estado do Espírito Santo, que concorreu no Leilão de Energia Nova (LEN) da ANEEL de 2015. Esse estado é o nono consumidor de gás natural nacional e possui infraestrutura de gasodutos de transporte e de distribuição.

O estado do Espírito Santo atualmente tem uma população estimada de cerca de 4,02 milhões de habitantes (IBGE, 2019) e é formado por 78 municípios. A Figura 25 ilustra os principais municípios do Espírito Santo.



Figura 25 - Municípios do Estado do Espírito Santo (IBGE, 2019)

O estado do Espírito Santo contém 16 rios de grande porte, ou seja, existem várias regiões onde há disponibilidade de água, principalmente devido os altos índices de precipitação pluviométrica.

Na parte central do Espírito Santo existem regiões com montanhas e serras que dificultam a construção de linhas de transmissão, gasodutos e estradas. Grande parte do estado é coberta pela Mata Atlântica onde existem várias áreas de proteção ambiental.

A seguir será realizado o detalhamento de cada uma das etapas da metodologia.

### 5.1.1 Levantar dados das alternativas

O levantamento de informações sobre os projetos de instalações de gasodutos e de instalações de geração e transmissão de energia elétrica no estado do Espírito Santo considerou tanto os estudos indicativos e determinativos realizados pelo governo federal à época da proposição da UTE São Geraldo I, quanto os estudos mais recentes.

Eram poucos os estudos em 2015. Ainda não havia sido elaborado o “Estudo para Expansão do sistema de transmissão para escoamento do potencial termelétrico dos

estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo - Análise Técnico-Econômica de Alternativas: Análise socioambiental do atendimento elétrico (Relatório R1)", de 20/07/2018. Também não havia sido elaborado o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Somente após a elaboração desses documentos é que passou a existir uma indicação pelo governo federal dos projetos de novas subestações para interligação ao Sistema Interligado Nacional no Espírito Santo, em acréscimo às já existentes, como a subestação SE Vitória 138kV.

A empresa WÄRTSILÄ BRASIL Ltda., empreendedora da UTE São Geraldo I, protocolou em 2010, junto ao Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) do Espírito Santo, o pedido de licenciamento ambiental da UTE. Os critérios da WÄRTSILÄ para escolha do local de implantação do projeto foram, dentre outros, a facilidade de acesso, ausência de vegetação nativa representativa e distância de unidades de conservação e sítios arqueológicos. O projeto da UTE contemplou a construção de um gasoduto interligando a UTE ao gasoduto Cabiúnas-Vitória (GASCAV) e a construção de uma nova LT interligando a UTE até uma nova SE na linha 138kV já existente e conectada à SE Vitória.

A figura 26 exibe a localização da UTE São Geraldo I. Já a figura 27 exibe detalhes do projeto da WÄRTSILÄ para a interligação da usina ao GASCAV (da empresa TAG) e à SE que será construída na linha de transmissão 138 kV já existente, da empresa ESCELSA / EDP.

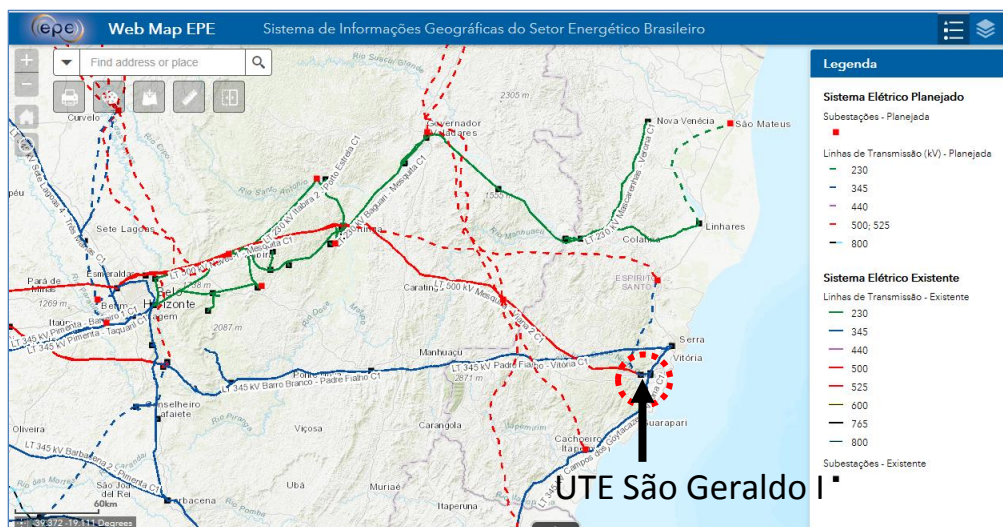


Figura 26 - Infraestrutura de transmissão de energia elétrica no ES (EPE, 2019)



Figura 27 – Projeto de Interligação da UTE São Geraldo I – RIMA / INEA (WÄRTSILÄ, 2019)

O levantamento das alternativas para aplicação da metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas da termelétrica não irá se limitar às opções de instalações de origem e destino previstas no projeto da WÄRTSILÄ.

Desta forma, a estratégia da escolha das alternativas deve considerar, além das informações disponíveis antes de 2015, os estudos atualmente disponíveis. Realizar a comparação desta maneira irá possibilitar avaliar se as alternativas de traçado propostas pela WÄRTSILÄ em 2015 realmente representavam a melhor solução de projeto de traçado.

Também permitirá avaliar se o projeto do traçado das infraestruturas da UTE São Geraldo I estaria aderente com os estudos de planejamento elaborados atualmente pelas instituições competentes e, desta forma, averiguar se esse projeto ainda pode ser considerado competitivo.

Para tal foram escolhidos 3 conjuntos de opções: a) a alternativa de projeto da WÄRTSILÄ; b) um conjunto de alternativas variantes de projeto da WÄRTSILÄ; e c) um conjunto de alternativas distinto do projeto da WÄRTSILÄ.

A alternativa de projeto da WÄRTSILÄ considerou que o destino da energia elétrica gerada será a subestação seccionadora (**SE 1**), ao qual será interligada a linha de transmissão da UTE São Geraldo I. Esta subestação foi prevista para ser construída na



localização de coordenada -20.438830 S, -40.458701 O (20°26'19.8"S 40°27'31.3"W). O ponto de entrega (**PTE 1**) do GASCAV a partir no qual será construído o gasoduto para suprimento da UTE foi previsto na localização de coordenada -20.443271 S, -40.486736 O (20°26'35.8"S 40°29'12.3"W). A UTE São Geraldo I, doravante **UTE 1**, foi prevista pela WÄRTSILÄ para ser construída na localização de coordenadas -20.433176 S, -40.430379 O (20°25'59.4"S 40°25'49.4"W).

Com relação à opção que contém o conjunto de alternativas variantes de projeto da WÄRTSILÄ tem-se as seguintes instalações e suas coordenadas: a) **PTE 2**: -20.447069 S, -40.484842 O (20°26'49.45"S, 40°29'5.43"W); b) **PTE 3**: -20.451431 S, -40.483903 W (20°27'5.15"S, 40°29'2.05"W); c) **PTE 4**: -20.455119 S, -40.484403 W (20°27'18.43"S, 40°29'3.85"W); d) **UTE 2**: 20.442925 S, -40.461847 W (20°26'34.53"S, 40°27'42.65"W); e e) **UTE 3**: -20.438394 S, -40.461514 W (20°26'18.22"S, 40°27'41.45"W). Nesta opção se considerou que o destino da energia elétrica gerada será a subestação (**SE 1**).

O critério de escolha da localização dos pontos de entrega PTE 2, PTE 3 e PTE 4 foi o de situá-los a pelo menos 300 metros da margem direita córrego que cruza a estrada ES-476, em locais com mais altitude para se evitar o risco de inundação. A localização do PTE 1, que consta no projeto da WÄRTSILÄ, está situada muito próximo da margem esquerda do referido córrego.

Com relação aos locais selecionados para as UTEs 2 e 3, a decisão de situá-los próximo do rio Jucu e da rodovia BR-101, consoante com os critérios de acessibilidade e de disponibilidade de recursos.

A opção que contém o conjunto de alternativas distinto do projeto da WÄRTSILÄ contempla as seguintes instalações e suas coordenadas: a) **SE 2**: -20.383531 S, -40.506306 W (20°23'0.71"S, 40°30'22.70"W); b) **UTE 4**: -20.391644 S, -40.461433 W (20°23'29.92"S, 40°27'41.16"W); c) **UTE 5**: -20.393517 S, -40.462617 W (20°23'36.66"S, 40°27'45.42"W); d) **PTE 5**: -20.388561 S, -40.480061 W (20°23'18.82"S, 40°28'48.22"W); e e) **PTE 6**: -20.388561 S, -40.480061 W (20°23'27.06"S, 40°28'53.15"W).

O critério de escolha da localização dos pontos de entrega PTE 5 e PTE 6 foi o de situá-los em outra área do GASCAV, próximo de um ponto de entrega existente (PTE Viana). Com relação aos locais selecionados para as UTEs 4 e 5, o critério foi situá-los em uma outra área da rodovia BR-101, denominada Parque Industrial e situada ao lado da localidade Bom Pastor.

Por último, o critério de escolha da SE 1 está aderente com os recentes estudos de planejamento elaborados pelas instituições competentes, que indicam a SE Viana 2, como uma das alternativas de destino da energia elétrica gerada a partir de usinas termelétricas no estado no Espírito Santo.

A variedade de opções deste estudo de caso, analisada do ponto de vista da tomada de decisão, representa para o empreendedor, um portfólio de projetos.

### 5.1.2 Delimitar área de estudo

As figuras 28 a 30 exibem as áreas de estudo delimitadas para este estudo de caso, contemplando as subestações, os pontos de entrega, as UTE candidatas e os corredores das alternativas. As linhas pontilhadas preta e azul indicam, respectivamente, o gasoduto e a linha de transmissão do projeto da WÄRTSILÄ.

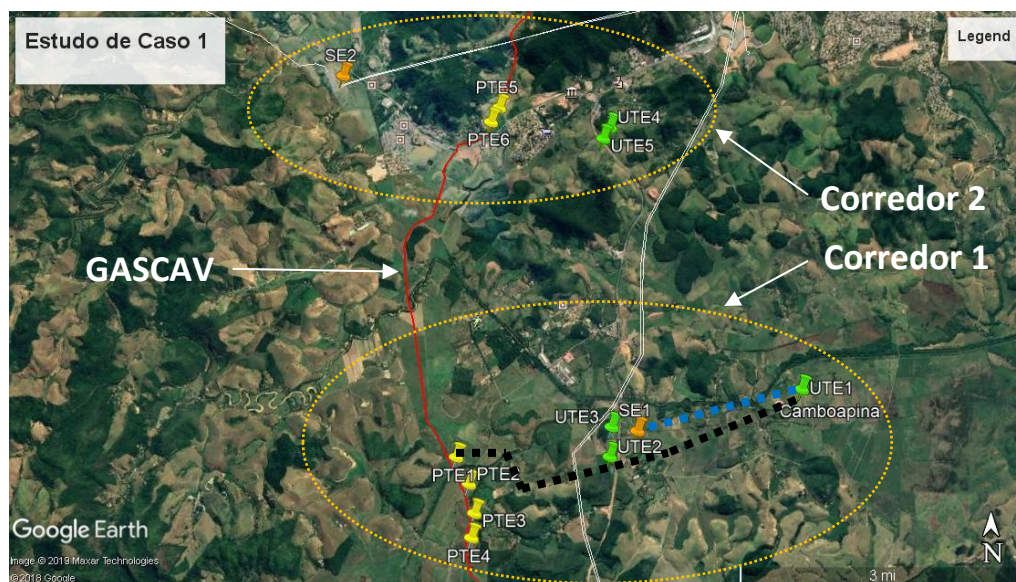


Figura 28 – Mapa elaborado pelo autor no Google Earth com os 2 corredores em estudo

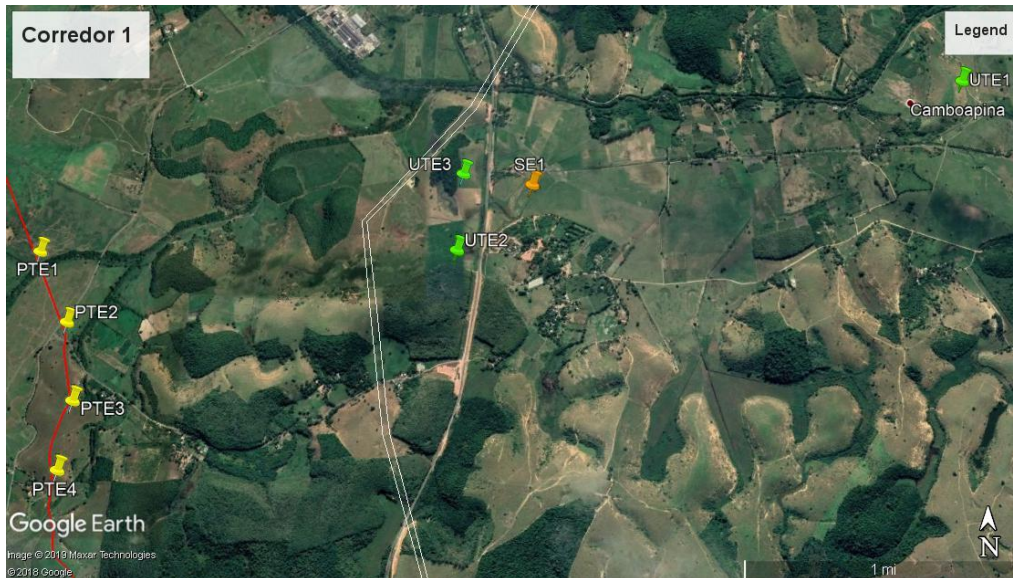


Figura 29 – Mapa elaborado pelo autor no Google Earth do Corredor 1

A figura 30 exibe a localização do parque industrial situado a sudoeste de Viana.

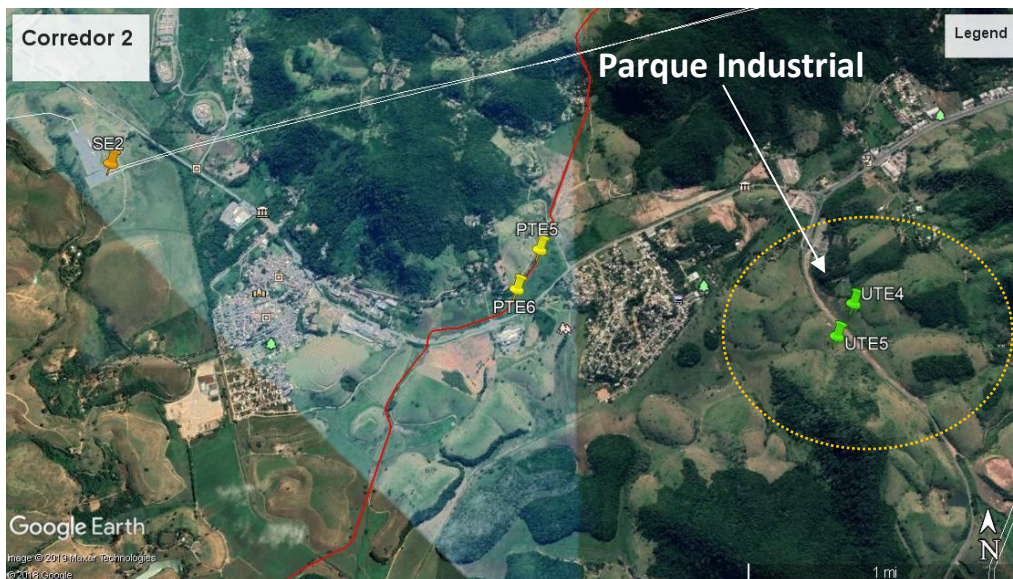


Figura 30 – Mapa elaborado pelo autor no Google Earth do Corredor 2

### 5.1.3 Definir os métodos, fatores e critérios

O método selecionado para solução do problema do caminho de menor custo, tanto para o traçado da linha de transmissão, quanto para o traçado do gasoduto será o método da Análise Hierárquica de Processos – AHP, cujo detalhamento se encontra no Anexo 3.

Após a análise dos fatores e critérios que foram mais utilizados no levantamento da experiência internacional (tabelas 2, 3 e 4 do capítulo 4), foram definidos pelo autor os níveis hierárquicos da tomada de decisão, os fatores e os critérios a serem considerados na resolução do problema do caminho de menor custo, conforme consta na tabela 5.

Tabela 5 - Níveis hierárquicos, fatores e critérios selecionados

Nível A	Nível B	Nível C
Traçado da Faixa	Preocupação Social (B1)	Densidade Populacional (C1)
	Meio Físico (B2)	Declividade (C2)
		Geologia (C3)
	Meio Biótico (B3)	Florestas / Reservas (C4)
		Rios / Lagoas (C5)
	Aspectos Técnicos (B4)	Estradas (C6)

No método AHP a importância relativa (I.R.) entre os critérios é definida em pares. As médias geométricas (M.G.) dos valores das importâncias são utilizadas no cálculo das prioridades relativas (P.R.).

A tabela 6 exhibe tais cálculos e a tabela 7 os resultados.

Tabela 6 – Memória de cálculo da prioridade relativa geral dos critérios

I.R.	B1	B2	B3	B4	M.G	P.R		
<b>B1</b>	1.00	0.11	0.11	0.25	<b>B1</b>	0.24	<b>B1</b>	0.0437
<b>B2</b>	9.00	1.00	0.20	0.50	<b>B2</b>	0.97	<b>B2</b>	0.1808
<b>B3</b>	9.00	5.00	1.00	0.50	<b>B3</b>	2.18	<b>B3</b>	0.4042
<b>B4</b>	4.00	2.00	2.00	1.00	<b>B4</b>	2.00	<b>B4</b>	0.3712
	<b>B2</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>		<b>M.G</b>	<b>P.R</b>		
	<b>C2</b>	1.00	0.50	<b>C2</b>	0.71	<b>C2</b>	0.3333	
	<b>C3</b>	2.00	1.00	<b>C3</b>	1.41	<b>C3</b>	0.6667	
	<b>B3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>		<b>M.G</b>	<b>P.R</b>		
	<b>C4</b>	1.00	0.33	<b>C4</b>	0.58	<b>C4</b>	0.2500	
	<b>C5</b>	3.00	1.00	<b>C5</b>	1.73	<b>C5</b>	0.7500	

Tabela 7 - Resultados (pesos) do cálculo da prioridade relativa geral dos critérios

<b>Critério</b>	<b>Prioridade Relativa Geral (Peso)</b>
Densidade Populacional (C1)	0.0437
Declividade (C2)	0.0603
Geologia (C3)	0.1205
Florestas / Reservas (C4)	0.1011
Rios / Lagoas (C5)	0.3032
Estradas (C6)	0.3712

O método para a solução do problema de programação linear relativo à minimização do custo da solução integrada será o SIMPLEX (Solver/Excel 365 ou CPLEX/GAMS 24.4.3). As variáveis de custo que irão fazer parte da função objetivo deste problema serão as variáveis que determinam o custo CAPEX, dentre elas o custo de investimento com a aquisição de material / equipamentos e o custo com a contratação de serviços de obras especiais.

#### **5.1.4 Definir os materiais**

O método de busca que será utilizado na solução do problema de seleção do caminho com menor custo será o método de Dijkstra. O software GIS escolhido para ser usado nesta tese foi o QGIS, por ser um software gratuito e por utilizar o algoritmo de Dijkstra.

#### **5.1.5 Coletar Dados**

Os seguintes valores (corrigidos considerando o índice IGP-M - referência: maio de 2019) de custo de materiais e equipamentos foram levantados para utilização neste estudo:

- Tubo de aço carbono grau API 5L X65 com diâmetro de 16": R\$ 1,816.87 / metro [TCU, 2008];
- Sistema de Medição de gás (2 conjuntos): R\$ 1,240,609.13 cada [ANP, 2015];
- Válvula de Bloqueio 14" (1 válvula a cada 30km): R\$ 93,083.73 cada [TCU, 2008];
- Sistema de Proteção Catódica do gasoduto: R\$ 245,318.19 [ANP, 2015];
- Sistema de Supervisão e Controle (SCADA) e Sistema de Detecção de Vazamento: R\$ 2,439,163.72 [ANP, 2015];
- Lançador ou Recebedor de *pig* (2 conjuntos): R\$ 2,495,236.45 [ANP, 2015];
- Cruzamento de duto sobre riachos: R\$ 1,113,604.40 cada [ANP, 2015];
- Cruzamento de duto sobre rodovias ou ferrovia: R\$ 338,539.11 cada [ANP, 2015];



- Tubo de polietileno de alta densidade, PEAD, PE-80, 315 mm x 28,7 mm, para rede de água (par): R\$ 1,997. 82 [CAIXA, 2013]
- Cabo condutor da LT (230 kV): R\$ 565,776.84 / km [ELETROBRÁS, 2005];
- Infraestruturas das Torres de Transmissão: R\$ 326,772.72 / km [ELETROBRÁS, 2005];

Os demais dados coletados foram:

- Densidade Populacional (C1) – Dados da população das cidades IBGE;
- Declividade (C2) – Modelo de Elevação Digital do Brasil (TOPODATA/INPE);
- Geologia (C3) – Mapa geológico do Estado do Espírito Santo da CPRM (2018);
- Florestas Nativas / Reservas (C4): Relação de Unidades de Conservação Federais e Estaduais do MMA;
- Rios / Lagoas (C5), Estradas (C6): Base Cartográfica Integrada do Brasil, incluindo hidrografia, divisão territorial e sistema viário (IBGE);

#### **5.1.6 Selecionar, tratar e tabular os dados**

Os dados coletados selecionados, tratados e tabulados foram:

- Densidade Populacional (C1) – A densidade foi estimada de acordo com o número de edificações. A única cidade na região é Viana com 76.954 pessoas.
- Declividade (C2) – Modelo de Elevação Digital do Brasil (TOPODATA/INPE);
- Geologia (C3) – Não tem registro de atividade de mineração da região em estudo, conforme o Mapa geológico do Estado do Espírito Santo da CPRM (2018);
- Florestas Nativas / Reservas (C4): Após consulta da relação de Unidades de Conservação Federais e Estaduais do MMA, observou-se que não há esse tipo de restrição nos corredores em estudo. Apesar de não existirem tais Unidades de Conservação, observou-se a presença de algumas áreas com vegetação nativa.
- Rios / Lagoas (C5), Estradas e Ferrovias (C6): Base Cartográfica Integrada do Brasil, incluindo hidrografia, divisão territorial e sistema viário (IBGE).

### 5.1.7 Realizar o pré-processamento dos dados

Após o pré-processamento dos dados georreferenciados, foram elaborados mapas, conforme exibido nas figuras 31 e 32, com todas as camadas elaboradas nos itens anteriores. Neste mapa, os significados das cores das linhas são: a) azul = rio; b) roxo = estrada; c) verde = gasoduto (GASCAV); d) laranja = ferrovia. Já os significados das cores dos círculos são: a) cinza = cidade; b) verde = UTE; c) rosa = ponto de entrega; e d) vermelho = subestação. A imagem de fundo é o perfil altimétrico de elevação.

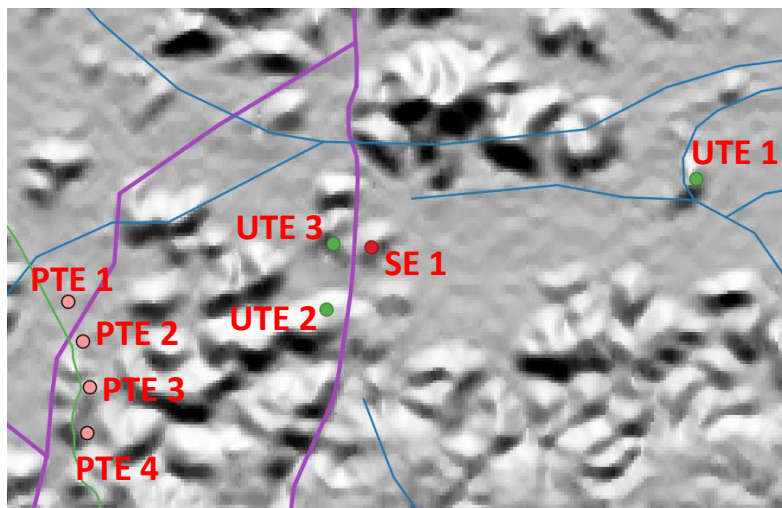


Figura 31 – Mapa elaborado pelo autor no QGIS do Corredor 1

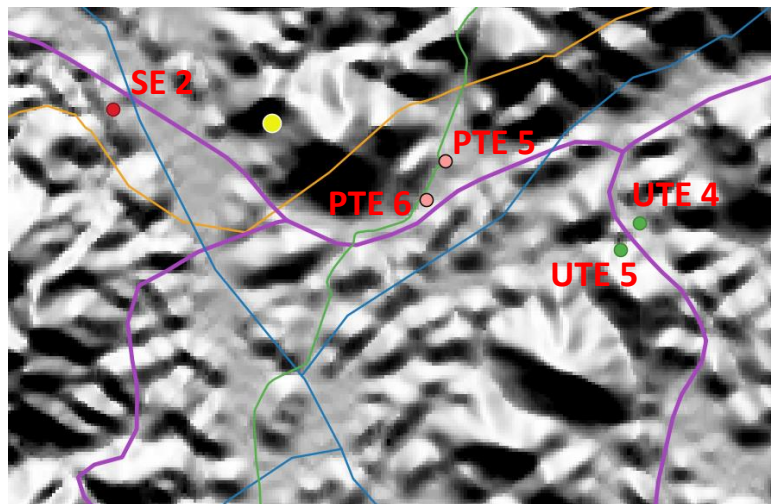


Figura 32 – Mapa elaborado pelo autor no QGIS do Corredor 2

### 5.1.8 Realizar o processamento de dados

Os atributos de exibição das camadas densidade populacional (C1), declividade (C2), rios / lagoas (C5) e estradas (C6) foram ajustados (normalizados) em função de seu valor de importância, com base em um escala de 5 níveis de intensidade, a saber: a) valor 1 = baixo; b) valor 2 = moderado; c) valor 3 = forte; d) valor 4 = muito forte; e e) valor 5 = extremamente forte. Os atributos de cor dessas camadas foram ajustados de tal modo que valores baixos são exibidos com tom claro e valores altos com tons mais escuros.

### 5.1.9 Analisar os dados

Foram analisados os dados coletados visando identificar oportunidades e restrições. As camadas em análise referentes aos critérios de densidade populacional (C1), declividade (C2), rios / lagoas (C5) e estradas / ferrovias (C6) dos corredores 1 e 2 estão representados, respectivamente, nas figuras 33 e 34.

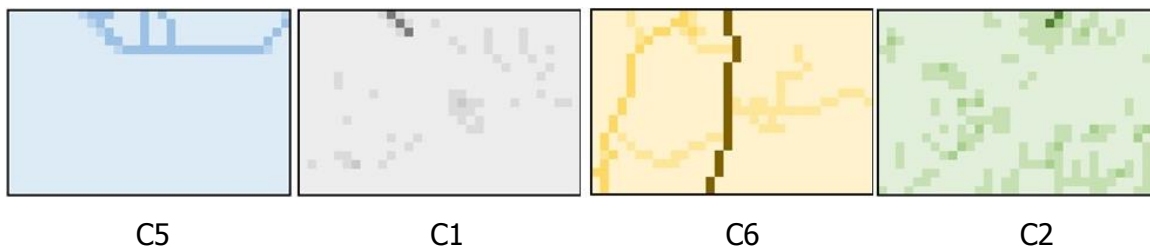


Figura 33 – Camadas classificadas e processadas do Corredor 1



Figura 34 – Camadas classificadas e processadas do Corredor 2

### 5.1.10 Elaborar modelo de superfície de custo da alternativa

Foi desenvolvida a fórmula do modelo matemático que combina os valores e os pesos



dos fatores e critérios das camadas em uma única superfície, conforme pode ser observado na equação 1. Este modelo é aplicável para ambos os corredores em análise. Cada pixel da superfície de custo combina o valor de cada camada classificada/processada, multiplicado pelo seu respectivo peso em relação ao computo total.

As camadas da superfície de custo das alternativas dos corredores 1 e 2 foram representadas nas figuras 35 e 36, com tons de laranja variando entre o amarelo (menor custo) e o vermelho (maior custo).

$$\text{Custo} = 0.0437 * C1 + 0.0603 * C2 + 0.1205 * C3 + 0.1011 * C4 + 0.3032 * C5 + 0.3712 * C6 \quad (1)$$

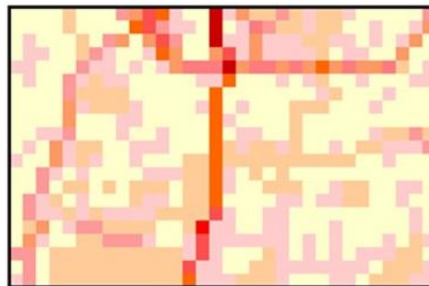


Figura 35 – Mapa do modelo da superfície de custo do Corredor 1

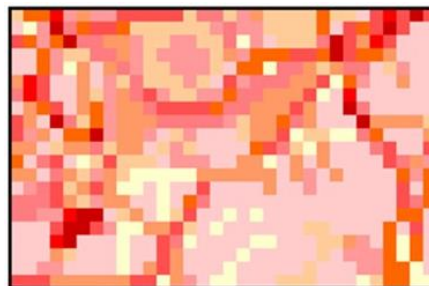


Figura 36 – Mapa do modelo da superfície de custo do Corredor 2

Uma rápida visualização dos dois modelos de superfície gerados permite inferir que o corredor 2 possui mais obstáculos para passagem de linhas de transmissão e gasodutos que o corredor 1. Entretanto, somente após identificação dos melhores traçados de cada par origem-destino de cada alternativa é que será possível afirmar qual corredor é representa a melhor solução de roteamento.

### 5.1.11 Encontrar o caminho de menor custo

Foram selecionados os pontos de origem e destino de cada alternativa e executado o algoritmo de busca do software GIS, para encontrar a solução do problema de seleção do caminho com menor custo da alternativa. Em seguida foi criada uma camada do caminho com menor custo da alternativa, ajustando seus atributos de cor, de modo a facilitar sua visualização considerando todos os elementos já inseridos no Sistema GIS.

### 5.1.12 Elaborar mapa da alternativa com o caminho de menor custo

O mapa contendo o traçado de todas as alternativas de projeto de cada corredor pode ser visualizado nas figuras 37 e 38.

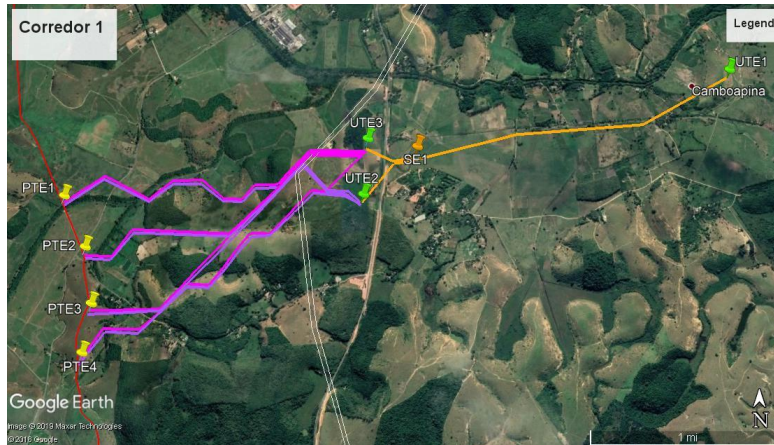


Figura 37 – Mapa traçado de todas as alternativas de projeto do corredor 1



Figura 38 – Mapa traçado de todas as alternativas de projeto do corredor 2

### 5.1.13 Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo

Foi realizado o cálculo do custo de cada alternativa de linha de transmissão e de gasoduto.

Primeiramente foram obtidos os comprimentos da alternativa e totalizadas as interferências, conforme exibido nas tabelas 8 e 14. Com base nos custos unitários, atualizados, dos materiais e serviços necessários para a implantação da alternativa, foram calculados os principais custos de CAPEX da alternativa do caminho de menor custo, ou seja, foram considerados os custos estimados para aquisição dos materiais e de serviços para a implantação de cada alternativa. Tais dados e cálculos estão exibidos nas tabelas 9 a 19.

Tabela 8 - Extensão das infraestruturas das alternativas do corredor 2

<u>EXTENSÃO (km)</u>		
	UTE 4	UTE 5
PTE 5:	2,61	2,41
PTE 6:	2,80	2,52
SE 2:	5,40	6,11

Tabela 9 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 2 com rios

#### CRUZAMENTO DE GASODUTO X RIO (QUANTIDADE)

	UTE 4	UTE 5
PTE 5:	1	1
PTE 6:	3	3
SE 2:	6	1

Tabela 10 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 2 com LTs

#### CRUZAMENTO DE GASODUTO X LINHA DE TRANSMISSÃO (QUANTIDADE)

	UTE 4	UTE 5
PTE 5:	0	0
PTE 6:	0	0
SE 2:	0	0

Tabela 11 - Cruzamentos dos gasodutos do corredor 2 com estradas/ferrovias

**CRUZAMENTO DE GASODUTO X ESTRADAS/FERROVIA (QUANTIDADE)**

	UTE 4	UTE 5
PTE 5:	2	1
PTE 6:	2	1

Tabela 12 - Custo simplificado das alternativas de gasodutos do corredor 2

**CUSTO SIMPLIFICADO DO GASODUTO (MILHÕES DE R\$)**

	UTE 4	UTE 5
PTE 5:	6,53	5,83
PTE 6:	9,11	8,26

Tabela 13 - Custo simplificado das alternativas das linhas de transmissão do corredor 2

**CUSTO SIMPLIFICADO DA LINHA DE TRANSMISSÃO (MILHÕES DE R\$)**

	UTE 4	UTE 5
SE 2:	4,82	5,45

Tabela 14 - Extensão das infraestruturas das alternativas do corredor 1

**EXTENSÃO (km)**

	UTE 1	UTE 2	UTE 3
PTE 1:	3,00	3,55	3,52
PTE 2:	6,69	3,18	3,30
PTE 3:	6,65	3,00	3,12
PTE 4:	8,42	3,32	3,63
SE 1:	8,00	0,67	0,38

Tabela 15 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 1 com rios

**CRUZAMENTO DE GASODUTO X RIO (QUANTIDADE)**

	UTE 1	UTE 2	UTE 3
PTE 1:	4	1	1
PTE 2:	4	1	1
PTE 3:	4	1	1
PTE 4:	4	1	1
SE 1:	3	0	0

Tabela 16 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas do corredor 1 com LTs

**CRUZAMENTO DE GASODUTO X LINHA DE TRANSMISSÃO**

**(QUANTIDADE)**

	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>PTE 3:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>PTE 4:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabela 17 - Cruzamentos dos gasodutos do corredor 2 com estradas/ferrovias

**CRUZAMENTO DE GASODUTO X RODOVIA/FERROVIA (QUANTIDADE)**

	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>PTE 3:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>PTE 4:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>SE 1:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabela 18 - Custo simplificado das alternativas de gasodutos do corredor 1

**CUSTO SIMPLIFICADO DO GASODUTO (MILHÕES DE R\$)**

	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>10,92</b>	<b>7,90</b>	<b>7,85</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>16,61</b>	<b>6,89</b>	<b>7,11</b>
<b>PTE 3:</b>	<b>16,88</b>	<b>6,90</b>	<b>7,12</b>
<b>PTE 4:</b>	<b>20,09</b>	<b>7,48</b>	<b>8,05</b>

Tabela 19 - Custo simplificado das alternativas das linhas de transmissão do corredor 1

**CUSTO SIMPLIFICADO DA LINHA DE TRANSMISSÃO (MILHÕES DE R\$)**

	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>
<b>SE 1:</b>	<b>7,14</b>	<b>0,60</b>	<b>0,34</b>

### 5.1.14 Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas

O problema envolve apenas equações lineares, inclusive as equações das restrições. Esse tipo de problema já foi classificado como um problema típico de rede de transporte e está sendo ilustrado na Figura 39 (DANTZIG, 1963) (PIZZOLATO & GANDOLPHO, 2013).

A função objetivo considera o somatório dos custos de todas as alternativas possíveis. As restrições internas do problema estão relacionadas com o balanço de cada nó. As variáveis de decisão serão os coeficientes que irão definir se o fluxo de transporte seguira, ou não, através de cada arco, ou seja, se assumirão os valores 0 ou 1. A estratégia de solução é a utilização no método Simplex, ideal para utilização de problemas de programação linear.

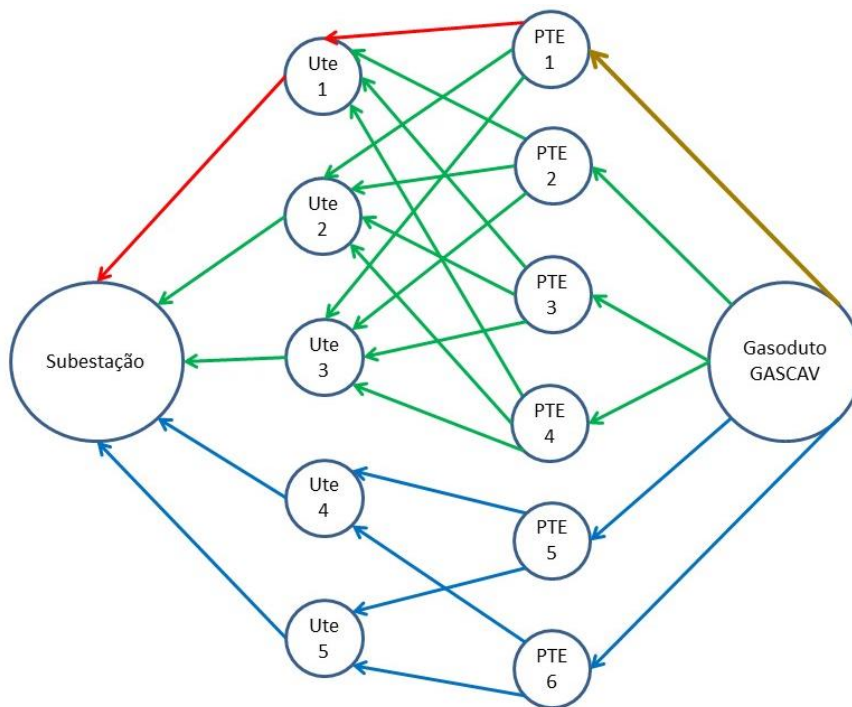


Figura 39 – Diagrama de arcos e nós do problema de transporte

Considerando o levantamento de custos realizado na etapa anterior, a seguinte função objetivo foi desenvolvida:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & 6.42X_{1,2} + 6.42X_{1,3} + 6.42X_{1,4} + 6.42X_{1,5} + 6.42X_{1,6} + 6.42X_{1,7} + 10.92X_{2,8} + 7.90X_{2,9} \\ & + 7.85X_{2,10} + 16.61X_{3,8} + 6.89X_{3,9} + 7.11X_{3,10} + 16.88X_{4,8} + 6.90X_{4,9} + 7.12X_{4,10} + 20.09X_{5,8} + \\ & + 7.48X_{5,9} + 8.05X_{5,10} + 6.53X_{6,11} + 5.83X_{6,12} + 9.11X_{7,11} + 8.26X_{7,12} + 7.14X_{8,13} + 0.6X_{9,13} + \\ & + 0.34X_{10,13} + 4.82X_{11,13} + 5.45X_{12,13} \end{aligned}$$

Sujeito às seguintes restrições, conforme exibido na tabela 20:

Tabela 20 – Equações das restrições do problema do estudo de caso 1

$-X_{1.2} - X_{1.3} - X_{1.4} - X_{1.5} - X_{1.6} - X_{1.7} = -1$	$+X_{2.8} + X_{3.8} + X_{4.8} + X_{5.8} - X_{8.13} = 0$
$+X_{1.2} - X_{2.8} - X_{2.9} - X_{2.10} = 0$	$+X_{2.8} + X_{3.8} + X_{4.8} + X_{5.8} - X_{9.13} = 0$
$+X_{1.3} - X_{3.8} - X_{3.9} - X_{3.10} = 0$	$+X_{2.8} + X_{3.8} + X_{4.8} + X_{5.8} - X_{10.13} = 0$
$+X_{1.4} - X_{4.8} - X_{4.9} - X_{4.10} = 0$	$+X_{6.11} + X_{7.11} - X_{11.13} = 0$
$+X_{1.5} - X_{5.8} - X_{5.9} - X_{5.10} = 0$	$+X_{6.12} + X_{7.12} - X_{12.13} = 0$
$+X_{1.6} - X_{6.11} - X_{6.12} = 0$	$+X_{8.13} + X_{9.13} + X_{10.13} + X_{11.13} + X_{12.13} = +1$
$+X_{1.7} - X_{7.11} - X_{7.12} = 0$	$X_{i,j} \geq 0$

### 5.1.15 Encontrar o empreendimento integrado de menor custo

A Figura 40 exibe a função objetivo (célula A10) e as restrições do problema (células C4:O4) que foram configuradas no Solver do MS-Excel do pacote Office 365, que é compatível com o tipo de problema (Programação Linear) e o método de solução (Simplex) previamente definidos.

The screenshot shows the Microsoft Excel Solver interface. The Solver Parameters dialog box is open, with the following settings:

- Set Objective:** \$A\$10
- To:** Max Of (indicated by a downward arrow)
- By Changing Variable Variables:** \$C\$7:\$AC\$7
- Subject to the Constraints:** \$C\$4:\$O\$4
- Make Variable Non-Negative:** Checked
- Solving Method:** Simplex LP

The spreadsheet shows the following data:

Nº:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
GN													
PTE.1													
PTE.2													
PTE.3													
PTE.4													
PTE.5													
PTE.6													
UTE.1													
UTE.2													
UTE.3													
UTE.4													
UTE.5													
SE													
LSH:	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RSH:	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

The objective function in cell A10 is:  $=SUMPRODUCT(\$C\$7:\$AC\$7,\$C\$10:\$AC\$10)$

The constraint cells (C4:O4) contain the following values:  $=SUMIF(\$C\$9:\$AC\$9,0,2,\$C\$7:\$AC\$7)-SUMIF(\$C\$8:\$AC\$8,0,2,\$C\$7:\$AC\$7)$

The Solver Parameters dialog box shows the following settings:

- Set Objective:** \$A\$10
- To:** Max Of (indicated by a downward arrow)
- By Changing Variable Variables:** \$C\$7:\$AC\$7
- Subject to the Constraints:** \$C\$4:\$O\$4
- Make Variable Non-Negative:** Checked
- Solving Method:** Simplex LP

Figura 40 – Função objetivo e restrições configuradas no Solver do Excel – Caso 1 (ES)

No solver do Microsoft Excel (versão 16.0) o cálculo foi executado em 0,094s, utilizando o método Simplex LP. O hardware utilizado foi um PC com processador Intel i3



de 2.30GHz de *clock*, memória RAM de 6GB e Sistema Operacional Windows 10 (64-bit). A análise de sensibilidade dos resultados obtidos na solução encontrada pelo Solver do Excel indica que existe folga de ajuste em cada variável da função objetivo e das restrições.

O problema também foi resolvido utilizando software General Algebraic Modeling System (GAMS) tendo sido encontrado os mesmos resultados obtidos por meio do Solver do Excel, conforme pode ser observado no ANEXO 1.

### 5.1.16 Analisar e discutir os resultados

A análise de sensibilidade dos resultados obtidos na solução indica que existe folga de ajuste, relacionada com cada variável da função objetivo e das restrições. Não foram identificadas inconsistências em relação aos números de cruzamentos, travessias ou obras especiais associadas ao empreendimento integrado de menor custo.

A solução de menor custo obtida foi de R\$ 13.87 milhões e está situada no corredor 1. A localização otimizada da termelétrica e de suas infraestruturas é ilustrada na figura 41.

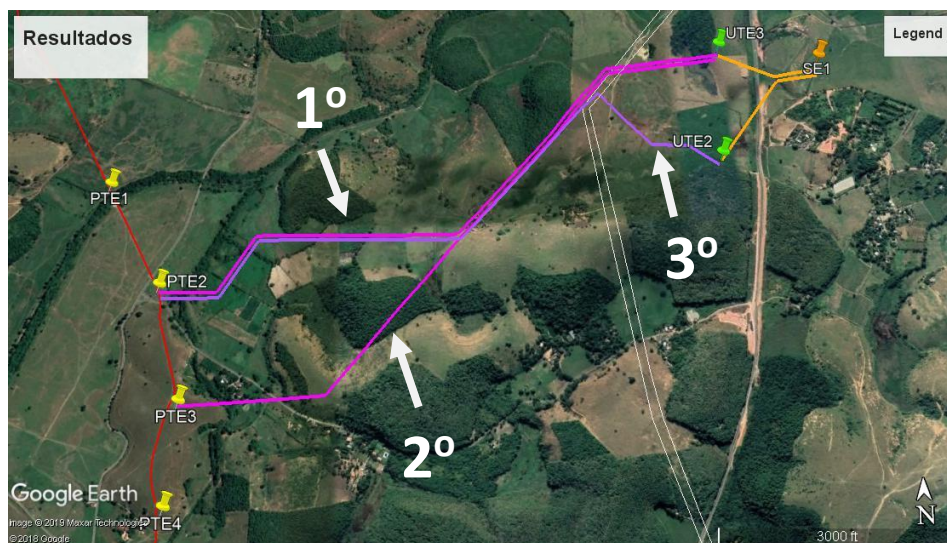


Figura 41 - Mapa contendo os três empreendimentos integrados de menor custo

O detalhamento do custo contempla: R\$ 6.42 milhões para os equipamentos de gasodutos (lançador/recebedor de *pig*, Sistemas de Supervisão e Controle, Proteção Catódica e de Detecção de Vazamentos) a serem instalados por conta da interligação com



o gasoduto GASCAV; R\$ 7.11 milhões para as principais despesas de construção, aquisição de equipamentos e materiais do gasoduto a ser construído desde o PTE2 até a UTE3; e R\$ 0.34 milhões para a aquisição de equipamentos e materiais da linha de transmissão a ser instalada desde a UTE3 até a SE1.

Além da melhor alternativa, também foram exibidas a segunda melhor alternativa (UTE3 suprida a partir do PTE3 ao custo de R\$ 13.88 milhões) e a terceira melhor alternativa (UTE2 suprida pelo PTE2 ao custo de R\$ 13.91 milhões). Ambas alternativas também estão situadas no corredor 1. A alternativa de menor custo no corredor 2 UTE3 suprida a partir do PTE3 ao custo de R\$ 17.07 milhões, ou seja, 23,07% a mais que a melhor solução encontrada. Convém ressaltar que o custo estimado da alternativa do projeto da WÄRTSILÄ foi de R\$ 24.48 milhões (UTE1 suprida a partir do PTE1), ou seja, 76,5% a mais que a solução encontrada por meio da metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural.

Algumas considerações sobre os resultados obtidos neste estudo de caso são pertinentes.

Durante o levantamento das interferências das infraestruturas do projeto da WÄRTSILÄ, observou-se que no EIA-RIMA do empreendimento foi definido um traçado da linha de transmissão da termelétrica cruzando por cima do gasoduto que supre gás para a própria usina. Esse tipo de inconsistência é típico de um processo de seleção de traçado de forma manual. Os traçados das linhas de transmissão calculados através da metodologia de avaliação integrada não cruzaram os gasodutos em estudo, dado que foi utilizado um algoritmo de busca do caminho de menor custo, que considerou notas e pesos para vários critérios, dentre eles, o cruzamento de estradas, ferrovias, LTS e gasodutos.

Foi observada uma diferença de precisão das informações relacionadas com os rios, riachos e lagoas. Neste ponto, as informações disponíveis nas bases do IBGE e da EPE não eram coincidentes. A solução adotada, em alguns casos, foi utilizar o recurso do Google Street View para percorrer o traçado (geralmente através de uma estrada ou rodovia) e verificar a existência, ou não, do rio, riacho ou lago e fazer os ajustes necessários.

Com relação ao impacto ao meio ambiente, os traçados das infraestruturas do projeto da WÄRTSILÄ, segundo o EIA-RIMA, totalizavam cerca de 11km. Já o somatório do gasoduto e da linha de transmissão obtido com a metodologia de avaliação integrada totaliza 3,68km. Ou seja, fica evidente que, os pesos e fatores adotados nesta metodologia possibilitaram uma sensível redução de supressão de vegetação, redução de impacto ao meio ambiente durante a fase de construção, dentre outros. A redução de comprimento também favoreceu para que o custo de investimento para aquisição de materiais e equipamentos fosse menor.

Por estas razões, entende-se que o projeto da UTE São Geraldo I, como proposto pela WÄRTSILÄ, incluindo os traçados de suas infraestruturas, não pode ser considerado um projeto competitivo, conforme demonstrado em comparação as outras opções possíveis, pela aplicação da metodologia integrada proposta por esta tese.

## **5.2 Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso “UTE Vale do Contestado (SC)”**

Um novo estudo de caso, para avaliação da metodologia integrada proposta por esta tese foi realizado a partir de um estudo de caso no estado de Santa Catarina. Diferentemente do proposto na época da realização deste estudo de caso, na ocasião do exame de qualificação, hoje há disponível um Plano Indicador de Dutos que cita esse estado como uma das possíveis alternativas a serem estudadas pela EPE. Esse estado, apesar de ser o sétimo consumidor de energia elétrica nacional e possuir infraestrutura de gasodutos de transporte e de distribuição, apresenta consumo nulo de gás natural para o segmento termelétrico, por isso foi escolhido.

O estado de Santa Catarina possui atualmente uma população estimada de cerca de 7,16 milhões de habitantes (IBGE, 2019). O estado de Santa Catarina é formado por 295 municípios dispostos em 6 mesorregiões, a saber: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí. Lages é o maior município de Santa Catarina. A Figura 41 ilustra os 15 principais municípios de Santa Catarina e destaca, ordenados pelo número de habitantes, os 10 maiores municípios.

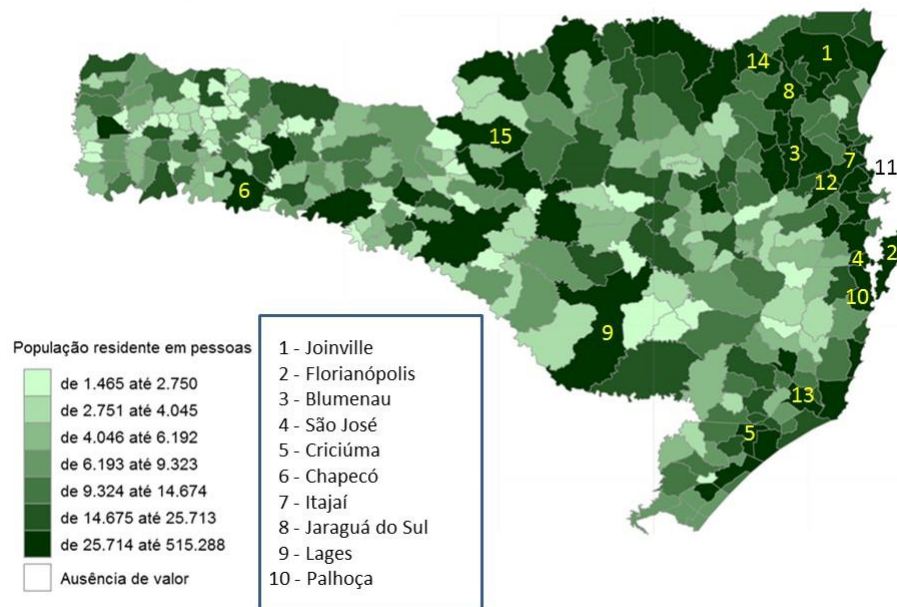


Figura 42 - Municípios do Estado de Santa Catarina (modificado a partir do IBGE)

Trata-se de um estado com relevo acidentado que contém 144 rios, ou seja, existem várias regiões onde existe disponibilidade de água. Em Santa Catarina existem regiões com montanhas e serras que dificultam a construção de linhas de transmissão, gasodutos e estradas. Grande parte do estado é coberta pela Mata Atlântica onde existem várias áreas de proteção ambiental.

A seguir será realizado o detalhamento de cada uma das etapas da metodologia.

### 5.2.1 Levantar dados das alternativas

O levantamento de informações sobre os projetos de instalações de gasodutos e de instalações de geração e transmissão de energia elétrica no estado de Santa Catarina considerou como base os estudos indicativos e determinativos já realizados pelo governo federal. O documento “Estudo de Atendimento Elétrico ao Estado de Santa Catarina: Região Oeste - Análise Técnico-Econômica de Alternativas: Análise socioambiental do atendimento elétrico (Relatório R1)”, de 6/11/2017, apresenta a previsão de ampliação de subestações existentes na região Oeste de Santa Catarina, dentre elas a subestação (SE) Videira Sul. A figura 43 exhibe a localização da SE Videira Sul (Latitude -27.061389 S, -

51.149722 O), da empresa ATE VI - Campos Novos Transmissora de Energia S.A..

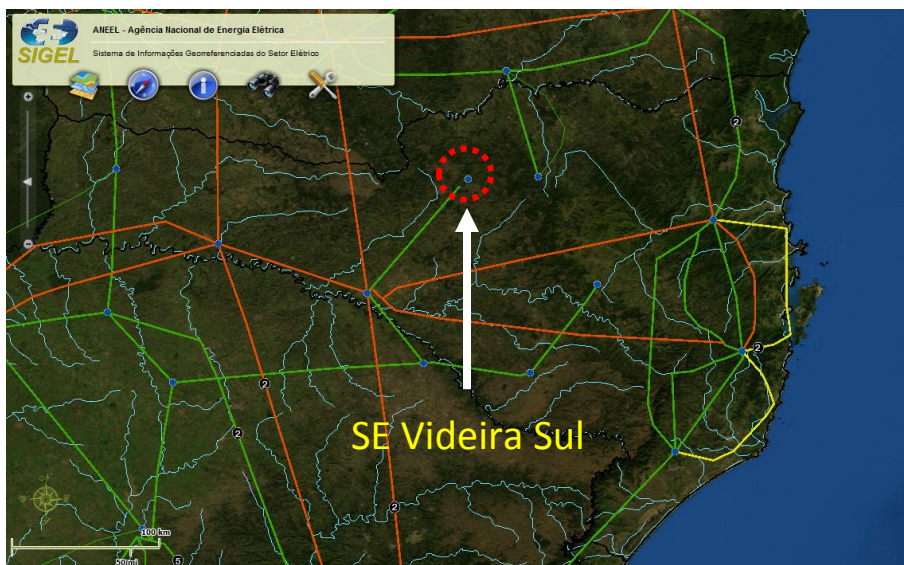


Figura 43 - Infraestrutura de transmissão de energia elétrica em SC (ANEEL, 2015)

O projeto de ampliação da SE Videira Sul, segundo informado pela EPE, contempla a implantação de mais uma unidade transformadora de 138/230 kV (atualmente já existem 3 unidades). Também está previsto o aumento da capacidade de interconexão da SE Videira Sul, de modo a possibilitar a interligação futura de 12 novas linhas de transmissão, dos quais 6 na tensão de 138kV e 6 na tensão de 230kV.

O levantamento de informações sobre os projetos de instalações de gasodutos no estado de Santa Catarina considerou como base a informação publicada pela EPE, no Workshop: Estudos de Expansão da Malha Dutoviária, em 29 de março de 2019, sobre as alternativas a serem estudadas no seu “Plano Indicativo de Gasodutos – 2019”.

Dentre as possíveis alternativas a serem estudadas, consta a previsão de interligação de novas demandas à malha de gasodutos nacional, dentre elas o gasoduto Biguaçu – Chapecó, com estimativa de 360km. A figura 44 exhibe gasoduto Biguaçu – Chapecó.

Vale citar que a ECOMP (Estação de Compressão) Biguaçu é uma instalação existente do trecho sul do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL) operado pela empresa Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. – TBG.

**POSSÍVEIS ALTERNATIVAS A SEREM ESTUDADAS**  
Interligação de novas demandas à malha

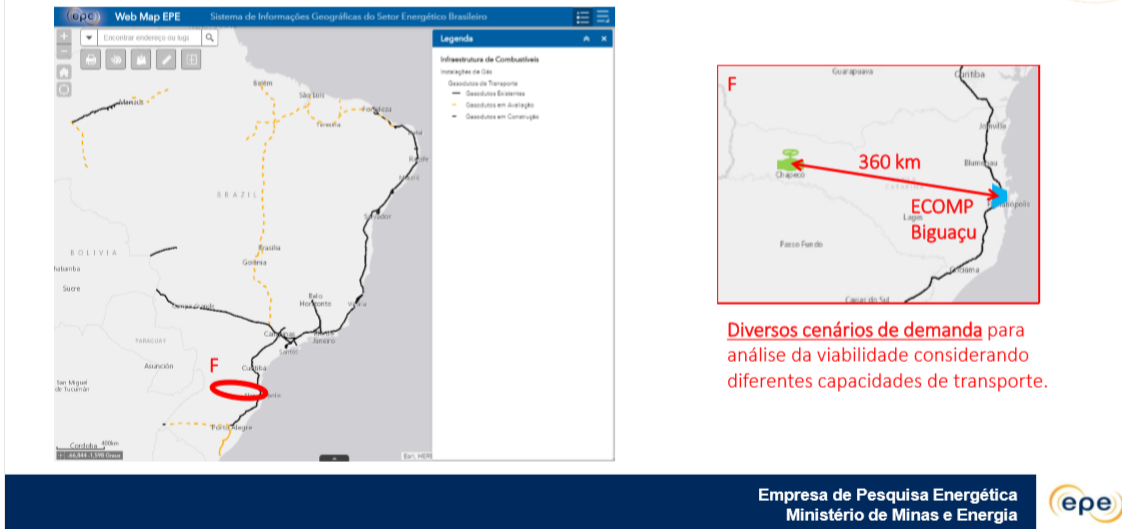


Figura 44 - Mapa do gasoduto Biguaçu – Chapecó, em estudo pela EPE

As regiões centro-oeste e oeste do estado de Santa Catarina não são atualmente atendidas por gasodutos de distribuição, conforme pode ser observado pela região demarcada pela elipse pontilhada de cor vermelha, inserida no mapa da rede da Companhia de Gás de Santa Catarina – SCGÁS (figura 45).

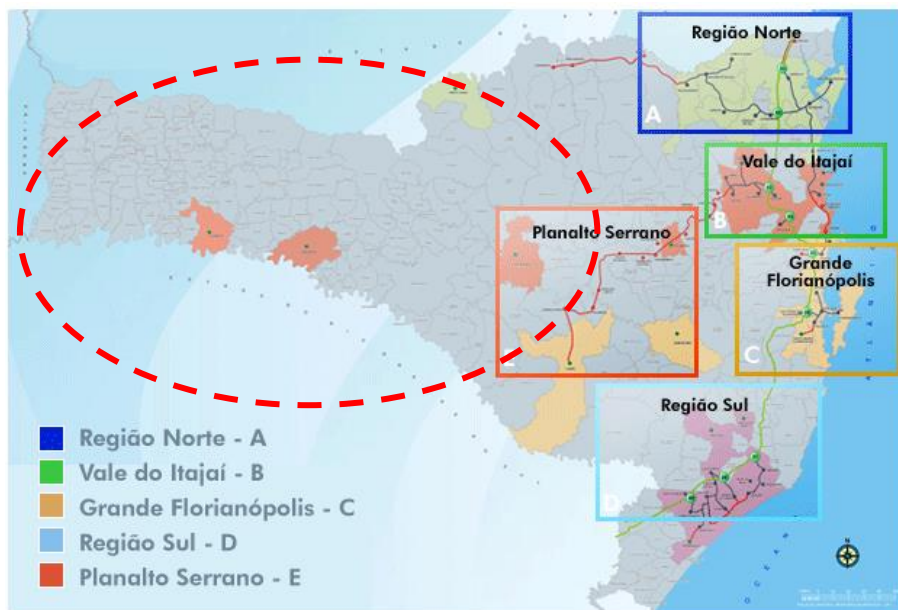


Figura 45 - Mapa da rede da Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS, 2019)

Dado que a EPE, até a presente data, não publicou documento indicando o traçado em estudo do novo gasoduto Biguaçu – Chapecó, foram selecionadas, hipoteticamente, a localização de 2 (dois) pontos de entrega considerados candidatos para fornecimento de gás para a UTE Vale do Contestado, a saber: a) **PTE 1** (-27,531764, -50,874799): no município de Vargem/SC; e b) **PTE 2** (-27,528950, -51,073538): no município de Abdon Batista/SC.

Por último, foram levantados locais para serem avaliados como alternativas candidatas de localização da termelétrica, situados entre os PTEs e a SE Videira Sul. Na área denominada Vale do Contestado, situada na região centro-oeste do estado, existem 4 (quatro) locais de cruzamento de rodovias e de rios que podem ser consideradas candidatas para localização da UTE Vale do Contestado.

As alternativas candidatas de localização da termelétrica que serão avaliadas neste estudo de caso são:

a) **UTE 1** (-27,390558, -51,159599), situada no município de Campos Novos/SC, próximo do cruzamento do rio São João com a BR-470;

b) **UTE 2** (-27,351105, -51,01667), situada no município de Campos Novos/SC, próximo do cruzamento do rio Inferno Grande com a BR-470;

c) **UTE 3** (-27,336554, -50,964741), situada no município de Brunópolis/SC, próximo do cruzamento do rio do Pinto com a BR-470; e

d) **UTE 4** (-27.316117, -50.76556): no município de Brunópolis/SC, próximo do cruzamento do rio Marombas com a BR-470.

### **5.2.2 Delimitar área de estudo**

A figura 46 exibe a área de estudo delimitada para este estudo de caso, contemplando a subestação, os pontos de entrega, as UTE candidatas e os corredores das alternativas. As linhas pontilhadas indicam os corredores que serão estudados, sendo que as linhas de cor laranja se referem aos corredores das linhas de transmissão, enquanto as de cor azul se referem aos corredores dos gasodutos.



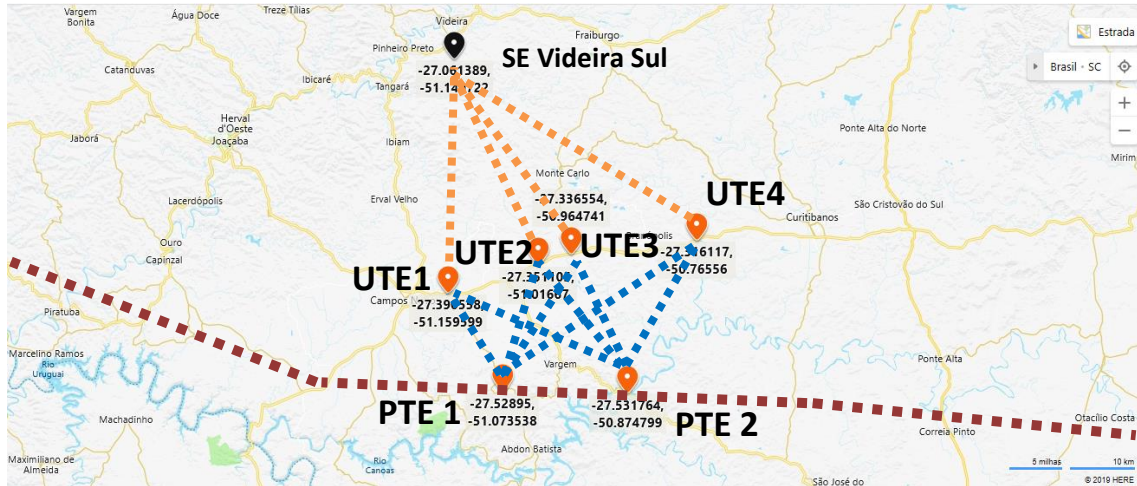


Figura 46 – Mapa elaborado pelo autor no Bing Maps contendo os corredores em estudo

### 5.2.3 Definir os métodos, fatores e critérios

O método selecionado para solução do problema do caminho de menor custo, tanto para o traçado da linha de transmissão, quanto para o traçado do gasoduto será o método da Análise Hierárquica de Processos – AHP, cujo detalhamento se encontra no Anexo 3. Após a análise dos fatores e critérios mais utilizados no levantamento da experiência internacional (tabelas 2, 3 e 4 do capítulo 4), foram definidos pelo autor os níveis hierárquicos da tomada de decisão e os fatores e os critérios a serem considerados, conforme exibido na tabela 21.

Tabela 21 - Níveis hierárquicos, fatores e critérios selecionados

Nível A	Nível B	Nível C
Traçado da Faixa	Preocupação Social (B1)	Densidade Populacional (C1)
	Meio Físico (B2)	Declividade (C2)
		Geologia (C3)
	Meio Biótico (B3)	Florestas / Reservas (C4)
		Rios / Lagoas (C5)
	Aspectos Técnicos (B4)	Estradas (C6)

No método AHP a importância relativa (I.R.) entre os critérios é definida em pares. As médias geométricas (M.G.) dos valores das importâncias são utilizadas no cálculo das prioridades relativas (P.R.). A tabela 22 exhibe tais cálculos e a tabela 23 os resultados.

Tabela 22 – Memória de cálculo da prioridade relativa geral dos critérios

I.R.	B1	B2	B3	B4	M.G	P.R
<b>B1</b>	1.00	0.11	0.11	0.25	<b>B1</b>	0.0437
<b>B2</b>	9.00	1.00	0.20	0.50	<b>B2</b>	0.1808
<b>B3</b>	9.00	5.00	1.00	0.50	<b>B3</b>	0.4042
<b>B4</b>	4.00	2.00	2.00	1.00	<b>B4</b>	0.3712

	B2	C2	C3	M.G	P.R
<b>C2</b>		1.00	0.50	<b>C2</b>	0.3333
<b>C3</b>		2.00	1.00	<b>C3</b>	0.6667

	B3	C4	C5	M.G	P.R
<b>C4</b>		1.00	0.33	<b>C4</b>	0.2500
<b>C5</b>		3.00	1.00	<b>C5</b>	0.7500

Tabela 23 - Resultados (pesos) do cálculo da prioridade relativa geral dos critérios

Critério	Prioridade Relativa Geral (Peso)
Densidade Populacional (C1)	0.0437
Declividade (C2)	0.0603
Geologia (C3)	0.1205
Florestas / Reservas (C4)	0.1011
Rios / Lagoas (C5)	0.3032
Estradas (C6)	0.3712

O método selecionado para a solução do problema de programação linear relativo à minimização do custo da solução integrada será o método SIMPLEX. As variáveis de custo que irão fazer parte da função objetivo deste problema serão as variáveis que determinam o custo CAPEX, dentre elas o custo de investimento com a aquisição de material / equipamentos e o custo com a contratação de serviços de obras especiais.

#### 5.2.4 Definir os materiais

As definições de métodos e software neste estudo de caso são as mesmas utilizadas no estudo de caso anterior, ou seja, o método de busca de seleção do caminho com menor custo será o método de Dijkstra e o software GIS será o QGIS.



### 5.2.5 Coletar Dados

Os seguintes valores (corrigidos considerando o índice IGP-M - referência: maio de 2019) de custo de materiais e equipamentos foram levantados para utilização neste estudo:

- Tubo de aço carbono grau API 5L X65 com diâmetro de 16": R\$ 1,816.87 / metro [TCU, 2008];
- Sistema de Medição de gás (2 conjuntos): R\$ 1,240,609.13 cada [ANP, 2015];
- Válvula de Bloqueio 14" (1 válvula a cada 30km): R\$ 93,083.73 cada [TCU, 2008];
- Sistema de Proteção Catódica do gasoduto: R\$ 245,318.19 [ANP, 2015];
- Sistema de Supervisão e Controle (SCADA) e Sistema de Detecção de Vazamento: R\$ 2,439,163.72 [ANP, 2015];
- Lançador ou Recebedor de *pig* (2 conjuntos): R\$ 2,495,236.45 [ANP, 2015];
- Cruzamento de duto sobre riachos: R\$ 1,113,604.40 cada [ANP, 2015];
- Cruzamento de duto sobre rodovias ou ferrovia: R\$ 338,539.11 cada [ANP, 2015];
- Cabo condutor da linha de transmissão (230 kV): R\$ 565,776.84 / km [ELETROBRÁS, 2005];
- Infraestruturas das Torres de Transmissão: R\$ 326,772.72 / km [ELETROBRÁS, 2005];
- Cruzamento de duto sobre rios de grande largura (Método HDD): R\$ 10,743,724.73 cada [TBG, 2015].

Os demais dados coletados foram:

- Densidade Populacional (C1) – Dados da população das cidades IBGE;
- Declividade (C2) – Modelo de Elevação Digital do Brasil (TOPODATA/INPE);
- Geologia (C3) – Mapa geológico do Estado de Santa Catarina da UFSC (2010);
- Florestas Nativas / Reservas (C4): Relação de Unidades de Conservação Federais e Estaduais do MMA;
- Rios / Lagoas (C5), Estradas (C6): Base Cartográfica Integrada do Brasil, incluindo hidrografia, divisão territorial e sistema viário (IBGE);

### **5.2.6 Selecionar, tratar e tabular os dados**

Os dados coletados selecionados, tratados e tabulados foram:

- Densidade Populacional (C1) – Dados da população das cidades localizadas dentro da área de estudo, segundo o último censo realizado pelo IBGE: Pinheiro Neto (3147), Tangará (8748), Ibiam (1971), Frei Rogério (2480), Monte Carlo (10500), Brunópolis (2852), Campos Novos (35710) e Vargem (3100);
- Declividade (C2) – Modelo de Elevação Digital do Brasil (TOPODATA/INPE);
- Geologia (C3) – Não tem registro de atividade de mineração da região em estudo, conforme o Mapa geológico do Estado de Santa Catarina da UFSC (2010);
- Florestas Nativas / Reservas (C4): Após consulta da relação de Unidades de Conservação Federais e Estaduais do MMA, observou-se que não há esse tipo de restrição nos corredores em estudo;
- Rios / Lagoas (C5), Estradas (C6): Base Cartográfica Integrada do Brasil, incluindo hidrografia, divisão territorial e sistema viário (IBGE).

### **5.2.7 Realizar o pré-processamento dos dados**

Após o pré-processamento dos dados georreferenciados, foi elaborado um mapa, conforme exibido na figura 47, com todas as camadas elaboradas nos itens anteriores. Neste mapa, as linhas amarelas representam linhas de transmissão existentes e a linha vermelha representa o traçado do gasoduto Biguaçu-Chapecó em estudo pela EPE. Os círculos de cor cinza representam as cidades. Já os círculos amarelos são as UTEs candidatas, enquanto o círculo vermelho um aeroporto. Os pontos de entrega foram representados na cor verde e a subestação na cor azul.

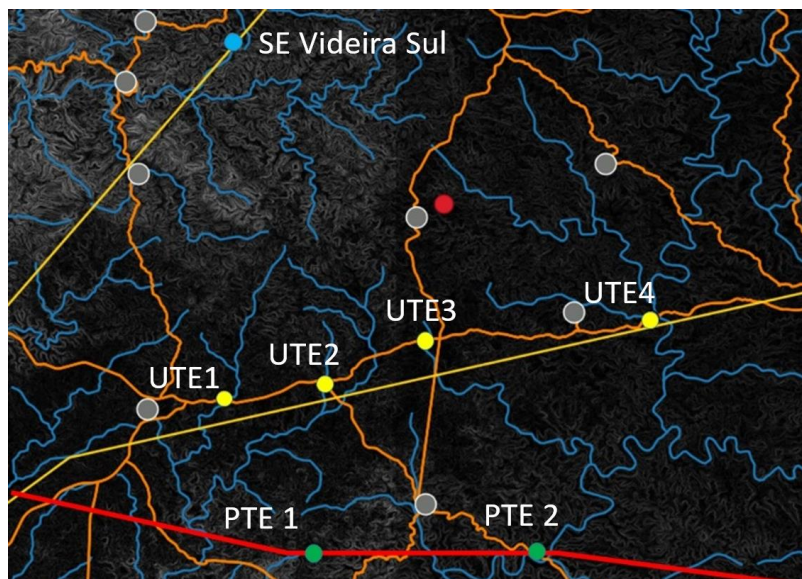


Figura 47 – Mapa exibindo os corredores após o processamento dos dados coletados

### 5.2.8 Realizar o processamento de dados

Os atributos de exibição das camadas densidade populacional (C1), declividade (C2), rios / lagoas (C5) e estradas (C6) foram ajustados (normalizados) em função de seu valor de importância, com base em uma escala de 5 níveis de intensidade, a saber: a) valor 1 = baixo; b) valor 2 = moderado; c) valor 3 = forte; d) valor 4 = muito forte; e e) valor 5 = extremamente forte. Os atributos de cor dessas camadas foram ajustados de tal modo que valores baixos são exibidos com tom claro e valores altos com tons mais escuros.

### 5.2.9 Analisar os dados

Foram analisados os dados coletados visando identificar as oportunidades e as restrições. Foi identificada uma restrição situada dentro da área do corredor da alternativa de linha de transmissão que interliga a UTE 4 até a subestação Videira Sul. Trata-se do aeroporto privado Nelson Pizzani, localizado nas coordenadas de Latitude  $27^{\circ} 12' 44'' S$  e Longitude  $- 50^{\circ} 57' 22'' O$  ( $-27.212222 S$ ,  $-50.956111 O$ ), no município de Mote Carlo/SC. Trata-se, portanto, de uma restrição que caracteriza uma região proibida para o projeto de uma linha de transmissão. Recomenda-se manter a distância de, pelo menos, 3km deste ponto, motivo pelo qual deverá ser realizado um ajuste no valor de seu custo, elevando-o

para um valor considerado infinito, para que o modelo de cálculo da superfície associe a este ponto um valor de custo, que nunca fará parte do traçado de uma rota para esta linha de transmissão. As camadas em análise referentes aos critérios de densidade populacional (C1), declividade (C2), rios / lagoas (C5) e estradas (C6) estão representados na figura 48.

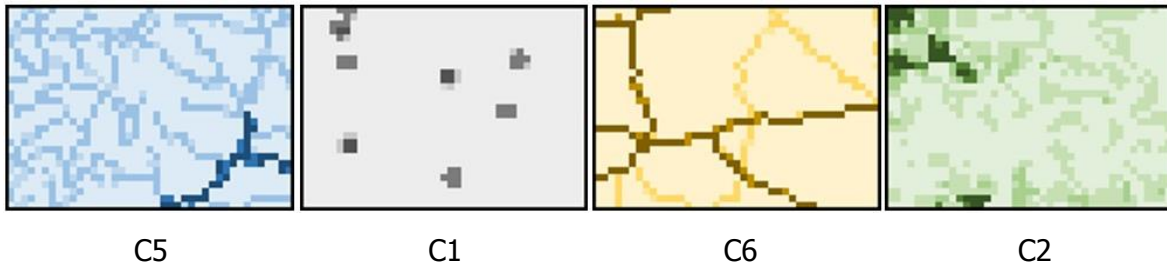


Figura 48 – Camadas classificadas e processadas

#### 5.2.10 Elaborar modelo de superfície de custo da alternativa

Foi desenvolvida a fórmula do modelo matemático que combina os valores e os pesos dos fatores e critérios das camadas em uma única superfície, conforme pode ser observado na equação 2. Cada pixel da superfície de custo combina o valor de cada camada classificada / processada multiplicado pelo seu respectivo peso em relação ao valor total.

A camada da superfície de custo da alternativa foi representada na figura 49, com tons de laranja variando entre o amarelo e o vermelho. Vale destacar que o pixel de cor preta existente nesta figura está associado ao aeroporto privado Nelson Pizzani.

$$\text{Custo} = 0.0437 * C1 + 0.0603 * C2 + 0.1205 * C3 + 0.1011 * C4 + 0.3032 * C5 + 0.3712 * C6 \quad (2)$$

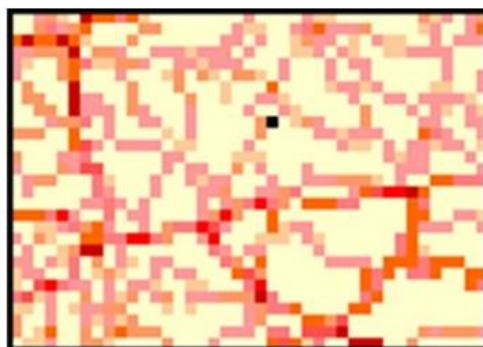


Figura 49 – Mapa do modelo da superfície de custo

### 5.2.11 Encontrar o caminho de menor custo

Foram selecionados os pontos de origem e destino de cada alternativa e executado o algoritmo de busca do software GIS para encontrar a solução do problema de seleção do caminho com menor custo da alternativa. Em seguida foi criada uma camada do caminho com menor custo da alternativa, ajustando seus atributos de cor, de modo a facilitar sua visualização, considerando todos os elementos já inseridos no Sistema GIS.

### 5.2.12 Elaborar mapa da alternativa com o caminho de menor custo

O mapa contendo o traçado de todas as alternativas de projeto pode ser visualizado na figura 50.

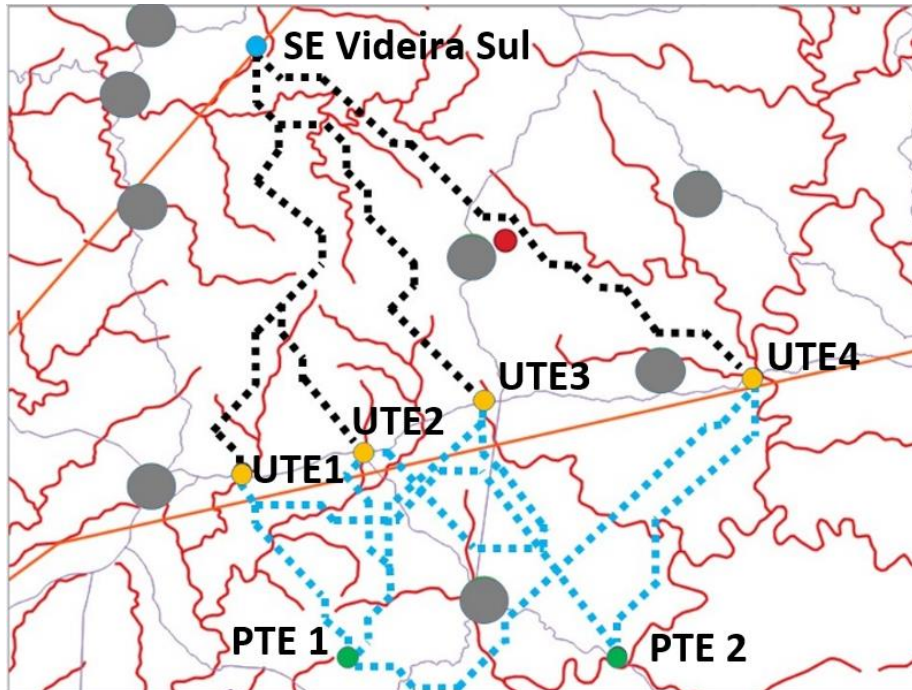


Figura 50 – Mapa traçado de todas as alternativas de projeto

### 5.2.13 Calcular o custo da alternativa do caminho de menor custo

Foi realizado o cálculo do custo de cada alternativa de linha de transmissão e gasoduto. Os dados e resultados de tais cálculos estão exibidos nas tabelas 24 a 30.

Primeiramente foram obtidos os comprimentos da alternativa e totalizadas as

interferências. Com base nos os custos unitários atualizados dos materiais e serviços necessários para a implantação da alternativa, foram calculados os principais custos de CAPEX da alternativa do caminho de menor custo, ou seja, foram considerados os custos estimados para aquisição dos materiais e de serviços para a implantação da alternativa.

Tabela 24 - Extensão das infraestruturas das alternativas em estudo

	<b>EXTENSÃO (km)</b>			
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>19.23</b>	<b>18.83</b>	<b>23.94</b>	<b>45.20</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>41.63</b>	<b>27.91</b>	<b>24.35</b>	<b>26.30</b>
<b>SE VIDEIRA SUL:</b>	<b>42.03</b>	<b>39.68</b>	<b>40.08</b>	<b>50.07</b>

Tabela 25 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas em estudo com rios

	<b>CRUZAMENTO DE GASODUTO X RIO (Qty.)</b>			
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>SE VIDEIRA SUL:</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

Tabela 26 - Cruzamentos das infraestruturas das alternativas em estudo com LTs

	<b>CRUZAMENTO DE GASODUTO X LINHA DE TRANSMISSÃO (Qty.)</b>			
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>SE VIDEIRA SUL:</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabela 27 - Cruzamentos dos gasodutos do corredor em estudo com estradas/ferrovias

	<b>CRUZAMENTO DE GASODUTO X RODOVIA (Qty.)</b>			
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>SE VIDEIRA SUL:</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>

Tabela 28 - Quantidade de válvulas de bloqueio das alternativas de gasodutos em estudo

<b><u>VÁLVULAS DE BLOQUEIO DO GASODUTO (Qtd.)</u></b>				
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabela 29 - Custo simplificado das alternativas de gasodutos em estudo

<b><u>CUSTO SIMPLIFICADO DO GASODUTO (Milhões de R\$)</u></b>				
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>PTE 1:</b>	<b>36.15</b>	<b>36.53</b>	<b>45.05</b>	<b>85.21</b>
<b>PTE 2:</b>	<b>77.62</b>	<b>53.37</b>	<b>44.67</b>	<b>48.98</b>

Tabela 30 - Custo simplificado das alternativas das linhas de transmissão em estudo

<b><u>CUSTO SIMPLIFICADO DA LINHA DE TRANSMISSÃO (Milhões de R\$)</u></b>				
	<b>UTE 1</b>	<b>UTE 2</b>	<b>UTE 3</b>	<b>UTE 4</b>
<b>SE VIDEIRA SUL</b>	<b>37.52</b>	<b>35.42</b>	<b>35.78</b>	<b>44.69</b>

#### **5.2.14 Elaborar o modelo matemático do custo integrado das alternativas**

O problema envolve apenas equações lineares, inclusive as equações das restrições. Esse tipo de problema já foi classificado como um problema típico de rede de transporte (DANTZIG, 1963) (PIZZOLATO & GANDOLPHO, 2013). A figura 51 ilustra o supracitado problema. A função objetivo considera o somatório dos custos de todas as alternativas possíveis. As restrições internas do problema estão relacionadas com o balanço de cada nó. As variáveis de decisão serão os coeficientes que irão definir se o fluxo de transporte seguirá, ou não, através de cada arco, ou seja, se assumirão os valores 0 ou 1. A estratégia de solução é a utilização no método Simplex, ideal para utilização de problemas de programação linear.

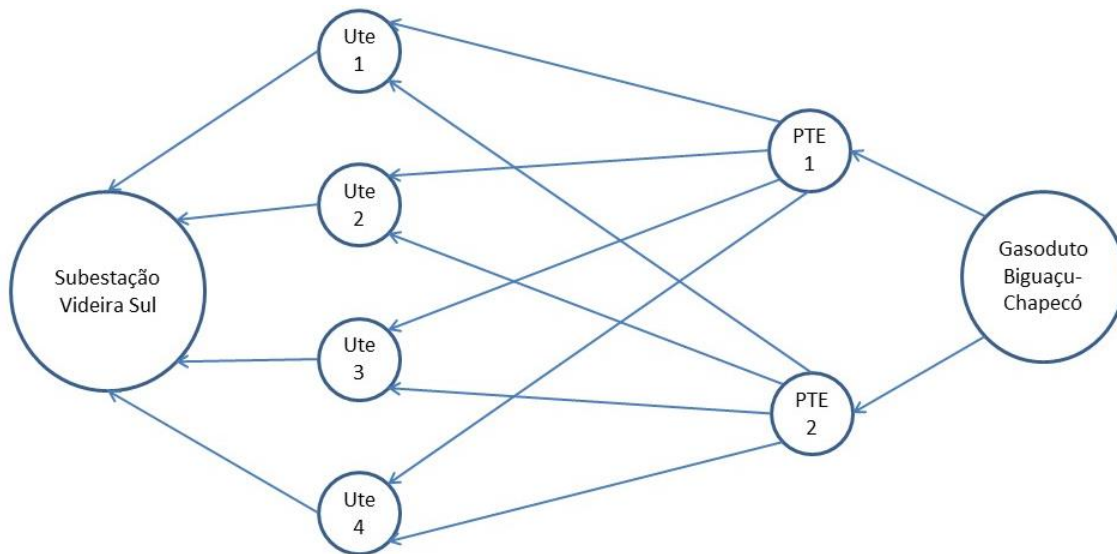


Figura 51 – Diagrama de arcs e nós do problema de transporte

Considerando o levantamento de custos realizado na etapa anterior, a seguinte função objetivo foi desenvolvida:

Minimizar:  $6.42X_{1,2} + 6.42X_{1,3} + 36.15X_{2,4} + 36.53X_{2,5} + 45.05X_{2,6} + 85.21X_{2,7} + 77.62X_{3,4} + 53.37X_{3,5} + 44.67X_{3,6} + 48.98X_{3,7} + 37.52X_{4,8} + 35.42X_{5,8} + 35.78X_{6,8} + 44.69X_{7,8}$

Sujeito às seguintes restrições, conforme exibido na tabela 31:

Tabela 31 – Equações das restrições do problema do estudo de caso 2

$- X_{1,2} - X_{1,3} = - 1$	$+ X_{2,5} + X_{3,5} - X_{5,8} = 0$
$+ X_{1,2} - X_{2,4} - X_{2,5} - X_{2,6} - X_{2,7} = 0$	$+ X_{2,6} + X_{3,6} - X_{6,8} = 0$
$+ X_{1,3} - X_{3,4} - X_{3,5} - X_{3,6} - X_{3,7} = 0$	$+ X_{2,7} + X_{3,7} - X_{7,8} = 0$
$+ X_{2,4} + X_{3,4} - X_{4,8} = 0$	$+ X_{4,8} + X_{5,8} + X_{6,8} + X_{7,8} = + 1$
$X_{i,j} \geq 0$	

### 5.2.15 Encontrar o empreendimento integrado de menor custo

A Figura 52 exibe a função objetivo (célula A10) e as restrições do problema (células C4:J4) que foram configuradas no Solver do MS-Excel do pacote Office 365, que é compatível com o tipo de problema (Programação Linear) e o método de solução (Simplex) previamente definidos.



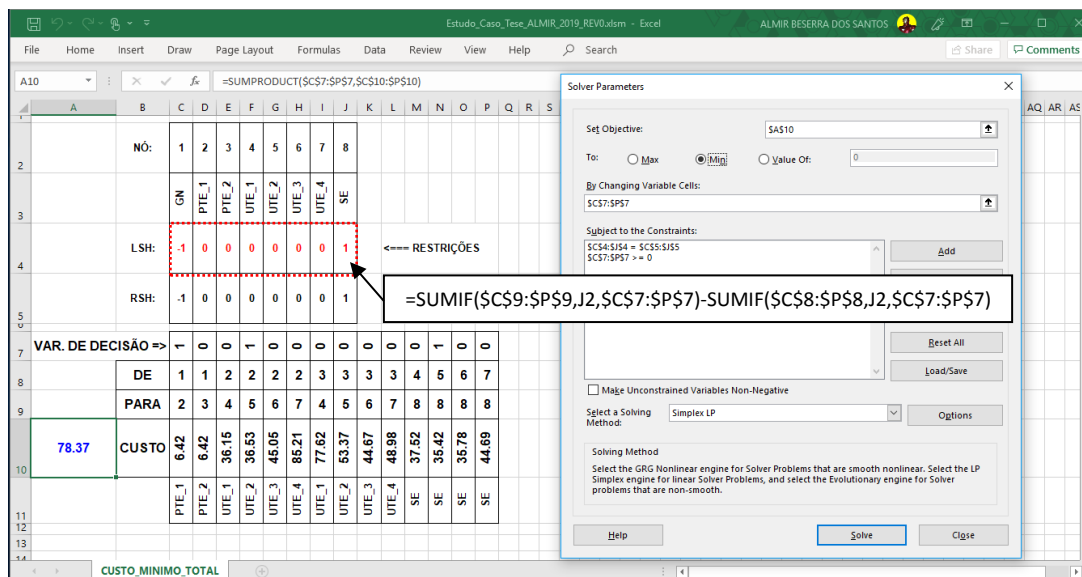


Figura 52 – Função objetivo e restrições configuradas no Solver do Excel

No solver do Microsoft Excel (versão 16.0) o cálculo foi executado em 0,047s, utilizando o método Simplex LP. O hardware utilizado foi um PC com processador Intel i3 de 2.30GHz de *clock*, memória RAM de 6GB e Sistema Operacional Windows 10 (64-bit). A análise de sensibilidade dos resultados obtidos na solução encontrada pelo Solver do Excel indica que existe folga de ajuste relacionadas com cada variável da função objetivo e das restrições.

O problema também foi resolvido utilizando software General Algebraic Modeling System (GAMS) tendo sido encontrado os mesmos resultados obtidos por meio do Solver do Excel, conforme pode ser observado no ANEXO 2.

#### 5.2.16 Analisar e discutir os resultados

A análise de sensibilidade dos resultados obtidos na solução indica que, existe folga de ajuste relacionadas com cada variável da função objetivo e das restrições. Não foram identificadas inconsistências em relação aos números de cruzamentos, travessias ou obras especiais associadas ao empreendimento integrado de menor custo.

A solução de menor custo obtida foi de R\$ 78.37 milhões. O detalhamento do custo contempla: R\$ 6.42 milhões para os equipamentos de gasodutos (lançador/recebedor de

pig, Sistemas de Supervisão e Controle, Proteção Catódica e de Detecção de Vazamentos) a serem instalados por conta da interligação com o gasoduto Biguaçu-Chapecó; R\$ 36.53 milhões para as principais despesas de construção, aquisição de equipamentos e materiais do gasoduto a ser construído desde o PTE1 até a UTE2; e R\$ 35.42 milhões para a aquisição de equipamentos e materiais da linha de transmissão a ser instalada desde a UTE2 até a SE Videira Sul. A localização otimizada da termelétrica e de suas infraestruturas é ilustrada na figura 53. Também foram exibidas a segunda melhor alternativa (UTE1 suprida a partir do PTE1) e a terceira melhor alternativa (UTE3 suprida pelo PTE2).

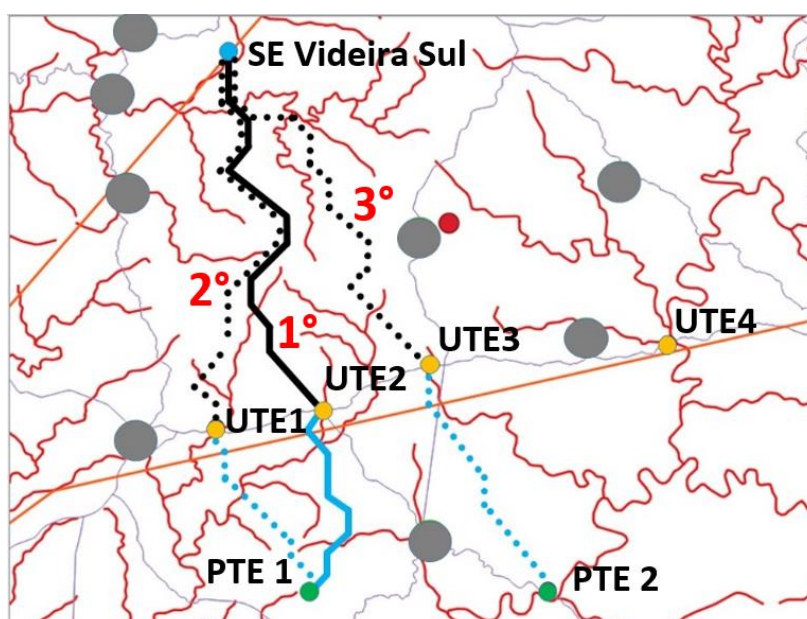


Figura 53 - Mapa contendo o empreendimento integrado de menor custo

## 6 Discussões e Considerações Finais

Há de se ressaltar que atualmente há no Brasil e no mundo, uma disponibilidade de inúmeras alternativas tecnológicas para a geração de energia elétrica, tais como a hidrelétrica, a nuclear e a termelétrica (ROSA, 2007).

O crescente incentivo à inovação tem possibilitado o surgimento de diversas novas tecnologias de geração e transporte de energia, algumas disruptivas, diversificando os tipos de projeto e aumentando o número de soluções possíveis.

Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens dependendo do local e da disponibilidade de recurso empregado. Para se decidir qual a mais adequada para cada situação é fundamental uma avaliação prévia de custos necessários para a geração da energia.

Para possibilitar essa avaliação prévia, o planejamento dos projetos passa a ser uma ação estratégica fundamental e relevante, que deve fazer parte dos processos de tomada de decisão ao longo do ciclo de vida útil dos projetos dos empreendimentos produtores de energia. O planejamento deve ser realizado tanto para a manutenção e a expansão de empreendimentos existentes, quanto para a implantação de novos projetos.

As metodologias atualmente adotadas pelas empresas brasileiras que projetam e constroem gasodutos e linhas de transmissão, interligados ou não em termelétricas a gás natural, apesar de não seguirem um padrão nacional ou internacional, são estáveis e largamente utilizadas, o que não significa que elas não mereçam ser atualizadas, tampouco que são eficientes.

Foi proposto um método que possibilita encontrar a maneira mais econômica de conectar uma termelétrica a gás com suas infraestruturas.

A proposição do aprimoramento dessas metodologias, da forma como apresentada neste trabalho, vai muito além do que simplesmente apontar mais uma oportunidade para que dois importantes setores industriais do Brasil trabalhem juntos, com o objetivo de encontrar a maneira mais econômica de conectar uma termelétrica a gás com suas infraestruturas.

Os ganhos intangíveis que podem ser obtidos com a mudança de estratégia de concepção do projeto de uma termelétrica a gás natural não devem deixar de ser considerados, dada a variedade de benefícios que podem ser alcançados com a utilização da metodologia proposta no capítulo 4.

Além da maior possibilidade de redução do custo do empreendimento e do aumento da interação entre os setores envolvidos, a redução do impacto ao meio ambiente

é um grande diferencial.

Quanto maior for o empreendimento, maior será a área a ser impactada, não só durante a etapa de construção, mas também ao longo de toda a vida útil da termelétrica. Uma abordagem não integrada tem maiores chances de culminar na concepção de uma solução não otimizada.

E a solução minimizada não se restringe apenas ao resultado matemático da solução do problema. Existem vários outros aspectos de conveniência para o empreendedor, para as instituições envolvidas e para o consumidor final.

Via de regra, um projeto com menores dimensões tem maiores chances de ficar pronto em menos tempo, ou seja, além de afetar menos o meio ambiente durante a fase de construção, possibilita a entrada em operação antecipada e, com isso, seus beneficiários podem usufruir das suas benfeitorias de forma mais rápida.

Uma questão relevante merece discussão no tocante à complexidade dos estudos. Uma rápida conclusão que poderia ser alcançada ao se comparar as metodologias tradicionais com a metodologia proposta é a de que esta última aumenta a complexidade dos estudos e ao final o resultado obtido aparentemente se assemelha aos resultados obtidos com as metodologias existentes e não integradas. Entretanto, o que se observa é exatamente o oposto, ou seja, o resultado obtido com a nova metodologia é muito diferente de um resultado obtido de modo tradicional. Esta conclusão pode ser melhor visualizada através da comparação entre a metodologia proposta e a metodologia tradicional, conforme exibido nas figuras 54 e 55.

Na metodologia tradicional os estudos de traçado das infraestruturas da termelétrica a gás natural consideram um número limitado de alternativas, ou seja, tais metodologias tipicamente se limitam a encontrar três alternativas de linha de transmissão e três alternativas de gasoduto. Entretanto, tais alternativas são, na grande maioria das vezes, variações de um mesmo projeto preferencial, ou seja, são avaliadas variações, de número limitado, do traçado das infraestruturas, sem a garantia de que a solução

encontrada é a solução ótima do problema.

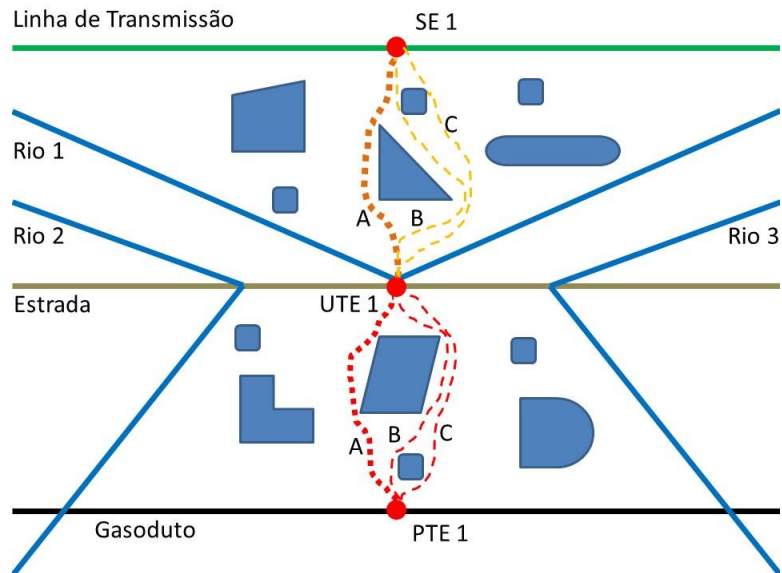


Figura 54 – Metodologia de seleção de rota tradicional (não integrada)

Na metodologia de seleção de rota ótima integrada, os estudos de traçado das infraestruturas da termelétrica a gás natural não consideram um número limitado de alternativas.

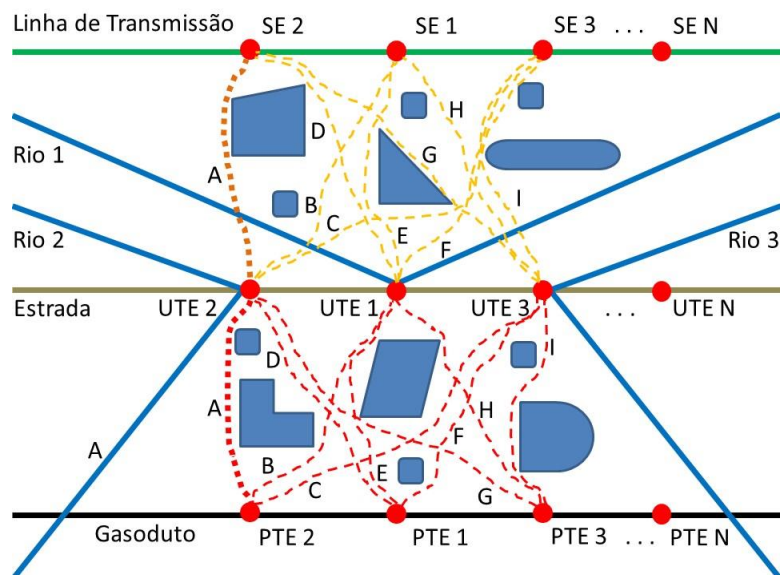


Figura 55 – Metodologia de seleção de rota ótima integrada

Existe a abertura para a diversificação das alternativas, de modo a permitir que possam ser consideradas, tantos quantas forem possíveis, as opções de localização do ponto de origem do gás, de localização da termelétrica e da subestação de destino da energia elétrica gerada. Dependendo do número de alternativas avaliadas, a chance de encontrar a maneira mais econômica de conectar uma termelétrica a gás com suas infraestruturas, é maior do que com a utilização da metodologia tradicional.

Outra importante discussão está relacionada com a avaliação dos casos em que os pontos investigados na metodologia tradicional façam parte do universo de pontos da metodologia proposta.

Nestes casos a melhor solução obtida com a metodologia tradicional seria confrontada com várias outras soluções otimizadas na metodologia proposta e, desta forma, seria possível, de fato, avaliar se a solução tradicional é mesmo a melhor solução.

Apenas para ilustrar esta situação, vale citar que a alternativa da UTE1 com as infraestruturas da linha de transmissão 'A' e do gasoduto 'A', representada na figura 54, é a mesma concebida pela alternativa da UTE1 com as infraestruturas da linha de transmissão 'E' e do gasoduto 'E', representada na figura 55. Se esta é realmente a melhor solução, ela assim será indicada após a resolução do problema da busca do empreendimento de menor custo, por meio do uso de técnicas de otimização.

Tão importante quanto a garantia da busca da solução de menor custo e impacto ambiental, é dispor de uma solução que acrescente flexibilidade aos tomadores de decisão, principalmente para os casos de situações adversas durante o aprofundamento das fases do projeto, ou seja, nas fases de projeto básico e executivo.

Não é uma situação rara ser detectado, no caso do projeto de um gasoduto, um tipo de solo ou a presença de rochas que prejudicam sobremaneira a construção da alternativa promissora desta infraestrutura e das suas duas substitutas investigadas pelo método tradicional.

Mesmo dispondo de fotos aéreas de alta resolução ou de documentos

complementares, atualizados ou não, nem todos os problemas podem ser evitados e solução praticada pelos projetistas é partir para um “plano B”, ou seja, fazer um desvio no traçado, aumentando-o, podendo chegar a dezenas de quilômetros.

A partir desse momento, se deixa de lado o mérito econômico, de tal modo que uma solução paliativa cara, que em condições normais não seria indicada como uma solução do problema, passaria a ser adotada como a melhor solução.

Essa situação é minimizada com o uso da metodologia de seleção de rota ótima integrada, pois ela naturalmente investiga alternativas que consideram a diversificação dos pontos de origem e/ou destino, ou seja, fornecendo flexibilidade. Na eventualidade de ocorrer um problema com um corredor da melhor solução, o projetista ainda teria a disposição outros corredores, ou seja, alternativas para resolver o problema mantendo o critério de menor custo.

A possibilidade de que a solução de custo mínimo global não venha a ser implementada por conta de alguma restrição de projeto induz ao pensamento de que devem ser exploradas as flutuações ao redor do mínimo global, ou seja, é recomendado que seja realizada uma análise de risco da solução de menor custo para verificar qual é a probabilidade de uma modificação no traçado implicar em um aumento elevado do custo do projeto. Este tipo de aprimoramento da apresentação do resultado da solução de melhor custo de implantação pode dar ao tomador de decisão a oportunidade priorizar uma solução que tenha um custo muito próximo da mínima global, mas que seja mais robusta, ou seja, possua menor risco de elevar do custo do projeto caso sejam observadas restrições externas, por exemplo.

Importante observar que a flexibilidade não está restrita a resolver apenas problemas relativos aos aspectos ambientais no corredor, mas também a possibilidade de avaliar alternativas de suprimento do gás natural, ou seja, o suprimento realizado por pontos de entrega de gasodutos distintos. Esta flexibilidade permite a comparação de projetos a serem implementados não só em um mesmo município ou estado, mas no país inteiro. Um empreendedor pode fazer uso deste método, por exemplo, para avaliar o

portifólio de projetos de usinas termelétricas a gás natural que pretende instalar no Brasil. O método permitiria, dentre outras vantagens, um empreendedor encontrar a maneira mais econômica de conectar uma termelétrica a gás com suas infraestruturas, desprendido de preferências ou outras formas de priorização.

Outro aspecto catalisador desta discussão é o fato de que atualmente o projeto de infraestruturas de gasodutos e linhas de transmissão já é um processo complexo e que a tendência é de que se torne ainda mais complicado, principalmente por conta da necessidade de novas regras, restrições ou critérios ambientais cada vez mais rígidos.

Neste ponto, a utilização de uma metodologia de seleção de rota ótima integrada que faz o uso combinado de técnicas de otimização e de sistemas de informação georreferenciadas é essencial, pois tais sistemas encontram de forma padronizada e rápida, a solução tecnicamente imparcial que esteja de acordo com as demandas dos órgãos de controle e da sociedade. Alguns dos artigos estudados no levantamento do estado da arte sobre o tema faziam uso de sistemas de informação georreferenciadas, de forma isolada, para gasodutos e linhas de transmissão. O uso de técnicas de otimização para a resolução do problema que identifica a alternativa integrada de menor custo é o grande diferencial deste trabalho.

E, por último, considerando a premissa básica de que as empresas procuram se manter competitivas em seus mercados, observa-se que o uso da metodologia de seleção de rota ótima integrada, pode ser utilizada como mais um recurso gerencial que os tomadores de decisão devem dispor, para aumentar a competitividade de projetos de termelétricas a gás natural em leilões da ANEEL.

## **7 Conclusões**

Importante salientar que o uso de software GIS com funções de busca do caminho de menor custo, combinado com o uso de software de otimização, ambos de baixo custo ou gratuitas, foram ferramentas fundamentais para facilitar a complexa tomada de decisão sobre a localização integradas de uma UTE a gás natural e suas infraestruturas.



Outra positiva conclusão acerca deste trabalho é a relevante contribuição da proposição da junção das metodologias adotadas para auxiliar os corpos técnicos e gerenciais no processo de tomada de decisão integrado sobre a localização de infraestruturas dos setores industriais relacionados com a geração de energia elétrica a gás natural.

O principal objetivo desta tese, ou seja, proposição de uma metodologia de avaliação integrada do traçado das infraestruturas de transporte de termelétricas a gás natural, foi plenamente atingido. Importante destacar que esta metodologia não foi desenvolvida de forma apressada, ou seja, houve um processo de maturação, que envolveu a interação com o mercado, por meio da submissão e da apresentação de artigos técnicos, que se encontram no anexo 4, encaminhados para instituições e revistas de relevância nacional e internacional, a saber: a) The most criteria and optimization practices used in the search for the best routes of infrastructure interconnected in gas-fired power plants (Rio Pipeline Conference and Exhibition 2019); b) Gas pipeline and power plant route selection evaluation (International Gas Union Research Conference – IGRC 2017); c) Power Plant Infrastructures Route Selection (Quest Journals - Journal of Research in Mechanical Engineering, 2017); e d) Análise do processo de seleção de alternativas de traçado de gasodutos para suprir novas termelétricas (Rio Oil & Gas Expo and Conference 2016).

Os objetivos específicos propostos também foram atingidos. Com relação à investigação dos panoramas nacional e mundial dos setores de gás natural e energia elétrica, de modo a identificar as características e experiências comuns, foi identificado quais regiões do Brasil são potenciais locais para geração de energia elétrica a partir de termelétricas a gás natural, ou seja, quais são os 7 estados do Brasil que, ao mesmo tempo, mais demandam energia elétrica e são atendidos por gasodutos de transporte, a saber: São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul, Bahia e Santa Catarina.

Já com relação ao levantamento do estado da arte das tecnologias disponíveis e em desenvolvimento relacionadas com o uso do gás natural na geração termelétrica e na cogeração, foram identificados as características físicas, vantagens, desvantagens e

limitações dos componentes das infraestruturas de transmissão de energia elétrica e de transporte de gás natural.

Sobre o desenvolvimento de uma metodologia, que auxilie a definição da localização de novos empreendimentos de termelétricas a gás natural e suas infraestruturas, fazendo uso de técnicas de otimização, foi identificado que a mesma além de consolidar as melhores práticas nacionais e internacionais, pode, também, servir de referência para as instituições e os agentes dos setores do gás natural e energia elétrica envolvidos nos projetos de termelétricas a gás natural.

Avaliar a aplicação da metodologia em estudos de caso de projeto de novos empreendimentos de termelétricas a gás natural e suas infraestruturas: Como demonstrado no estudo de caso comparativo entre a metodologia tradicional e a metodologia proposta neste trabalho, constatou-se que esta última possibilita simplificar e reduzir o tamanho do projeto das faixas do traçado da LT e de um gasoduto de uma UTE a gás natural e, desta forma, reduzir os riscos operacionais, minimizar os impactos ao meio ambiente e aumentar a competitividade de projetos de termelétricas nos Leilões de Energia Nova (LEN) realizados no Brasil.

## **8 Recomendações para Trabalhos Futuros**

Recomenda-se a utilização da metodologia de seleção de rota ótima integrada para investigar, se as alternativas dos projetos das termelétricas a gás natural já implantadas no Brasil, correspondem àquelas de menor custo de investimento e/ou àquelas que menos impactam ao meio ambiente, de forma a aumentar o número de casos de validação da metodologia proposta neste trabalho e também consolidar sua robustez.

Também se recomenda que a versão final do Plano Indicativo de Gasodutos 2019 da EPE seja considerado para a realização de estudos de prospecção de alternativas de projetos de termelétricas a gás natural, fazendo uso da metodologia de seleção de rota ótima integrada proposta neste trabalho, em sintonia com uma das expectativas do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), com a entrada em vigor do “Novo Mercado de Gás”, que é o crescimento do parque térmico para geração de energia elétrica utilizando o gás natural como combustível.

Adicionalmente, propõe-se que seja desenvolvida uma rotina ou um algoritmo fazendo uso de algum outro software comercial, como por exemplo o Matlab, que implemente as funções atualmente existentes no QGIS, para que seja realizada a comparação de performance entre a solução adotada nesta tese e a obtida por meio de outras plataformas ou softwares.

## 9 Referências Bibliográficas

ABEGAS, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado, “Rede de Distribuição de Gás Cresce 5,1% em 2018”, Disponível em: <https://www.abegas.org.br/arquivos/70716>, 2019.

ABREU, Y. V., AZEVEDO, M. R. M., Racionamento de energia elétrica de 2001: o estado do Tocantins, EUMED - Universidade de Málaga, 2009.

ABS (American Bureau of Shipping), Guidance notes on subsea pipeline route determination, 2016, file “ABS-Guidance-on-Pipeline-Route-Determination-2016\_12.pdf”. Disponível em: <https://www.safety4sea.com/wp-content/uploads/2016/12/>, 2016.

ABUDU, D., WILLIAMS, M, GIS-based Optimal Route Selection for Oil and Gas Pipelines in Uganda. *Advances in Computer Science: an International Journal*, [S.l.], p. 93-104, jul. 2015. ISSN 2322-5157. Disponível em: <http://www.acsij.org/acsij/article/view/83>>. Acesso em: 19 jul 2017.

ALVES, A. C., MOTTA, R. R., VITAL, M. S., A SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO APLICADA A TEORIA DAS OPÇÕES REAIS: UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE DE INVESTIMENTOS NO SETOR GÁS-QUÍMICO PARA A REGIÃO DO AMAZONAS, XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP, 2007.

AJAYI, K. T., OLAMIDE, O. O., Multi-Criteria Analysis of Power Plants in Nigeria, *Global Science and Technology Journal* Vol. 2. No. 2. September 2014 Issue. Pp.1-22, Disponível em: <http://www.gstjpapers.com/>.

AMARAL, T. C., Opções Reais: Análise Econômica de Projetos de Exploração e Produção de Petróleo Através de Estudos de Casos, UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Nota Técnica nº 228/2007 – SEM/ANEEL, 2007. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 01 Dez 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Banco de Dados de Editais de Geração, 2014. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em 01 jul 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Banco de Informações de Geração, 2015. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 01 jul 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016, 2017. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 01 Jan 2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Relatório RL-ANP-FPL-017, versão de 15/07/2015. Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). Acesso em: 21 dez 2015.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Anuário Estatístico, Cartograma 2.3, Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). 2019.

ARAÚJO, L. A. P., Modelo de Tomada de Decisão para Projetos de Linhas de Transmissão, Integrando Aspectos Ambientais, Técnicos e Econômicos, Furnas Centrais Elétricas S.A., 2009. <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/Modelo-de-Tomada-de-Decisao-para-Projetos-de-Linhas-de-Transmissao-Integrando-Aspectos-Ambientais-Tecnicos-e-Economicos.pdf>.

BALOGUN, Abdul-Lateef; MATORI, Abdul Nasir; YUSSOF, Khamaruzaman; LAWAL, DANO Umar; CHANDIO, Imtiaz Ahmed; GIS in pipeline route selection, 2013. Disponível em: <http://mycoordinates.org/gis-in-pipeline-route-selection/>.

BARROSO, L. A., Planejamento da Expansão da Transmissão, Workshop on Power Transmission Business in Brazil, ANEEL / APEX-Brasil, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15099519/Planejamento+da+expans%C3%A3o+e+empreendimentos+previstos+-+Luiz+Augusto+Barroso.pptx/dfbc2c6c-607d-4c93-9e70-f033750c90ba>

BHUSHAN, N., RAI, K., Strategic Decision Making - Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierachy Process, Springer-Verlag London, 2004.

BP, "Statistical Review of World Energy – June 2014". Disponível em: [www.bp.com/statisticalreview/](http://www.bp.com/statisticalreview/). Acesso em 28 set 2014.

BRITO, J. L., Investimentos em Usinas Térmicas a Gás Natural: Risco e Regulação. Monografia, PUC-RJ, Junho, 2009.

CADE, CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA, TERMO DE COMPROMISSO DE CESSAÇÃO DE PRÁTICA, Processo Administrativo nº 08700.002600/2014-30 e no Inquérito Administrativo nº 08700.007130/2015-82, 2019. <https://sei.cade.gov.br/>. Acesso em 10 ago 2019.

CAIXA – Caixa Econômica Federal, Preços de Insumos, janeiro 2013. Instituto Brasileiro de Auditoria de Engenharia (IBRAENG), disponível em [http://www.ibraeng.org/public/uploads/publicacoes/Preços\\_Insumos\\_AC\\_JAN\\_2013.pdf](http://www.ibraeng.org/public/uploads/publicacoes/Preços_Insumos_AC_JAN_2013.pdf).

CELBA, Centrais Elétricas de Barbacena, Relatório de Impacto Ambiental, Usina Termelétrica – UTE Novo Tempo Barbacena ver. 0.1, Barbacena, Pará, 2017.

CEMIG, 2019 [http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/Nossa\\_Historia/Paginas/historia\\_da\\_eletricidade\\_no\\_brasil.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/historia_da_eletricidade_no_brasil.aspx)

CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Otimização de Projetos de Linhas de Transmissão, 2019, [http://www.cepel.br/pt\\_br/linhas-de-pesquisa/menu/otimizacao-de-projetos-de-linhas-de-transmissao.htm](http://www.cepel.br/pt_br/linhas-de-pesquisa/menu/otimizacao-de-projetos-de-linhas-de-transmissao.htm). Acesso em 21 Jul 2019.

CHABAR, R. M., Otimização Global da Localização, Topologia e Capacidade de uma Rede de Transmissão: Uma Abordagem de Programação Não-Linear Inteira Mista, Tese, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

CHAN S., Decision-support system yields better pipeline route - Oil & Gas Journal, 2000.

CHOUDHARY, Devendra; SHANKAR, Ravi. An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India. Energy,

v. 42, n. 1, p. 510-521, 2012.

CNPE, Conselho Nacional de Política Energética, RESOLUÇÃO Nº 16, de 24/06/2019, <http://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-172805973>, 2019, Acesso em 21 Jul 2019.

CORREIA, P. B., Um Modelo Multisetorial para Otimização do Suprimento de Energia, Tese, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.

CORTELETTI, R. C., Desenvolvimento de Metodologia para Concepção de Traçados de Dutos de Transporte de Gás Natural, Dissertação, Escola de Minas – Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Mapa geológico estado do Espírito Santo, [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15564/5/mapa\\_geologico\\_espirito\\_santo.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15564/5/mapa_geologico_espirito_santo.pdf), Acesso em 21 Jul 2019.

DANTZIG, G. B., Linear Programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1963.

DEDEMEN, Y. I. G. I. T. A multi-criteria decision analysis approach to GIS-based route selection for overhead power transmission lines. Diss. PhD thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2013.

DEMORI, M. B., GNL como mecanismo de flexibilização do suprimento de gás natural para geração termelétrica no Brasil, Dissertação, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2008.

DIAS, M. A. Opções Reais Híbridas com Aplicação em Petróleo. Tese de doutorado, DEI /PUC, Rio de Janeiro, 2005.

DIAS, M. F. R., PASCUTTI, P. G., SILVA, M. L., APRENDIZADO DE MÁQUINA E SUAS APLICAÇÕES EM BIOINFORMÁTICA, Revista Semioses, v 10, n.01,

<http://dx.doi.org/10.15202/10.15202/1981-996X.2016v10n1p23>, 2016.

DIKCOW, M. F., Análise da Eficiência Energética em Sistemas de Combustão a Gás Natural, Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DOZZA, M. A., DETERMINANTES DE VALOR: TEORIA DE OPÇÕES REAIS POR SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO COM MÍNIMOS QUADRADOS, Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, v. 4, n. 7, p. 68-80, 2012.

DNV, DET NORSKE VERITAS, Curso de Estudo de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos para Técnicos do Ministério do Meio Ambiente, IBAMA e OEMAs, 2006, [https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_pnla/\\_arquivos/\\_7.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/_7.pdf), Acesso em 21 Jul 2019.

EFFAT, Hala A.; HASSAN, Ossman A; "Designing and evaluation of three alternatives highway routes using the Analytical Hierarchy Process and the least-cost path analysis, application in Sinai Peninsula, Egypt." The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 16.2 (2013): 141-151.

EGENHOFER, C., Gialogloy, K., Rethinking the EU Regulatory Strategy for Internal Energy Market, Center for European Policy Studies – CEPS, Brussels, 2004.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Revisão das Diretrizes para Elaboração de Orçamentos de Linhas de Transmissão, ANEXO 3 - Diretrizes para elaboração de orçamentos de Linhas de Transmissão.pdf, disponível em [www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes\\_administrativas/Documentos/](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes_administrativas/Documentos/), 2005.

EMERSON, Pipeline Studio Brochure, 2017, <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-pipelinestudio-en-327632.pdf>. Acesso em 21 Jul 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Plano de Expansão Decenal da Malha de Gasodutos de Transporte – PEMAT 2022, 2013.



EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional – BEN, 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 'Cadastramento A6-2019' Press Release. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/ReleaseCadastramentoA6-2019.pdf>. Acesso em: 11 jun 2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, PLANO INDICATIVO DE GASODUTOS - Workshop: Estudos de Expansão da Malha Dutoviária. Disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/EPE\\_WORKSHOP\\_2019\\_2903.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/EPE_WORKSHOP_2019_2903.pdf). acesso em: 29 mar 2019.

EROĞLU, HASAN; AYDIN, Musa. Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, v. 23, n. 5, p. 1418, 2015.

ESPOSITO, A. S., Competitividade da termoeletricidade movida a gás natural no brasil: estudo de caso de um sistema predominantemente hidroelétrico, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

FARIA, L. F. R., A Integração dos Mercados de Gás Natural e Energia Elétrica no Brasil, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FARINA, E. M. M. Q., Filho, E. M. G., Brasil, E. U., Efeitos Anticompetitivos da Participação da Petrobras nos Leilões de Venda de Energia Gerada por Termelétricas, versão de 30/08/2011, Tendências Consultoria Integrada, 2011.

FEIZIZADEH, B., ROODPOSHTI, M. S., JANKOWSKI, P., BLASCHKE, T., A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping, Computers & Geosciences 73 (208-221),2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.001>.

FRANCISCO, M. L., A importância da flexibilidade gerencial: análise de investimentos usando a teoria das Opções Reais da planta GTL. Dissertação de mestrado. (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,

2007.

FERREIRA, A. B. H., Novo dicionário da língua portuguesa. 3ª edição. São Paulo, 2009.

FREIRE, J. L. F., Engenharia de Dutos, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, Ponto Final Editora, 2009.

FURNAS, Furnas Centrais Elétricas S/A, Usina Termelétrica de Santa Cruz, 2019, disponível em <https://www.flickr.com/photos/jonasdecarvalho/9064684382>, Acesso em: 29 mar 2019.

GAMARRA, A., GIS SUITABILITY MODELING TO SUPPORT A PIPELINE ROUTE SELECTION, Penn State University, 2015.

GASNET, Termelétricas – Ciclo Combinado, 2019, disponível em <https://www.gasnet.com.br/termeletricas/ciclo.asp>, Acesso em: 29 mar 2019.

GIL, F. V. F., Métodos Analíticos para Tomada de Decisão na Transposição de Obstáculos por Faixa de Dutos, Esteio, 2010, Disponível em: <http://esteio.com.br/downloads/2011/Dutovias.pdf>, Acesso em: 29 mar 2019.

GIMENES, Filipe Biaggioni Quessada; AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 16, 2013.

GOLDRATT, E. M., COX, J., A meta. 17a. ed. São Paulo, Educator, 1994.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. Tomada de decisões em cenários complexos. Tradução técnica: Marcela Cecília González Araya. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 168 p.

GONÇALVES, A. B., An extension of GIS-based least-cost path modelling to the location of wide paths, International Journal of Geographical Information Science, 24:7, 983-996, DOI: 10.1080/13658810903401016, 2010.

GUAZZELLI, C. S., CUNHA, C. B., Otimização multicritério para o problema de localização de centros de distribuição de uma empresa com unidade produtiva no Pólo Industrial de Manaus, <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X1980-15>, Revista Gestão e Produção, São Carlos, 2015.

HANEBERG, William C. Evaluating the effects of input cost surface uncertainty on deep-water petroleum pipeline route optimization. In: Engineering Geology for Society and Territory-Volume 6. Springer, Cham, 2015. p. 351-355.

HENRIOT, Arthur et al. LDP Academic Roundtable: Redesigning Gas and Electricity Markets to Work Together. 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Espírito Santo, Santa Catarina, disponível no site <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/>, Acesso em: 28 ago 2019.

IEA, International Energy Agency, World Energy Outlook 2014, arquivo WorldEnergyOutlook2014ExecutiveSummaryPortugueseversion.pdf, 2014. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/npsum/>. Acesso em: 28 set 2014.

IPA – Independent Project Analysis, “Front End Loading – FEL Tool”, 2009, disponível no site [www.ipaglobal.com](http://www.ipaglobal.com) e acessado em 19 de agosto de 2009.

KANG, Ju Young; LEE, Byung Suk. Optimization of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017.

KELMAN, R., Planejamento Coordenado dos Setores de Energia Elétrica e Gás Natural, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

KHODADAD, S., JANG, D. H., The Online Journal of Science and Technology, TOJSAT, Volume 5, Issue 2, 2015.

LEAL, M. C., Aplicação do Sistema de Informações Geográficas em Projetos de Dutos, Monografia, ESTEIO, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

LIMA, A. R., Análise e Gestão de Riscos das Ocupações das Faixas de Linhas de Transmissão: Estudo de Caso da Vila Alta Tensão, Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2012.

LIMA, R. M., Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas (SIG). 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

LIMA, R. M., OSIS, R., PREREIRA, C. R. S., SANTOS, A. H. M., JUNIOR, E. L. C., JUNIOR, L. C., Otimização de Traçados de Linhas de Transmissão Utilizando SIG e avaliação multicritério, Dissertação, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

LORA, E. E. S., Nascimento, M. A. R., Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação, Interciência, 2004.

MANDEL, A., FERRERO, V.O.; GRASER, A; BRUY, A.; QGIS 2 Cookbook. Packt Publishing Ltd, 2016.

MARIANO, J. B., ROVERE, E. L. L., ASPECTOS AMBIENTAIS DA OPERACAO DE USINAS TERMICAS MOVIDAS A GAS NATURAL. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA - CBE, 11, Rio de Janeiro, 16-18 Ago. 2006.

MATOSINHO, K.G.; FURTADO, R.C.; VIEIRA, H.M.; SERRAN, F.P.; SILVA L.A.; Evolution of Environmental Management of Transmission in Brazil - Improvements, Challenges and Prospects; available on [www.cigre.org](http://www.cigre.org); CIGRE, 2010.

MELLO, O. D., Despacho integrado da geração termelétrica e da produção e transmissão de gas natural, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2006.

MENDES, R. M., Opções Reais em Project Finance: uma aplicação na indústria petrolífera, Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2012.

MCT, Protocolo de Quioto, Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil, arquivo eletrônico 12425.pdf, 2016. Disponível em: [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0012/](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0012/), 2016. Acesso em: 01 fev 2016.

MME - Ministério de Minas e Energia, 'Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural', Edition no. 115, 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: set 2016.

MME - Ministério de Minas e Energia, Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural, Edição nº. 148 (Jun/19), 2019.

MOHITPOUR, M., Golshan, H., Murray, A., "Pipeline Design & Construction: A Practical Approach", 3rd edition, ASME, 2007.

MPF, Ministério Público Federal, Entenda o Caso Lava Jato, disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-lava-jato/entenda-o-caso>

NÓBREGA, D. B. G., Estudo das Alternativas para Implantação de Ciclo Combinado na Usina Termelétrica de Camaçari: Simulação Computacional Utilizando o Software Thermoflow, Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2008.

NONIS, C. N., VARGHESE, K., SURESH, K. S., Investigation of an AHP Based Multicriteria weighting scheme for GIS routing of cross-country pipeline projects. 24th int. sym. on aut. and rob. in constr, 2007.

OLIVEIRA, A. P., Uma metodologia para projeto de gasodutos e carodutos, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2011.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Sistema Interligado Nacional – SIN, Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>, Acesso em: 01/08/2017.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Integração entre o planejamento da expansão e a operação do sistema elétrico, Disponível em: [http://www.ons.org.br/Paginas/Opinioao/20170828-integracao\\_planejamento\\_operacao.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/Opinioao/20170828-integracao_planejamento_operacao.aspx), Acesso em: 01/08/2019.

PAZMINO, C. A. T., PLANEJAMENTO INDUSTRIAL POR PROGRAMAÇÃO LINEAR COM OBJETIVOS MÚLTIPLOS, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1983.

PERLINGEIRO, C. A. G., Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos, Edgard Blücher, São Paulo, 2005.

PETROBRAS, Petróleo Brasileiro S.A.; Estudo de Impacto Ambiental (EIA) Gasoduto Rota 3 - Parte I, file "analise-de-alternativas.pdf", 2014. Disponível em: <http://rj.rap.gov.br/rj-gasoduto-rota-3-bacia-de-santos/>.

PETROBRAS, Petrobras Petróleo Brasileiro S.A., Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Polo Pré-Sal da Bacia de Santos – Etapa 2, Revisão 3, fevereiro, 2014.

PETROBRAS, Petrobras Petróleo Brasileiro S.A., Plano de Negócios e Gestão 2019-2023, <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/plano-de-negocios-e-gestao/>, Acesso em: 01/05/2019.

PINHO, J. C., O papel da Petrobras como investidor estratégico em termelétrica, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2004.

PIZZOLATO, A., GANDOLPHO, A., Técnicas de Otimização, LTC, Rio de Janeiro, 2013

PIZZOTTI, H. J. P., Análise da Competitividade na Indústria Brasileira de Gás Natural e Proposição de Melhorias, Departamento de Engenharia da Produção, USP, 2012.

RODRIGUES, E., J., Setor Elétrico Brasileiro - Estrutura, Funcionamento, Instituições e Perspectivas para o Controle, Biblioteca 24 horas, São Paulo, 2011.

ROSA, L. P., Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. Estud. av., vol.21, no.59,

p.39-58. ISSN 0103-4014, 2007.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European journal of operational research, v. 48, n. 1, p. 9-26, North-Holland, 1990.

SANTOS, A. B., CORDEIRO, G. B., The Creation of the Gas Transport System Operator (TSO) in Brazil, Rio Oil & Gas Conference 2014, IBP, 2014.

SANTOS A. B., CHRISMAN, E. C. A. N., "IBP2131\_16 ANÁLISE DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRAÇADO DE GASODUTOS PARA SUPRIR NOVAS TERMELÉTRICAS", Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2016. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/>.

SANTOS, E.P., MELLO, O. D., Ohishi, T., Otimização do Despacho Integrado da Geração Termoelétrica, da Produção e Transporte de Gás Natural, XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito, 2010.

SARKAR, D., Thermal Power Plant: Design and Operation, Elsevier, 2015

SCGÁS, Companhia de Gás de Santa Catarina, Mapa da rede da Companhia de Gás de Santa, disponível em: Catarina [www.scgas.com.br/](http://www.scgas.com.br/), Acesso em: 01/05/2019.

SHIRABE, T., A method for finding a least-cost wide path in raster space, International Journal of Geographical Information Science, 30:8, 1469-1485, DOI: 10.1080/13658816.2015.1124435, 2016.

SILVA, E. M., RODRIGUES, L. H., LACERDA, D. P., Aplicabilidade da corrente crítica da teoria das restrições no gerenciamento de projetos executivos de engenharia: um estudo de caso em uma refinaria de petróleo, 2012 Gest. Prod., São Carlos, v. 19, n. 1, p. 1-16, 2012.

SILVA, C. A., CAMPOS, G. L., SANTOS, M. G., OLIVEIRA, M. L. R., NOBREGA, R. V. T., Análise Conceitual de Linhas de Transmissão Operando em Regime Permanente Senoidal, ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 4, n. 2, e00206, jul/dez 2016.

SIMONE, Pipeline Application Software, disponível em <https://www.liwacom.de/>,

Acesso de 01/05/ 2019.

SULGAS, Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul, Projeto de Faixa de Dutos, Engenharia de Faixa de Dutos Terrestres - Tales Simões Mattos, Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Empreendimento/>, 2012.

TBG, "Transparência Pública - Ano 2015 em R\$", arquivo IM\_2015\_ResumoLAI.pdf disponível em <http://web.tbq.com.br/acessoinformacao/arquivo/>, 2015.

TCU, Tribunal de Contas da União, Processo 008.472/2008-3, Anexo 9, file DOC029-ANEXO%209.pdf, disponível em <http://www.senado.gov.br/comissoes/documentos/SSCEPI/>, 2008.

TCU, 2015 [http://www.tcu.gov.br/Consultas/Juris/Docs/judoc/Acord/20150603/AC\\_1281\\_19\\_15\\_P.doc](http://www.tcu.gov.br/Consultas/Juris/Docs/judoc/Acord/20150603/AC_1281_19_15_P.doc) ou <https://portal.tcu.gov.br/imprensa/noticias/comperj-ii-tem-licitacao-condicionada-pelo-tcu-a-apresentacao-de-novos-estudos.htm>

TERZIAN, R. L., Conceitos e Metodologias de Gestão de Projeto e sua Aplicação ao caso da Integridade da Malha Dutoviária, Dissertação, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

TOLMASQUIM, M. T., Perspectivas e Planejamento do Setor Energético no Brasil, Estudos Avançados, USP, São Paulo, 2012.

WAN, J., QI, G., ZENG, Z., SUN, S., The application of AHP in oil and gas pipeline route selection. In: Geoinformatics, 2011 19th International Conference on. IEEE, p. 1-4, 2011.

WÄRTSILÄ – WÄRTSILÄ Brasil Ltda., Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) da UTE São Geraldo I – Vila Velha (ES), RIMA\_SAOGERALDO\_NOV2010.pdf, versão agosto de 2010, 2010. Disponível em: <http://www.meioambiente.es.gov.br>, SEAMA/ IEMA. acesso em: 29 mar 2019.

YILDIRIM V., AYDINOGLU A. Ç., YOMRALIOGLU T., 27 th Annual ESRI International User Conference konferansi dahilinde "ESRI International User Conference Proceedings CD"



bildiri kitapçığındaki "GIS Based Pipeline Route Selection by ArcGIS in Turkey", 1-6 pp., California, US, Haziran, 2007.

YILDIRIM, V., NISANCI R., FIG Congress 2010 konferansı dahilinde "FIG Congress 2010 Facing the Challenges-Building the Capacity Proceedings CD" bildiri kitapçığındaki "Developing a Geospatial Model for Power Transmission Line Routing in Turkey", 1-12 pp., Sidney, Australia, Nisan 2010.

YILDIRIM, V., YOMRALIOGLU, T., NISANCI, R., A Raster Based Geospatial Model for Natural Gas Transmission Line Routing, ISBN; 978-953-51-0820-7, Natural Gas Extraction to End Use, 101-118, Rijeka, Croatia, 2012.

YILDIRIM, V., Yomralioglu, T., Nisanci, R., Colak, E. H., Bediroglu, S., Memisoglu, T., An Integrated Spatial Method for Minimizing Environmental Damage of Transmission Pipelines, Pol. J. Environ. Stud. Vol. 25, No. 6 (2016), 2653-2563, DOI: 10.15244/pjoes/63655, 2016.

ZANFELICE, F. R., Estratégia de Contratação Ótima na Comercialização de Energia Elétrica, Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ZIMMERMANN, Marcio Pereira; Aspectos técnicos e legais associados ao planejamento da expansão de energia elétrica no novo contexto regulatório brasileiro, Thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Rio de Janeiro, 2008.

## ANEXO 1 - Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso UTE São Geraldo I (ES)

§ONTEXT

*\* Estudo de caso UTE São Geraldo I - Tese de Almir B. dos Santos.*

§OFFTEXT

*\* Declarando os índices do problema referentes às variáveis e equações:*

*Sets i equações /1\*13/*

*j variáveis /1\*27/;*

*\* Declarando como parâmetros os coeficientes da função objetivo, bem como das restrições do problema.*

*Parameter*

*c(j) Coeficientes da função objetivo:*

/	1	6.42
	2	6.42
	3	6.42
	4	6.42
	5	6.42
	6	6.42
	7	10.92
	8	7.90
	9	7.85
	10	16.61
	11	6.89
	12	7.11
	13	16.88
	14	6.90
	15	7.12
	16	20.09
	17	7.48
	18	8.05

19	6.53	
20	5.83	
21	9.11	
22	8.26	
23	7.14	
24	0.6	
25	0.34	
26	4.82	
27	5.45	/;

Parameter

*b(i) Termos independentes das inequações das restrições do problema:*

/	1	-1.0	
	2	0.0	
	3	0.0	
	4	0.0	
	5	0.0	
	6	0.0	
	7	0.0	
	8	0.0	
	9	0.0	
	10	0.0	
	11	0.0	
	12	0.0	
	13	1.0	/;

*\*Declarando os coeficientes das restrições como Tabela.*

*Table a(i,j) Coeficientes das restrições*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

```

5 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0
7 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 0 0 0 0 0
8 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0
9 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0
10 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 -1 0 0
11 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 -1 0
12 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 -1
13 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1

```

*\* Declarando o vetor x.*

*Variable x(j);*

*\* É necessário indicar que o vetor x é positivo.*

*Positive Variable x(j);*

*\* Declarando f como a função objetivo*

*Free Variable*

*f objective function;*

*\* Declarando as restrições e função objetivo. Uma já basta, pois eq1 está em função das i equações.*

*Equations*

*eq1(i) restrições,*

*obj objective function;*

*\* Escrevendo a restrição.*

*eq1(i).. sum(j, a(i,j)\*x(j))=e= b(i);*

*\* Escrevendo a função objetivo.*

*obj.. f=e= sum(j, c(j)\*x(j));*

*\* Informando o método de otimização. Neste caso CPLEX.*

*OPTIONS LP = CPLEX;*

*\* Nome do modelo.*

*model tese /all/;*

*\* Comando para que o GAMS resolva o problema.*

*solve tese using LP minimizing f;*

\* Aqui eu informo como o GAMS mostrará os resultados.

*display f.l, f.m, f.up;*

No GAMS (versão 24.4.3 r51699) o cálculo foi executado em tempo menor que 0,016s, utilizando o solver CPLEX (12.6.1.0) para resolução do programa classificado como LP. O hardware utilizado foi um PC com processador Intel Atom Z3740 de 1.33GHz de clock, memória RAM de 2GB e Sistema Operacional Windows 10 (32-bit). O relatório gerado pelo GAMS indicou os mesmos resultados do Excel, conforme listado abaixo:

```

          S O L V E      S U M M A R Y
MODEL    tese                OBJECTIVE  f
TYPE     LP                  DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER   CPLEX              FROM LINE  102
**** SOLVER STATUS          1 Normal Completion
**** MODEL STATUS           1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE                13.8700
RESOURCE USAGE, LIMIT          0.047      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT         0      2000000000
IBM ILOG CPLEX    24.4.3 r51699 Released Apr  2, 2015 VS8 x86 32bit/MS Windows
Cplex 12.6.1.0
Space for names approximately 0.00 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
LP status(1): optimal
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.02 ticks)
Optimal solution found.
Objective :                13.870000
---- EQU eq1  restrições
      LOWER    LEVEL    UPPER    MARGINAL
1    -1.000    -1.000    -1.000    .
2      .        .        .        6.420
3      .        .        .        6.420
```

4	.	.	.	6.420	
5	.	.	.	6.420	
6	.	.	.	6.420	
7	.	.	.	6.420	
8	.	.	.	17.340	
9	.	.	.	13.310	
10	.	.	.	13.530	
11	.	.	.	12.950	
12	.	.	.	12.250	
13	1.000	1.000	1.000	13.870	
		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
----	EQU obj	.	.	.	1.000

obj objective function

---- VAR x

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	.	.	+INF	.
2	.	<b>1.000</b>	<b>+INF</b>	.
3	.	.	+INF	.
4	.	.	+INF	.
5	.	.	+INF	.
6	.	.	+INF	.
7	.	.	+INF	.
8	.	.	+INF	1.010
9	.	.	+INF	0.740
10	.	.	+INF	5.690
11	.	.	+INF	.
12	.	<b>1.000</b>	<b>+INF</b>	.

13	.	.	+INF	5.960
14	.	.	+INF	0.010
15	.	.	+INF	0.010
16	.	.	+INF	9.170
17	.	.	+INF	0.590
18	.	.	+INF	0.940
19	.	.	+INF	.
20	.	.	+INF	.
21	.	.	+INF	2.580
22	.	.	+INF	2.430
23	.	.	+INF	10.610
24	.	.	+INF	0.040
<b>25</b>	.	<b>1.000</b>	<b>+INF</b>	.
26	.	.	+INF	3.900
27	.	.	+INF	3.830

		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR f		-INF	<b>13.870</b>	+INF	.

## ANEXO 2 - Aplicação da Metodologia - Estudo de Caso UTE Vale do Contestado (SC)

§ONTEXT

\* Estudo de caso - Tese de Almir B. dos Santos em 11/08/2019.

§OFFTEXT

\* Declarando os índices do problema referentes às variáveis e equações:

Sets  $i$  equações /1\*8/

$j$  variáveis /1\*14/;

\* Declarando como parâmetros os coeficientes da função objetivo, bem como das restrições do problema.

Parameter

$c(j)$  Coeficientes da função objetivo:

/	1	6.42	
	2	6.42	
	3	36.15	
	4	36.53	
	5	45.05	
	6	85.21	
	7	77.62	
	8	53.37	
	9	44.67	
	10	48.98	
	11	37.52	
	12	35.42	
	13	35.78	
	14	44.69	/;

Parameter

$b(i)$  Termos independentes das inequações das restrições do problema:

/	1	-1.0	
---	---	------	--



2	0.0	
3	0.0	
4	0.0	
5	0.0	
6	0.0	
7	0.0	
8	1.0	/;

*\*Declarando os coeficientes das restrições como Tabela.*

*Table a(i,j) Coeficientes das restrições*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	-1	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	-1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

*\* Declarando o vetor x.*

*Variable x(j);*

*\* É necessário indicar que o vetor x é positivo.*

*Positive Variable x(j);*

*\* Declarando f como a função objetivo*

*Free Variable*

*f objective function;*

*\* Declarando as restrições e função objetivo. Uma já basta, pois eq1 está em função das i equações.*

*Equations*

*eq1(i) restrições,*

*obj objective function;*

\* Escrevendo a restrição.

```
eq1(i).. sum(j, a(i,j)*x(j))=e= b(i);
```

\* Escrevendo a função objetivo.

```
obj.. f =e= sum(j, c(j)*x(j));
```

\* Informando o método de otimização. Neste caso CPLEX.

```
OPTIONS LP = CPLEX;
```

\* Nome do modelo.

```
model tese /all/;
```

\* Comando para que o GAMS resolva o problema.

```
solve tese using LP minimizing f;
```

\* Aqui eu informo como o GAMS mostrará os resultados.

```
display f.l, f.m, f.up;
```

No GAMS (versão 24.4.3 r51699) o cálculo foi executado em tempo menor que 0,001s, utilizando o solver CPLEX (12.6.1.0) para resolução do programa classificado como LP. O hardware utilizado foi um PC com processador Intel Atom Z3740 de 1.33GHz de clock, memória RAM de 2GB e Sistema Operacional Windows 10 (32-bit). O relatório gerado pelo GAMS indicou os mesmos resultados do Excel, conforme listado abaixo:

```

                S O L V E      S U M M A R Y
MODEL   tese                OBJECTIVE   f
TYPE    LP                  DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER  CPLEX               FROM LINE 81
**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE           78.3700
RESOURCE USAGE, LIMIT           0.031      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT          0      2000000000
IBM ILOG CPLEX    24.4.3 r51699 Released Apr 2, 2015 VS8 x86 32bit/MS Windows
Cplex 12.6.1.0
Space for names approximately 0.00 Mb
```

Use option 'names no' to turn use of names off

LP status(1): optimal

Cplex Time: 0.00sec (det. 0.01 ticks)

Optimal solution found.

Objective : **78.370000**

---- EQU eq1 restrições

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	-1.000	-1.000	-1.000	-78.370
2	.	.	.	-71.950
3	.	.	.	-80.450
4	.	.	.	-37.520
5	.	.	.	-35.420
6	.	.	.	-35.780
7	.	.	.	-44.690
8	1.000	1.000	1.000	.

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- EQU obj	.	.	.	1.000

obj objective function

---- VAR x

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
<b>1</b>	.	<b>1.000</b>	+INF	.
2	.	.	+INF	8.500
3	.	.	+INF	1.720
<b>4</b>	.	<b>1.000</b>	+INF	.
5	.	.	+INF	8.880
6	.	.	+INF	57.950

7	.	.	+INF	34.690
8	.	.	+INF	8.340
9	.	.	+INF	.
10	.	.	+INF	13.220
11	.	.	+INF	.
<b>12</b>	.	<b>1.000</b>	+INF	.
13	.	.	+INF	.
14	.	.	+INF	.

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR f	-INF	<b>78.370</b>	+INF	.

### ANEXO 3 – O Método Multicritério AHP – Processo Analítico Hierárquico

O método de análise hierárquica, também conhecido como método AHP (Analytic Hierarchy Process), foi desenvolvido por Thomas L. Saaty no final da década de 1970. Neste método o problema de decisão é desmembrado em níveis hierárquicos e é calculada uma medida global para cada uma das alternativas, priorizando-as (GOMES, ARAYA e CARIGNANO, 2004).

No método AHP são realizadas comparações entre os vários critérios avaliados para classificar as possíveis soluções do problema. O resultado das comparações fornece pesos relativos de cada elemento de mesmo nível hierárquico, que são utilizados para realizar as ponderações essenciais ao processo de tomada de decisão.

Os fatores e critérios avaliados no processo de tomada de decisão são divididos em níveis de hierarquia. O objetivo principal é atribuído ao primeiro nível. Os fatores considerados para se atingir o objetivo são atribuídos ao segundo nível. O terceiro nível compreende as alternativas ou critérios avaliados na solução. No caso em estudo o nível mais alto da hierarquia é a escolha do “melhor traçado” da infraestrutura, conforme tabela 32. Com base na análise dos fatores mais utilizados no levantamento da experiência internacional (tabelas 2, 3 e 4 do capítulo 4), o segundo nível hierárquico de escolha engloba: preocupação social, meio físico, meio biótico e aspectos técnicos. Também foram identificados os critérios que compõem o terceiro nível hierárquico, ou seja, o nível que contém as alternativas que serão ponderadas, a saber: densidade populacional, declividade, geologia, florestas / reservas, rios / lagoas e estradas.

Tabela 32 - Níveis hierárquicos, fatores e critérios selecionados

Nível A	Nível B	Nível C
Traçado da Faixa	Preocupação Social (B1)	Densidade Populacional (C1)
	Meio Físico (B2)	Declividade (C2)
		Geologia (C3)
	Meio Biótico (B3)	Florestas / Reservas (C4)
		Rios / Lagoas (C5)
	Aspectos Técnicos (B4)	Estradas (C6)

O método consiste em medir, por meio da comparação par a par, o grau de importância relativa (IR) do elemento de um determinado nível, sobre aqueles de um nível inferior. Para tal, o tomador de decisão avalia a importância relativa, a partir de uma escala linear (Escala Fundamental de Saaty) que varia de 1 (menor importância) a 9 (maior importância). A tabela 33 apresenta a matriz dos resultados das importâncias relativas referentes ao segundo nível hierárquico: preocupação social (B1), meio físico (B2), meio biótico (B3) e aspectos técnicos (B4). Observa-se que as células da matriz  $A_{ij}$  nas quais o valor  $i=j$  irão sempre ter importância relativa igual a 1, dado que o critério em avaliação sempre será igual a ele mesmo. Adicionalmente, as células da matriz  $A_{ij}$  e  $A_{ji}$  sempre terão o valor de importância relativa com valor inverso entre si.

Tabela 33 – A matriz do valor da importância relativa no segundo nível hierárquico

IR	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>
<b>B1</b>	1.00	0.11	0.11	0.25
<b>B2</b>	9.00	1.00	0.20	0.50
<b>B3</b>	9.00	5.00	1.00	0.50
<b>B4</b>	4.00	2.00	2.00	1.00

Já a tabela 34 apresenta os resultados das médias geométricas (MG) das importâncias relativas referentes ao segundo nível hierárquico. A título de ilustração, o cálculo da média geométrica das importâncias relativas correspondentes ao fator B4 equivale a:  $(4.00 \times 2.00 \times 2.00 \times 1.00)^{\frac{1}{4}}$ , ou seja, 2.

Tabela 34 – As médias geométricas das IRs do segundo nível hierárquico

	<b>MG</b>
<b>B1</b>	0.24
<b>B2</b>	0.97
<b>B3</b>	2.18
<b>B4</b>	2.00

As médias geométricas (MG) dos valores das importâncias relativas são, então, utilizadas no cálculo das prioridades relativas (PR), conforme disposto na tabela 35. A título de ilustração, o cálculo da prioridade relativa das médias geométricas dos valores das importâncias relativas correspondentes ao fator B4 equivale a:  $0.24 / (0.24 + 0.97 + 2.18 + 2.00)$ , ou seja, 0.3712.

Tabela 35 – As prioridades relativas das MGs do segundo nível hierárquico

	PR
<b>B1</b>	0.0437
<b>B2</b>	0.1808
<b>B3</b>	0.4042
<b>B4</b>	0.3712

Cabe ressaltar que a prioridade relativa do critério C1 corresponde ao valor da prioridade relativa do fator B1, pois ambos, apesar de estarem em níveis diferentes, estão diretamente associados. Por analogia, se pode dizer da prioridade relativa do critério C6 corresponde ao valor da prioridade relativa do fator B4. A mesma afirmação não se pode dizer dos critérios, C2 e C3 (associados ao fator B2), bem como dos critérios C4 e C5 (associados ao fator B3). Para estes dois casos, deverão ser avaliadas as matrizes do valor da importância relativa do terceiro nível hierárquico, assim como averiguados seus valores de MG e PR.

As tabelas 36 e 37 exibem, respectivamente, as prioridades relativas, médias geométricas e matrizes de importâncias relativas do terceiro nível hierárquico para os fatores B2 (meio físico) e B3 (meio biótico).

Tabela 36 – PR, MG e matriz do valor da IR no terceiro nível hierárquico para B2

<b>B2</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>		<b>MG</b>		<b>PR</b>
<b>C2</b>	1.00	0.50	<b>C2</b>	0.71	<b>C2</b>	0.3333
<b>C3</b>	2.00	1.00	<b>C3</b>	1.41	<b>C3</b>	0.6667

Tabela 37 – PR, MG e matriz do valor da IR no terceiro nível hierárquico para B3

<b>B3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>		<b>MG</b>		<b>PR</b>
<b>C4</b>	1.00	0.33	<b>C4</b>	0.58	<b>C4</b>	0.2500
<b>C5</b>	3.00	1.00	<b>C5</b>	1.73	<b>C5</b>	0.7500

Uma vez calculadas todas as prioridades relativas, torna-se necessário ponderar as prioridades relativas do terceiro nível hierárquico em relação ao segundo nível hierárquico. A título de ilustração, o cálculo da média ponderada da prioridade relativa do critério C2 com relação ao fator B2 equivale a:  $0.1808 \times 0.3333$ , ou seja, 0.0603. Já o cálculo da média ponderada da prioridade relativa do critério C5 com relação ao fator B3 equivale a:  $0.4042 \times 0.7500$ , ou seja, 0.3032. A tabela 38 exhibe os resultados (pesos) dos critérios a serem considerados nesta tese para se calcular a superfície de custo a ser utilizada no problema de busca do melhor traçado de uma infraestrutura interligada em uma usina termelétrica a gás natural.

Tabela 38 - Resultados (pesos) do cálculo da prioridade relativa geral dos critérios

<b>Critério</b>	<b>Prioridade Relativa Geral (Peso)</b>
Densidade Populacional (C1)	0.0437
Declividade (C2)	0.0603
Geologia (C3)	0.1205
Florestas / Reservas (C4)	0.1011
Rios / Lagoas (C5)	0.3032
Estradas (C6)	0.3712



**ANEXO 4 – Artigos publicados pelo autor relacionados com o tema da tese**

IBP\_1295\_19

**THE MOST CRITERIA AND OPTIMIZATION  
PRACTICES USED IN THE SEARCH FOR THE  
BEST ROUTES OF INFRASTRUCTURE  
INTERCONNECTED IN GAS-FIRED POWER  
PLANTS**

Almir Beserra dos Santos<sup>1</sup>, Erika Christina Ashton  
Nunes Chrisman<sup>2</sup>

**Copyright 2019, Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute - IBP**

This Technical Paper was prepared for presentation at the *Rio Pipeline Conference and Exhibition 2019*, held between 03 and 05 of September, in Rio de Janeiro. This Technical Paper was selected for presentation by the Technical Committee of the event according to the information contained in the final paper submitted by the author(s). The organizers are not supposed to translate or correct the submitted papers. The material as it is presented, does not necessarily represent Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute' opinion, or that of its Members or Representatives. Authors consent to the publication of this Technical Paper in the *Rio Pipeline Conference and Exhibition 2019*.

---

**Abstract**

Pipeline Right of Way determination is a complex problem and determined by its geographic location, environment, geological condition, among others. Pipelines and transmission lines are complex interconnected long-distance infrastructure in gas-fired Thermal Power Plants (TPP). The route choice for these infrastructures involves the simultaneous analysis of different data sources and other information. There are multiple and common factors and criteria that affect the selection of the best location for a gas fired TPP. The existence of multiple conflicting criteria contributes to make this analysis more complex. The relationship between criteria and each of the types of infrastructure interconnected can have positive or negative effects. The objective of choosing the best location for a gas fired TPP is to maximize the overall value of the power plant, reduce its transmission cost, minimize impact on environment and maximize the power plant's productivity. These facts together serve as a motivation for further studies to be drawn up about the best criteria and procedures that entrepreneurs can use for choosing the best location of future gas fired TPP interconnected in Brazilian pipelines and the best route of its auxiliary infrastructure. This paper major contribution is a critical review of the criteria and optimization practices used in the search for the best routes of pipelines and transmission lines interconnected for a gas fired TPP. Lower costs of right of way, materials, design & construction and assembly of pipelines infrastructure can contribute to the reduction of natural gas and electric energy transportation tariff.

**Keywords:** Optimization, Pipeline, Power Plant, Transmission Line, Route Selection, Right of Way.

---

<sup>1</sup> Student of Engineering of Chemical and Biochemical Processes (EPQB) UFRJ DSc. Program, Engineer, ANP (Brazilian Petroleum National Agency), Brazil.

<sup>2</sup> Professor of EPQB UFRJ MSc. And DSc. Program, Industrial Chemistry, Department of Organic Processes (DPO), Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Brazil.

## 1. Introduction

Natural gas is the highest growth potential energy source in the world scenario until 2035 [BP, 2014]. There are several types of consumers, who use varying amounts of natural gas daily. The natural gas-fired Thermal Power Plant (TPP) is considered a large consumer. The thermal generation corresponded to more than 20% of the Brazilian power system load since 2012 [ROMEIRO et al., 2016]. Currently, Brazil imports natural gas, mainly from Bolivia by the Bolivia-Brazil pipeline (GASBOL) as well as LNG.

It is important to use the best criteria for natural gas-fired TPP design, because lower costs of equipment, construction and assembly may contribute to the reduction of natural gas and electric energy transportation tariffs [SANTOS & CHRISMAN, 2016].

Recently the Brazilian government published the Decree 9.616/2018 that aims to guide the design of the new natural gas market in Brazil. This Decree also aims to improve the legal framework of the gas transportation sector for the entry of new agents and established that indicative pipeline plan should be done.

These facts together serve as a motivation for further studies to be drawn up about the best criteria and procedures that entrepreneurs can use for choosing the best location of future gas-fired TPP interconnected in Brazilian pipelines and the best route of its auxiliary infrastructure.

## 2. Theory Review

Typically, a gas-fired TPP external infrastructure is composed by transmission lines, gas and water pipelines. The length of each auxiliary infrastructure can be either big or small and this can directly contribute to infrastructure investment costs and risks [SANTOS & CHRISMAN, 2016].

Generally, location selection for gas-fired TPP is governed by traditional manually way of decision-making or by political interests. The traditional decision-making approach considers cost and resource availability and then generally selects location near the fuel supply or near to the water source. Often the traditional manually way of decision making can resulting into high operational and transmission cost, low productivity, and tremendous negative impact on society due to increased environmental pollution [CHOUDHARY & SHANKAR, 2012]. The least-impact path route optimization method is the focus of this article.

The objective of choosing the best location for a gas-fired TPP is to maximize the overall value of the power plant, reduce the cost of both power generation and transmission, minimize impact on environment and maximize the power plant's productivity [CHOUDHARY & SHANKAR, 2012].

Nowadays a pipeline project is carried out with the aid of a Georeferenced Information System (GIS) [CASTRO et al., 2018]. GIS is one of the tools to perform this analysis effectively and provides many analytical functions, like rasterization of vector layers, which can replace manual and traditional methods of infrastructure route planning [YILDIRIM et al., 2012]. Finding an optimal pipeline route using GIS can be accomplished using a least cost path algorithm [BALOGUN et al., 2013]. The GIS software run algorithms integrated that can be used for finding the least-cost path of each gas-fired TPP auxiliary infrastructure. ArcGIS software products of the ESRI uses Dijkstra's algorithm for finding the least-cost path [EROĞLU & AYDIN, 2015]. In Dijkstra's Algorithm, the entire grid is searched. So, Dijkstra's

Algorithm is considered a better method [KANG & LEE, 2017]. The software QGIS function network analysis library also implements Dijkstra's algorithm [MANDEL et al., 2016].

A long-distance infrastructure is a complex system and relates closely to geographic location, environment, geological condition and many other [YILDIRIM et al., 2007]. Once the maps showing opportunities and constraints that cover the study area have been determined, the factors and attributes that should be analyzed are studied, in order to establish the criteria and weights that will be part of a model to determine the best route [GIMENES & AUGUSTO FILHO, 2013]. The accuracy of the results for this model is directly proportion of the quality of the information used [YILDIRIM et al., 2012]. Caution is required to assign weights to factors. The most inventive task in making a decision is to choose the factors that are important for that decision [SAATY, 1990].

Least-cost path analysis allows designers to find the lower cost way to connect two locations within a cost surface created in GIS software which can be computed by combining multiple criteria, and therefore by accounting for different issues [EF-FAT & HASSAN, 2013]. Various types of combinations exist and rely on Multi-Criteria Decision Methods – MCDM or Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA, Analytical Hierarchy Process – AHP, or Multiple Attribute Utility Theory – MAUT [ABS, 2016].

There are many academic contributions related to decision-making problems combining multiple criteria [BHUSHAN & RAI, 2004], [ABUDU & WILLIAMS, 2015]. There are multiple and common factors and criteria that affect the selection of the best location of the infrastructure of gas-fired TPP. The main group of factors and criteria are cost / economic impact, availability of resources, accessibility, biological environment aspects, physical environment aspects, socio-economic development, social concern and technical aspects. There are many contributions related to these groups, such as: 1) [CHOUDHARY & SHANKAR, 2012], 2) [AJAYI & OLAMIDE, 2014], 3) [SHARMA et al., 2015], 4) [SAMBASIVARAO, et al., 2014], 5) [PETROBRAS, 2014], 6) [EPE 2013], 7) [MACHARIA & MUNDIA, 2014], 8) [DEY & GUPTA, 2000], 9) [NONIS et al., 2007], 10) [WAN et al., 2011], 11) [GAMARRA, 2015], 12) [MATOSINHO et al., 2010], 13) [ELETROBRAS, 1997], 14) [DEDEMEN, 2013], 15) [BELÉM et al., 2009], 16) [MONTEIRO et al., 2005], 17) [BAGLI et al., 2011], 18) [LIMA, 2015], 19) [YILDIRIM & NISANCI, 2010], 20) [KAOUSIAS et al., 2012], 21) [EROĞLU & AYDIN, 2015] and 22) [GILL, 2005]. The main features of these contributions will be presented below.

## **2.1. Cost / Economic Impact**

Land acquisition cost was the most considered criteria. In general, cost concerns in the studies were concentrated in the gas-fired TPP.

## **2.2. Availability of Resources**

Fuel availability was the most considered criteria. This is an important issue and indicates that it is strategic for a gas-fired TPP to be as close as possible to a gas pipeline. The concern about water availability indicates that the gas-fired TPP must be close to water to use as a refrigerant during the electric power generation process. In the pipeline and transmission line studies, land availability was not presented as a constraint, despite some cited concern about its cost.

## **2.3. Accessibility**

A concern about road/rail/airport accessibility indicates that all gas-fired TPP installations must be close to infrastructure to facilitate its construction, operation and maintenance. The concern about use existing right-of-way or routing near roads is another important issue. The purpose of these criteria is to make the project follow the same path taken by existing projects and which have already undergone environmental licensing processes, since these processes are considered as a major obstacle to the pipeline projects. In none of the transmission lines studies, there was concern about use existing right-of-way or routing near roads. It is reasonable that this criteria has not been prioritized because in this way it avoids the possibility of exposure of humans and other ventures (railways, pipelines and telecommunication lines) to electric fields or electromagnetic interference generated by the transmission line.

#### **2.4. Biological Environment Aspects**

It is possible to observe that avoiding water bodies (rivers, canal, lakes, wetlands, streams and flooded areas), reserved / native forest areas and land use/impacts, such as conservation units and sensitive areas (like national parks, reserves and sanctuaries) were the most adopted aspect. The concern about distance from environmentally sensitive areas is an important issue. These criteria indicate that it is strategic that the gas pipeline and transmission line design should privilege remote areas but avoid crossing with environmentally sensitive areas. The concerns related to air quality such as CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, pollution and corrosive (industrial or coastal) areas. The concern about avoid low quality air (pollution / corrosive) are important issue and indicates that it is strategic that the transmission lines design should privilege areas that do not increase costs to prevent infrastructure corrosion.

#### **2.5. Physical Environment Aspects**

Avoid steep slope areas was the most considered criteria. This is in a positive way that contributes to accessibility during gas pipeline and transmission line operation and maintenance, as well as construction costs. Avoid hilly / ridges areas, avoid unfavorable soil type and avoid subject to erosion / mudslides / landslides areas contributes to reduce the project complexity. These criteria can be considered essential and this fact indicates that they should have considerably higher weight than other less relevant ones. The concern about climate include avoid high rainfall / wind / snowfall / lightning / thunderstorm areas and indicates concern to prevent possible shut-downs of the transmission line. Some criteria, such as avoid Iceland areas, apply to certain countries, but not all of them.

#### **2.6. Socio-Economic Development**

Avoid agricultural lands include silviculture lands, farmland, grassland and settlements was the most adopted aspect. This contributes to reduce impact during gas pipeline and transmission line design, mainly.

#### **2.7. Social Concern**

Avoid population center and industrial/services areas (urban areas, cities, towns, etc.) was the most adopted aspect. Relevant note that cultural heritage aspect also includes tourism and recreation. As a negative highlight, avoiding national defense sites, ports and airports/aerodromes crossings was not considered in all transmission line studies. The proximity of transmission lines with airports/aerodromes is an extremely relevant factor, both

from the point of view of people safety and the preservation of the transmission line integrity. Another relevant issue is that only three studies there was concern for avoid indigenous lands. This is a very sensitive issue for countries with large areas of forests such as Brazil.

## **2.8. Technical Aspects**

It is possible to observe that avoiding urban roads and secondary roads crossings and avoid population center was the most adopted aspect. As a negative highlight, avoiding transmission lines crossings was considered in only two pipeline studies, but in fact it should be present in all of them. A transmission lines crossing requires additional attention during the design of of cathodic protection systems. Failure to maintain this system can cause corrosion problems and reduce pipeline life. The risk aspect was considered in only one study, but in fact it should be present in all studies. The concern about preferred shortest possible route (lowest cost) was considered in a short number of studies. It is reasonable that this criterion has not been prioritized because there could be a risk of environmentally sensitive areas or urban centers being crossed.

The simultaneous application of some criteria can influence both positively and negatively the implementation of the gas pipeline. This highlights the positive / negative influence that one aspect provides in relation to others. Choosing a remote area (avoid population center) to install the gas-fired TPP is in a positive way according to the following criteria: distance from public area, land acquisition cost, number of relocation and public acceptance.

On the other hand, the distance from the major centers may contribute negatively to operation and maintenance cost, skilled work force availability, effect on agriculture, as well as electricity consumption point accessibility. The existence of multiple conflicting criteria contributes to make the analysis more complex. The influence one aspect provides over another is a feature of the problem and can be minimized by applying the criteria weights.

It is worth highlighting the variety and quantity of criteria used in transmission lines route selection analysis, which was greater than that observed in other infrastructures. An important aspect is that the simultaneous application of some criteria can positively influence the implementation of part of the project (gas-fired TPP and transmission line) and negatively another part (pipeline).

The simultaneous application of criteria such as distance from public area e avoid population center and industrial/services areas (urban areas, cities, towns, etc.), although act positively when analyzed each part of the project, it can affect, it may affect the project as a whole, as a strategy to keep the distance from populated areas can result in increasing of the transmission line and the pipeline length. Caution is required in choosing the weights to be assigned to the criteria. An oversized weight could unnecessarily increase the of transmission line and pipeline length and thereby increase the total cost of the project.

On the other hand, the simultaneous application of lowest infrastructure cost (preferred shortest possible route) in pipelines and transmission lines, while being reasonable in isolation, produces opposite effects. The selection of a shorter transmission line may result in the need to selection of a longer pipeline. A shorter gas pipeline allows a lower pressure to drop between the natural gas injection point and the delivery point for the gas-fired TPP. The pressure drop per kilometer value is a relevant parameter in the design of a gas pipeline [MOHITPOUR et. al., 2007]. This parameter can determine the need for implementation of a compressor station to increase the pressure, increasing the project cost. The selection of a shorter pipeline may result in the need to selection of a longer transmission line.

Opposite effects may also be observed in the simultaneous application of criteria related to proximity to other infra-structures, since while in the gas pipeline project one wishes to take

advantage of existing right-of-way of telecommunication lines (to reducing cost with the purchase of land), in the transmission line design it is necessary to keep distance from these installations because of the interferences.

A similar situation can be observed in the criteria related to the proximity of sites with water availability, because while the ideal is a gas-fired TPP being located near places with water availability (a river, for example), the transmission line and the pipeline should be located far from such places.

### 3. Methodology

It is important to point out that there are currently separate methodologies to conduct pipeline and transmission line studies, although both using the same software (GIS) and covering the same decision-making problems combining multiple criteria (MCDM). In other words, current methodologies study the route selection of their infrastructures independently, often performed at different times and by different people or institutions.

The fact of performing the calculation of optimized layout of each infrastructure separately, not necessarily simply means that the global location of the plant along with its infrastructures was reached. The main characteristics of the methodologies evaluated to make the selection of the best location of the infrastructure of gas-fired TPP: obtaining the georeferenced data, the pre-processing of the data (creation of the layers), the processing of GIS data (classification, weights assignment according to each chosen criteria and convert to raster), the creation of a cost surface, an optimization step by GIS software, and preparation of maps for final analysis and alternative choice [GAMARRA, 2015].

Some methodologies have more preparatory steps: (i) identify factors specific to the [NONIS et al., 2007]; (ii) determining of alternatives routes [DEY & GUPTA, 2000], [YILDIRIM & NISANCI, 2010]; (iii) MCDM analysis [YILDIRIM & NISANCI, 2010]; and (iv) risk analysis [ABS, 2016].

An integrated methodology must include the steps listed below:

- a) Determine the alternatives for projects of electric power generation facilities and gas pipeline installations identified in the indicative and determinative studies carried out by the federal government;
- b) Establish premises to delimit the study area considering the alternative locations of the power plant energy destination;
- c) Establish the method, criteria and weights to be adopted in decision-making, taking account the most criteria considered in 22 studies surveyed in this paper;
- d) Establish the method, software algorithm to be adopted in the solution of the problem of route selection with the least cost path;
- e) Collect data of interest, including georeferenced data and material cost data;
- f) Carry out the selection, treatment and tabulation of the study area data;
- g) Perform the pre-processing of the georeferenced data;
- h) Perform GIS Data Processing;
- i) Analyze the data of interest and identify the opportunities and constraints making use of the study area maps;
- j) Create a cost surface using MCDM analysis;
- k) Perform the routing through GIS software optimization technique;
- l) Prepare the maps for final analysis and choose the most advantageous alternatives of each interest area under analysis;
- m) Carry out the calculation of the cost of each alternative in an integrated way (pair transmission line - pipeline installations);

- n) Prepare mathematical models of the cost functions related to each alternative;
- o) Define the objective function to minimize the total cost and find the optimal integrated solution; and
- p) Analyze and validate the results.

#### 4. Results

A descriptive statistical analysis indicates the most criteria considered in the 22 studies surveyed is listed below, with the respective percentage: (i) Avoid reserved / native forest areas and land use/impacts (81,8%); (ii) Avoid water bodies areas (81,8%); (iii) Avoid population centers and industrial/services areas (72,7%); (iv) Avoid urban roads and secondary roads crossings (68,2%); (v) Avoid Steep slope areas (63,6%); (vi) Avoid Conservation Units and areas like national parks, reserves, sanctuaries (63,6%); (vii) Avoid agricultural and silviculture lands / farmland / grassland / settlements (54,5%); (viii) Avoid geological hazards, high curvature and sedimentary areas (50%). The other criteria were considered in less than half of the studies.

The Table 1 compares criteria descriptive statistics data of theory review. A basic statistical analysis indicates that sample variance value of the criteria used for selecting the location of the gas-fired TPP is smaller than the value of the sample standard deviation. This indicates a smaller spreading criterion in relation to the adopted in the auxiliary infrastructures. The sample variance value of the criteria used for selecting the location of the transmission line is three times that the value of the sample standard deviation. This indicates a greater spreading criterion in relation to the adopted in the others infrastructures. The explanation for this greater dispersion is that pipelines and transmission lines have large dimensions and are subject to more interference over its length compared with gas-fired TPP. Also important to note that the samples of the criteria used for selecting the transmission line location are those with the lowest average, considering the maximum number of samples evaluated in each type of auxiliary infrastructures. Moreover, there was no occurrence of common criteria contained in all analyzed criteria used for selecting the location of the transmission line.

**Table 1** - Summary statistics of criteria by installation type, elaborated by the authors.

	Gas-fired TPP	Pipeline	Transmission Line
Mean	1,848	2,900	3,833
Standard Error	0,152	0,372	0,435
Median	2	2	3
Mode	1	1	1
Standard Deviation	0,870	2,040	2,819
Sample Variation	0,758	4,162	7,947

Trace studies should always aim to affect as little as possible the environment. In addition, there are other additional criteria that should be considered in these problems, such as the natural gas cost, the transportation tariff value, etc. Optimization techniques are applicable to solving these types of problems.

#### 4. Conclusions

There are currently separate methodologies to conduct pipeline and power transmission line projects, although both using the same software (Georeferenced Information System – GIS) and covering the same decision-making problems combining multiple criteria (MCDM).



The spatial analysis through GIS software has evolved considerably over the last few years, with Least-Cost Path plug-in to find the least cost path using Dijkstra's algorithm. Despite this, the GIS software does not help unless there is a methodology and procedure for choosing best route solution. The current methodologies study should be integrated. It also relevant gather governments and public inputs in this integration process, including ANP, ANEEL, EPE, IBAMA, etc. The route studies should be presented to all stakeholders and institutions involved before its completion.

The analysis of the best solution must be performed taking into account the list of criteria considered in the studies surveyed plus criteria associated with specific characteristics related to the type of infrastructure, locality and country conditions.

Once the integrated study is completed it is important to have a public forum to gather local governments and public input. The route choice for these infrastructures may involve the simultaneous analysis of data and information collected at different times. This fact demands that at the end of the process (before procurement or construction), several visits should be carried out along the route to verify if there are changes that affect the choice made.

The main finding of this paper is that the best integrated method to identify and select gas-fired TTP infrastructure path is using least-impact path route optimization with GIS processing to minimize conflicting criteria and to define an optimized route encompassing simultaneously all infrastructures alternative located on impact composite surfaces.

## 5. Acknowledgements

The authors would like to thank Brazilian Petroleum National Agency (ANP) for partial release the DSc. student to participate in the Technology of Chemical and Biochemical Processes Program at Federal University of Rio de Janeiro.

## 6. References

- ABS. American Bureau of Shipping, GUIDANCE NOTES ON SUBSEA PIPELINE ROUTE DETERMINATION, 2016, file "ABS-Guidance-on-Pipeline-Route-Determination-2016\_12.pdf" available in <https://www.safety4sea.com/wp-content/uploads/2016/12/>, 2016.
- ABUDŪ, Dan; WILLIAMS, Meredith. GIS-based Optimal Route Selection for Oil and Gas Pipelines in Uganda. *Advances in Computer Science: an International Journal*, [S.l.], p. 93-104, jul. 2015. ISSN 2322-5157. Available at: <<http://www.acsij.org/acsij/article/view/83>>. Date accessed: 19 Jul. 2017.
- AJAYI, K. T.; OLAMIDE, O. O.; Multi-Criteria Analysis of Power Plants in Nigeria; *Global Science and Technology Journal* Vol. 2. No. 2. September 2014 Issue. Pp.1-22, Available at: <http://www.gstjpapers.com/>, 2014.
- BAGLI, Stefano; GENELETTI, Davide; ORSI, Francesco; Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts; *Environmental Impact Assessment Review*; Elsevier; 2011.
- BALOGUN, Abdul-Lateef; MATORI, Abdul Nasir; YUSSOF, Khamaruzaman; LAWAL, DANO Umar; CHANDIO, Imtiaz Ahmed; GIS in pipeline route selection; Available at: <http://mycoordinates.org/gis-in-pipeline-route-selection/>, 2013.
- BELÉM, F. L.; PIMENTA, L. C. A.; FONSECA, A. R.; REZENDE, D. T.; ROCHA, F. T.; BOSQUE M. M., MESQUITA R. C., TAVARES T. H. B. C., SOUZA A. R.; FERRAMENTA PARA SELEÇÃO DE CORREDOR DE LINHA AÉREA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO, XIV Simpósio Brasileiro de

- Sensoriamento Remoto, Natal. Anais dos XIV SBSR-Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São Jose dos Campos: Ed Inpe; Vol. 1, Págs. 3559-3566, 2009.
- BP, "Statistical Review of World Energy – June 2014", available on [www.bp.com/statisticalreview/](http://www.bp.com/statisticalreview/), 2014.
- BHUSHAN, Navneet; RAI, Kanwal; Strategic Decision Making - Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierachy Process; Springer-Verlag London; 2004.
- DEY, Prasanta K.; GUPTA, Saumitro Sankar; Decision-support system yields better pipeline route; Oil & Gas Journal; 2000.
- CHOUDHARY, Devendra; SHANKAR, Ravi. An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India. Energy, v. 42, n. 1, p. 510-521, 2012.
- CASTRO, Carolina O.; Silva, Luiz P. B.; Rangel, Henrique P. G., Costa, Gabriel F.; "IBP1291\_18 Georreferenciamento da Infraestrutura de Gás Natural Brasileira", Rio Oil & Gas Expo and Conference, available on <https://www.ibp.org.br/>, 2018.
- DEDEMEN, Y. İ. Ğ. İ. T. A multi-criteria decision analysis approach to GIS-based route selection for overhead power transmission lines. Diss. PhD thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2013.
- EFFAT, Hala A.; HASSAN, Ossman A; "Designing and evaluation of three alternatives highway routes using the Analytical Hierarchy Process and the least-cost path analysis, application in Sinai Peninsula, Egypt." The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 16.2 (2013): 141-151.
- ELETROBRÁS; Diretrizes para o Projeto Básico de Sistemas de Transmissão - Linhas e Subestações; DNAEE - Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica; file "manual\_eletrbras.pdf" available on [www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/](http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/), 1997.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, Plano de Expansão Decenal da Malha de Gasodutos de Transporte – PEMAT 2022, 2013.
- EROĞLU, HASAN; AYDIN, Musa. Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, v. 23, n. 5, p. 1418, 2015.
- GAMARRA, Americo. GIS suitability modeling to support a pipeline route selection. ESRI User Conference, 2015.
- GILL, Ramandeep Singh; Electric Transmission Line Routing Using a Decision Landscape Based Methodology; Thesis; Wichita University; 2005.
- GIMENES, Filipe Biaggioni Quessada; AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 16, 2013.
- KANG, Ju Young; LEE, ByungSuk. Optimization of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017.
- KAOUSIAS, Kaousias.; ZONTOS, Stelios; THALASSINAKIS, Emmanuel; VITELLAS, Isidoros; WSEAS (Organization) in Energy and environment; Recent researches in environmental and geological sciences; 371-376 von WSEAS Press, [Greece]; 2012.
- LIMA, Rodolfo Mendes; Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas (SIG). 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- MACHARIA PETER, M. I.; MUNDIA, Charles N. GIS Analysis and Spatial Modelling for Optimal Oil Pipeline Route Location: A Case Study of Proposed Isiolo Nakuru Pipeline Route; International Journal of Science and Research (IJSR), 2014.

- MANDEL, A., FERRERO, V.O.; GRASER, A; BRUY, A.; QGIS 2 Cookbook. Packt Publishing Ltd, 2016.
- MME. Ministério de Minas e Energia, 'Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural', Edition no. 121 (Mar/17), available on <http://www.mme.gov.br>, 2017.
- MATOSINHO, K.G.; FURTADO, R.C.; VIEIRA, H.M.; SERRAN, F.P.; SILVA, L.A.; "C3\_103\_2010 Evolution of environmental management of transmission lines in Brazil – improvements, challenges and prospects", CIGRE, 2010.
- MOHITPOUR, M.; GOLSHAN, H.; MURRAY, A.; Pipeline Design & Construction: A Practical Approach, Third Edition (Pipelines and Pressure Vessels), 2007.
- MONTEIRO, Cláudio; RAMÍREZ-ROSADO, Ignacio J.; MIRANDA, Vladimiro; ZORZANO-SANTAMARÍA, Pedro J.; GARCÍA-GARRIDO, Eduardo; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, L. Alfredo; GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization. IEEE transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 934-942, 2005.
- NONIS, Colin Nithin; VARGHESE, Koshy; SURESH, K. S. Investigation of an AHP Based Multicriteria weighting scheme for GIS routing of cross country pipeline projects. 24th int. sym. on aut. and rob. in constr, 2007.
- PETROBRAS, Petróleo Brasileiro S.A.; Estudo de Impacto Ambiental (EIA) Gasoduto Rota 3 - Parte I, file "analise-de-alternativas.pdf" available on <http://rj.rap.gov.br/rj-gasoduto-rota-3-bacia-de-santos/>, 2014.
- ROMEIRO, D. L.; ALMEIDA, E.; LOSEKANN, L.; "IBP2090\_16 TERMELÉTRICAS ESTRUTURANTES A GÁS NATURAL: CONCEITO, PROPOSTA E DESAFIOS", Rio Oil & Gas Expo and Conference, available on <https://www.ibp.org.br/>, 2016.
- SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European journal of operational research, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.
- SAMBASIVARAO, K.; RAJ, D. Kavın; DUA, Deepika. An Expert System for Site Selection of Thermal Power Plants; Journal of Basic and Applied Engineering Research, 2014.
- SANTOS A. B., CHRISMAN, E. C. A. N., "IBP2131\_16 ANÁLISE DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRAÇADO DE GASODUTOS PARA SUPRIR NOVAS TERMELÉTRICAS", Rio Oil & Gas Expo and Conference, available on <https://www.ibp.org.br/>, 2016.
- SHARMA, Arnav; DEV, Nikhil; ATTRI, Rajesh; IDENTIFICATION OF FACTORS FOR SITE SELECTION OF THERMAL POWER PLANT (TPPS); International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, 2015;
- WAN, J., Qi, G., Zeng, Z., & Sun, S. The application of AHP in oil and gas pipeline route selection. In: Geoinformatics, 2011 19th International Conference on. IEEE, 2011. p. 1-4.
- V. YILDIRIM, A. Ç. AYDINOĞLU, T. YOMRALIOĞLU, 27 th Annual ESRI International User Conference konferansında "ESRI International User Conference Proceedings CD" bildiri kitapçığındaki "GIS Based Pipeline Route Selection by ArcGIS in Turkey", 1-6 pp., California, US, Haziran, 2007.
- V. YILDIRIM, R. NIŞANCI, FIG Congress 2010 konferansında "FIG Congress 2010 Facing the Challenges-Building the Capacity Proceedings CD" bildiri kitapçığındaki "Developing a Geospatial Model for Power Transmission Line Routing in Turkey", 1-12 pp., Sidney, Avustralya, Nisan 2010.
- V. YILDIRIM, YOMRALIOĞLU, T., NIŞANCI, R., "A Raster Based Geospatial Model for Natural Gas Transmission Line Routing", ISBN; 978-953-51-0820-7, Natural Gas Extraction to End Use, 101-118, Rijeka, Croatia, 2012.

## Power Plant Infrastructures Route Selection

MSc Almir Beserra dos Santos<sup>1</sup>, DSc Erika Christina Ashton Nunes Chrisman<sup>2\*</sup>  
Federal University Of Rio De Janeiro (UFRJ), Technology Of Chemical And Biochemical Processes (TPQB),  
Department Of Organic Processes (DPO), Rio De Janeiro, Brazil.

<sup>1</sup>Student Of TPQB Dsc. Program, Engineer, ANP (Brazilian Petroleum National Agency), Brazil.

<sup>2</sup>Professor Of TPQB Msc. And Dsc. Program, Engineer, Brazil.

Received 16 Dec, 2016; Accepted 03 Mar, 2017 © The author(s) 2017. Published with open access at [www.questjournals.org](http://www.questjournals.org)

**ABSTRACT:** Currently the assets of the electric power and gas industries consist of large and complex facilities. During the design phase of these facilities, low risks and cost are the goals. Usually, more than a route for the pipeline and transmission line are studied. Technicians are always concerned with choosing the best connect solution with a power plant. The route selection process get more importance due to the changes currently underway in Brazil. Such changes include the recent disclosure of Petrobras efforts in gas natural assets divestments according to your Business and Management Plan. It is an opportunity to explore new frontiers. Brazil is a very big country. Some states of the federation, such as Santa Catarina, although it appears as one of the ten largest consumers of electricity in Brazil, does not have natural gas consumption for the purpose of electricity generation. This scenario could serve as a motivation for further studies about gas-fired power plants. This paper it will discuss optimization practices in order to get the best routes of pipelines and transmission lines interconnected in gas-fired Thermal Power Plants (TPP) in Santa Catarina state, Brazil.

**Keywords:** Optimization, Pipeline, Power Plant, Route Selection.

### I. INTRODUCTION

The nature of power plant infrastructures route selection problems have a direct relationship with decision-making process. Engineering problems can usually solved by considering the focus on technological, parametric and structural levels. The usual approach to solving this problem is to consider the focus on technological, parametric and structural levels. Another characteristic of these problems is that infrastructures route selection sometimes occurs at different times and by different companies, regulators and institutions. The length of each auxiliary infrastructure will be greater or smaller and this can contribute to the reduction of such infrastructure investment costs and risks. The contribution of this paper is to propose a methodology of decision-making of route selection with low cost based on the use of optimization techniques.

Typically, the gas-fired power plants external infrastructure are gas pipeline, transmission line and water pipeline. At the beginning of the TPP design, there are many alternatives and doubts (as shown in fig.1).

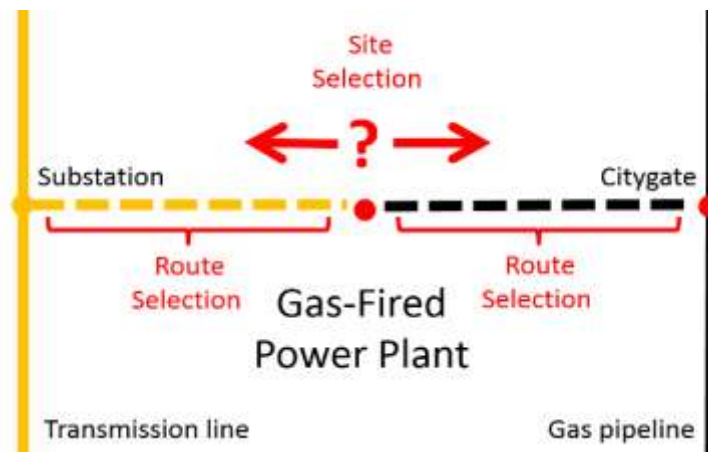


Fig. 1 - Gas-fired TPP main external infrastructures

\*Corresponding Author: MSc Almir Beserra dos Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Student Of TPQB Dsc. Program, Engineer, ANP (Brazilian Petroleum National Agency), Brazil.

Usually, several paths for the pipeline and transmission line can solve the infrastructures route selection problem of gas fired TPP (as shown in fig.2). Which one should we choose as the best solution? What criteria should we consider? In order to answer these questions it is necessary first to survey the literature on this subject.

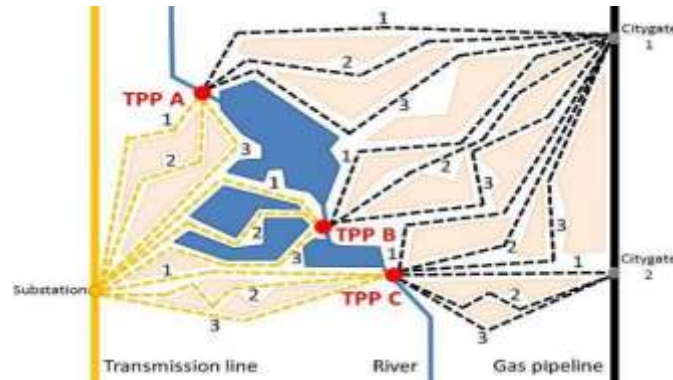


Fig. 2 - Gas-fired TPP external infrastructures

## II. LITERATURE REVIEW

Sharma, Nikil and Attri [1] contributed to the study of identification of factors for site selection of thermal power plant. The important factors evaluated in this study were availability of resources, economic impact, environment concern and accessibility, among others. Water availability, land acquisition cost, road/rail/airport accessibility and electricity consumption point are relevant sub-factors. Akash, Mamlook and Mohsen [2] also contributed to the study of multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process.

The State of Washington Energy Facility Site Evaluation Council – EFESC [3] proposed criteria for transmission line route and design. The important factors evaluated in this study were safety, available access, proximity and potential impacts of line route to residences, environmental impact and protection of wetlands and wildlife habitat. The Construction Manual for Transmission Lines of RAJASTHAN RAJYA VIDYUT PRASARAN NIGAM LTD. [4] describes the following criteria for transmission line: shortest length, required separation distance from railways and communication lines, avoiding lands subject to flood, mountain and wooded areas.

The book Pipeline Planning and Construction Field Manual written by Menon [5] describes the following criteria for pipeline route selection: shortest length, land acquisition cost, road/airport accessibility and avoiding lands subject to flood, mountain areas.

Gamarra [6] highlighted how the spatial information has always played an important role in the pipeline route selection process. Gamarra contributed to the study of route selection process using geoprocessing models with the recent advantages in GIS technologies.

Some criteria have relationship (pros or cons) with one or more criteria. Nowadays there are techniques for comparison and measurement of route criteria using geographic information system (GIS) and Multiple-Criteria Decision Analysis (MCDA). However, there is no a single standard for pipeline and transmission line route selection. According to the location of gas-fired TPP the length of each auxiliary infrastructure will be greater or smaller and this can contribute to the reduce the project management and risk control scope

## III. RESEARCH METHODOLOGY

From the viewpoint of process engineering, the natural gas-fired TPP are optimization problems and its solution consider the focus on technological, parametric and structural levels. In the case of the structural focus, the optimization solutions comprehend successive generation of alternative structures with different arrangements of gas pipelines and transmission lines, in order to obtain an optimal solution that has low investment cost and low cost of operation and maintenance, without compromising safety.

The basic premises for the development of a methodology in order to get the best routes of pipelines and transmission lines interconnected in gas-fired TPP includes: (i) Elaborate organized sets of unit costs and data of geographic coordinates of existing infrastructure, demand and supply; (ii) Calculate the distance between the existing auxiliary facilities and points of interest. (iii) Clustering data according to the location criteria



infrastructures; (iv) Develop mathematical models related to the data collected, processed and calculated; and (v) Investigate the best paths of pipelines and transmission lines.

#### IV. CASE STUDY AND RESULT

This case study evaluate the optimization problem solution related to the decision regarding the location of gas-fired TPP in Santa Catarina (SC) state and the route selection of its auxiliary infrastructure. Brazil is a very big country, with 8,515,767.049 km<sup>2</sup>. Santa Catarina state (as shown in fig.3), although it appears as one of the ten largest consumers of electricity in Brazil, does not have natural gas consumption for the purpose of electricity generation. The geographical coordinates of roads, rivers and transmission facilities (substations and transmission lines) are available in the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) databases [7]. Google Earth has made it possible to calculate distances between cities of interest and notable points.

As a boundary condition in this case study, electric power will be supplied to Canoinhas substation. Another boundary condition will be choose the site near roads to allow heavy equipment transportation. As criteria also will be chosen the site with abundant water to enable the cooling of TPP equipment. According with National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) [8] there is enough natural gas available in the gas pipeline Bolívia-Brasil (GASBOL) to supply one TPP.



Fig. 3 – Brazil map and the Santa Catarina state (source IBGE [9])

In Santa Catarina, there are transmission lines of 500 kV and 230 kV. There are also 9 load centers with large substations. Figure 4 illustrates the electric power transmission infrastructure in the state of Santa Catarina and highlight the Canoinhas substation. The orange lines represent transmission lines of 500 kV. The green lines are those of 230 kV and the yellow ones of 138 kV.

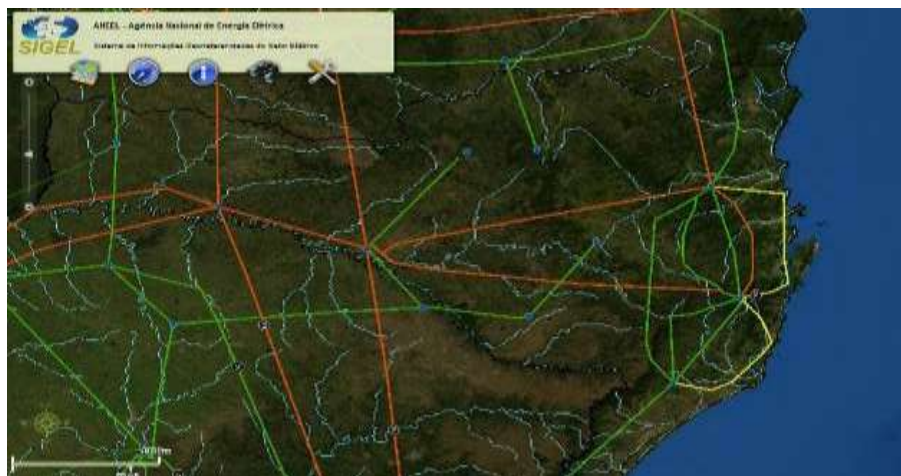


Fig. 4 – Infrastructure of electric energy transmission em SC (source: ANEEL, 2015 [10])

Near Canoinhas substation, interconnection points between highways, such as BR-116 road and BR-470 road, and rivers located in the southern region of the Santa Catarina state, such as the Negro, Canoas, Blumenau and Canoinhas rivers, are favorable locations (as shown in fig.5).



Fig. 5 – TPP alternatives near main roads and rivers of Santa Catarina state

There are 9 citygates that deliver natural gas to distribution pipelines in Santa Catarina. The closest citygates of Canoinhas (as shown in fig.6) are Guaranim, Brusque and São Pedro de Alcântara. This citygates will need new equipment and measuring systems. This case study will evaluate 4 alternatives of TPP site selection and its infrastructure, as shown in figure 6.



Fig. 6 – Geographical coordinates of TPP alternatives near GASBOL city gates in Santa Catarina state.

The 12 interconnection possibilities are related to the 7 facilities of the model and are represented in Figure 7. This is a typical transport problem and will be solved using optimization techniques. Arcs are cost paths and nodes are the alternatives.

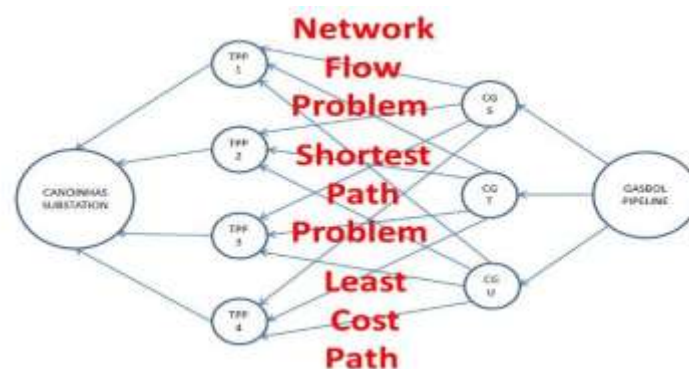


Fig. 7 – Diagram with the TPP infrastructures alternatives in this case study.

The cost of investing in TPP infrastructure implementation is a function of several headings, such as engineering design, environmental licensing, acquisition of equipment and materials, management of the work, construction, assembly and commissioning. At this case study, cost will be limited to the acquisition of main equipment and materials. This study considers the following values of unit cost of pipeline infrastructure and transmission lines in Brazil, published on the internet and converted to march 2016 basis: (i) API 5L X65 pipe with 16": R\$ 1,356.86 / meter [11]; (ii) Measurement System Equipment in the citygates: São Pedro de Alcântara (R\$ 6 million), Brusque (R\$ 9 million) and Guaramirim (R\$ 3 million) [12]; and (iii) transmission line conductor cable (230 kV): R\$ 287.55 / meter [13].

The distances between each of the facilities in this case study are in table 1.

**Table 1** – The distances (in kilometers) between each of the facilities.

	TPP 1	TPP 2	TPP 3	TPP 4
CANOINHAS SUBSTATION	86	10	88	98
	TPP 1	TPP 2	TPP 3	TPP 4
GUARAMIRIM CITYGATE	105	126	97	162
BRUSQUE CITYGATE	130	141	94	160
SÃO PEDRO DE ALCÂNTARA CITYGATE	189	181	106	160

The distances and unit costs of infrastructures allow the calculation of the total costs for each of the interconnection possibilities as shown in table 2.

**Table 2** – Total costs (in millions of R\$) for each of the interconnection possibilities.

	TPP 1	TPP 2	TPP 3	TPP 4
CANOINHAS SUBSTATION	25	3	25	28
	TPP 1	TPP 2	TPP 3	TPP 4
GUARAMIRIM CITYGATE	142	171	131	219
BRUSQUE CITYGATE	177	192	128	217
SÃO PEDRO DE ALCÂNTARA CITYGATE	256	246	144	216

Based on the data above, this paper will study the following cost objective function:

Minimize:  $3X_{12} + 9X_{13} + 6X_{14} + 142X_{25} + 171X_{26} + 131X_{27} + 219X_{28} + 177X_{35} + 192X_{36} + 128X_{37} + 217X_{38} + 256X_{45} + 246X_{46} + 144X_{47} + 216X_{48} + 25X_{5,9} + 3X_{6,9} + 25X_{7,9} + 28X_{8,9}$ ,

Subject to the following restrictions presented in table 3:

**Table 3** - Problem Constraint Equations

$-X_{1,2} - X_{1,3} - X_{1,4} = -1$	$+X_{2,6} + X_{3,6} + X_{4,6} - X_{6,9} = 0$
$+X_{1,2} - X_{2,5} - X_{2,6} - X_{2,7} - X_{2,8} = 0$	$+X_{2,7} + X_{3,7} + X_{4,7} - X_{7,9} = 0$
$+X_{1,3} - X_{3,5} - X_{3,6} - X_{3,7} - X_{3,8} = 0$	$+X_{2,8} + X_{3,8} + X_{4,8} - X_{8,9} = 0$
$+X_{1,4} - X_{4,5} - X_{4,6} - X_{4,7} - X_{4,8} = 0$	$+X_{5,9} + X_{6,9} + X_{7,9} + X_{8,9} = +1$
$+X_{2,5} + X_{3,5} + X_{4,5} - X_{5,9} = 0$	Xi.j greater or equal to zero:

Dantzig [14] and Pizzolato [15] already classified this type of problem has as Transport Problem, Network Flow Problem, Shortest path Problem or Least Cost Path. The constraint are responsible to balance all nodes of the transport network.

This is a Linear Programming problem because it has integer linear variables and can be solved by the SIMPLEX search method available in software GAMS (CPLEX) version Win32 24.4.3 or in MS-Excel 2013 (LP Simplex Solver). Both software solve this objective function and calculate the same result. The minimum investment cost of the optimized solution of the problem is R\$ 159 million. The optimized location of TPP and its infrastructures are in Fig. 8. The detailed cost is: R\$ 3 million of the Guaramirim citygate new metering system; R\$ 131 million for acquisition of main equipment and materials of the Guaramirim up to TPP 3 gas pipeline; and R\$ 25 million for acquisition of main equipment and materials of the transmission line between Canoinhas substation and TPP 3. There are transmission lines and gas pipelines with lower costs, but the optimized solution did not contain these infrastructures, since separately they do not contribute to obtain the lowest cost, in this case study. Considering the restrictions established this solution is the best location of a TPP



within 90 km distance from Canoinhas, which is the destination for the transmission line of the energy produced at the Plant. It is important to highlight that the results obtained are valid considering the restricted scenarios delimited in this case study.



Fig. 8 – Optimized location of TPP and its infrastructures

## V. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

The main conclusion is that project cost will only be as small as possible as the route selection problem is treated as an optimization problem. The institutions involved in the licensing and authorization process of natural gas thermoelectric plants should investigate together whether the costs of these projects correspond to the costs obtained in projects with optimized location. Conducting this study in advance allows the detection of mistaken design assumptions.

The reduction of total length of infrastructure can reduce the total cost of investment. Low lengths allows lower environmental cost and smaller quantity of river and road crossings. There are limitations and assumptions in the case study. The case study goal was not solve a complete natural gas supply problem, since it did not consider the cost of gas and tariffs. Fine adjustment to increase the amount of cost variables with the application of more localization criteria will increase the accuracy of results. It's important consider that pipe length can be greater, considering the need to meet future demands and subjective factors can influence the process of optimal decision-making, such as political risk. It is suggested development of a database of location criteria data and create models in GIS software to verify the gas-fired TPP paths located in other states and cities in Brazil. A tool to conduct the exhaustive search of the best locations for new gas-fired TPP would be of great value to all those interested in the strategic implementation of natural gas thermoelectric projects.

## VI. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank ANP for partial release the DSc. student to participate in the Technology of Chemical and Biochemical Processes Program at Federal University of Rio de Janeiro.

## REFERENCES

- [1]. A.Sharma, N. Dev, R. Attri, Identification of factors for site selection of thermal power plant (TPPS), YMAC, India, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, Volume N° 03, Special Issue N° 01, ISSN (online): 2348 – 7550, April 2015.
- [2]. B. A. Akash, R. Mamlook, M. S. Mohsen, Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. Electric Power Systems Research, Volume 52, Issue 1, 1 October 1999, Pages 29–35.
- [3]. EFSEC – The State of Washington Energy Facility Site Evaluation Council, Wild Horse Wind Power Project - Section, 4.7 Criteria Used for Transmission Route, 2005.
- [4]. WING, Transmission & Construction, Construction Manual for Transmission Lines - RAJASTHAN RAJYA VIDYUT PRASARAN NIGAM LTD., July, Jaipur, India, 2007.
- [5]. E. S. Menon, SYSTEK Technologies, Inc. Pipeline Planning and Construction Field Manual, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2011.
- [6]. A. Gamarra, GIS SUITABILITY MODELING TO SUPPORT A PIPELINE ROUTE SELECTION, presented at the ESRI User Conference in San Diego, CA. July 2015.
- [7]. Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL), BIG database, available at [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Manuais\\_banco\\_de\\_Informacoes/](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Manuais_banco_de_Informacoes/), 2016.
- [8]. National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), report RL-ANP-FPL-017, 07/15/2015, available at [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br), 2016.
- [9]. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Brazil map (brasil\_politico.pdf), available in [http://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas\\_brasil/](http://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/), 2016.
- [10]. Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL), SIGEL database, available at <http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>, 2016.

- [11]. Tribunal de Contas da União (TCU), Processo 008.472/2008-3, Anexo 9, file DOC029-ANEXO%209.pdf, available in <http://www.senado.gov.br/comissoes/documentos/SSCEPI/>, 2008.
- [12]. National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), MINUTA DE EDITAL DE LICITAÇÃO PARA A OUTORGA DE CONTRATO DE CONCESSÃO - PRIMEIRA LICITAÇÃO PARA CONCESSÃO DA ATIVIDADE DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL RIO DE JANEIRO, pre-edital\_LTG1\_05012015\_vfinal1.pdf, available in site [http://www.brasilrounds.gov.br/round\\_TGas1/portugues\\_TGas1/Edital.asp](http://www.brasilrounds.gov.br/round_TGas1/portugues_TGas1/Edital.asp), 2015.
- [13]. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), Revisão das Diretrizes para Elaboração de Orçamentos de Linhas de Transmissão, ANEXO 3 - Diretrizes para elaboração de orçamentos de Linhas de Transmissão.pdf, available in [www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes\\_administrativas/Documentos/](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes_administrativas/Documentos/), 2005.
- [14]. G. B., Dantzig, *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1963.
- [15]. N. D., Pizzolato, A. A., Gandolpho, *Técnicas de Otimização*, LTC, Rio de Janeiro, 2013.

**Copyright 2017, International Gas Union**

This Technical Paper was prepared for presentation at the *International Gas Union Research Conference 2017*, held between October, 24-27, 2016, in Rio de Janeiro. This Technical Paper was selected for presentation by the Technical Committee of the event according to the information contained in the final paper submitted by the author(s). The organizers are not supposed to translate or correct the submitted papers. The material as it is presented, does not necessarily represent the International Gas Union's opinion, or that of its Members or Representatives. Authors consent to the publication of this Technical Paper in the *International Gas Union Research Conference 2017 Proceedings*.

---

## Abstract

Risks and construction costs with installation, operation, maintenance and decommissioning of pipelines are evaluated in the design phase of these facilities. Typically, more than a route for the pipeline are studied and elect a better solution. In several of these projects, the pipeline route is influenced by the location of large consumers of natural gas, such as power plants. The pipeline route selection process of new gas pipelines is a strategic activity and get more importance due to the changes currently underway in Brazil. Such changes include the recent disclosure of Petrobras efforts in gas natural assets divestments according to your Business and Management Plan, as the release of new resolutions by ANP since the promulgation of the Gas Law (Act 11.909/2009).

The Resolution ANP n°52/2011, for example, establishes the obligation to separate the price of natural gas into two parts: a portion related to the natural gas itself and other related with it transportation. On the other hand, Technical Note n° 11/2016/SCM, currently available on the ANP page on the internet, estimates that in the short term the lowest value of natural gas transmission portion that will be used in Brazil, will be located in the central-west region. This region is composed of the states of Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, along with Distrito Federal, where Brazil's national capital, Brasília, is situated. Brasília is the most populous city in the region. The urbanization rate of the central western region, according to the latest national census, is the second largest in Brazil. The state of Goiás, although it appears as one of the ten largest consumers of electricity in Brazil, does not have transport gas pipeline, neither is observed natural gas consumption for the purpose of electricity generation. The projection of a low value of natural gas transmission portion that will be practiced in Goiás in the coming years could serve as a motivation for further studies to be drawn up about gas-fired power plants in Goiás state.

From the viewpoint of process engineering, the natural gas-fired power plants projects can be considered as optimization problems. They can be solved by considering the focus on technological, parametric and structural levels. In the case of the structural focus the optimization solutions are related to successive generation of alternative structures with different arrangements of pipelines and transmission lines, in order to obtain an optimal solution that has low investment cost and low cost of operation and maintenance.

In this paper, it will discuss the basic premises for the development of a methodology in order to get the best routes of pipelines and transmission lines interconnected in gas-fired power plants. Moreover, it will be developed a case study, which will evaluate the optimization problem solution related to the decision regarding the location of gas-fired power plant in the state of Goiás and the route selection of its auxiliary infrastructure. According to the location of gas-fired power plant the length of each auxiliary infrastructure will be greater or smaller and this can contribute to the reduction of such infrastructure investment costs.

The main conclusion of this paper is that getting the optimal solution for route selection for auxiliary infrastructure of gas-fired power plants only can be obtained if the process of evaluation of alternatives is considered an optimization problem and that are also investigated, comprehensively, all interconnection options.

## 1. Introduction

The main international publications point out that natural gas adds flexibility in power supply and is the energy source with the highest growth potential on the world scenario until 2035 [1]. Over the last decade, occurred an increase

---

<sup>1</sup> Student of Technology of Chemical and Biochemical Processes DSc. Program EQ/UFRJ, Regulatory Specialist, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Brazil.

<sup>2</sup> DSc Professor of Technology of Chemical and Biochemical Processes MSc. And DSc. Program EQ/UFRJ, Engineer, Brazil.

in the use of natural gas in Brazil. Nowadays, the Brazilian market structure of natural gas is centralized in Petrobras, the largest oil company in Brazil. However, recent disclosure of Petrobras efforts in gas natural assets divestments according to your Business and Management Plan. At the same time, a great amount of natural gas was reinjected in the Brazilian production wells in the last ten years due to difficulty of transferring the natural gas to the consumer centers [2]. Brazil is a very big country. There are several types of consumers, who consume varying amounts of natural gas daily. In this sense, it is important to use the best criteria for natural gas-fired Thermal Power Plants (TPP) design, because they are considered big consumers. Lower costs of materials, construction and assembly of gas-fired TPP and their infrastructures may contribute to the reduction of natural gas and electric energy transportation tariffs.

Currently the price of gas imported from Bolivia to the states of the central-western region of Brazil costs less than imported LNG [2]. In addition, natural gas transportation service contracts imported from Bolivia by TBG [3] will expire in the short term. ANP studies [4], currently available on the ANP page on the internet, estimates that in the short term the lowest value of natural gas transmission portion that will be used in Brazil, will be located in the central-west region. Investments in projects with this scenario of uncertainty as a backdrop make only the most attractive projects with lower investment costs have more chance of being approved. These facts together serve as a motivation for further studies to be drawn up about gas-fired power plants in Goiás state, using natural gas from Bolivia.

## 2. State of Art and Methodology

Akash, Mamlook and Mohsen [5] and Sharma, Nikil and Attri [6] contributed to the study of identification of factors for site selection of thermal power plant. The important factors evaluated in these studies were availability of resources, economic impact, environment concern and accessibility, among others. The State of Washington Energy Facility Site Evaluation Council – EFESC [7] proposed criteria for transmission line route and design. The important factors evaluated in this study were available access, safety, proximity and potential impacts of line route to residences and environmental impact and among others. Menon [8] describes the following criteria for pipeline route selection: shortest length, land acquisition cost, road/airport accessibility and avoiding lands subject to flood, among others. Gamarra [9] contributed to the study of route selection process using geoprocessing models with the recent advantages in GIS technologies. GIS technologies are becoming increasingly popular and the amount of georeferenced data is increasing year by year. There is no a single standard for pipeline and transmission line route selection. A complete survey of the criteria for selection was made recently through Santos and Chrisman technical papers [10] [11].

## 3. Case Study (Gas-Fired TPP in Goiás State, Brazil)

The state of Goiás, although it appears as one of the ten largest consumers of electricity in Brazil, does not have transport gas pipeline, neither is observed natural gas consumption for the purpose of electricity generation. This case study evaluates the optimization problem solution related to the decision regarding the location of gas-fired TPP in Goiás (GO) state and the route selection of its auxiliary infrastructure. The geographical coordinates of roads, rivers and transmission facilities (substations and transmission lines) are available in the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) databases [12]. The gas pipeline closer to Goiás state is named Gas Pipeline Bolívia-Brasil (GASBOL acronym in Portuguese) and brings gas from Bolivia. The GASBOL pipeline crosses the state of Mato Grosso do Sul that is neighbor to Goiás. The figure 1 shows the location of the state of Goiás. As criteria will be chosen locations near roads to allowing heavy equipment transportation. As criteria also will be chosen the site with abundant water to enable the cooling of TPP equipment.



Figure 1: Location of Goiás in Brazil (highlighted in red). Source: Google Maps



The figure 2 shows the points of intersection of roads and rivers located in the extreme south of Goiás, near Mato Grosso do Sul.

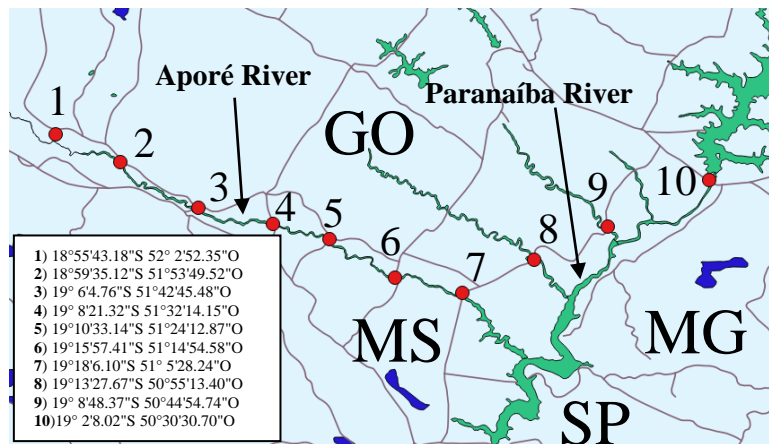


Figure 2: Location alternatives analyzed. Source: made by the author using QGIS software.

As boundary condition, electric power will be supplied to Rio Verde substation (230kV). In figure 3 each route was considered the existence of existing airstrip (yellow circles) and crossing of large rivers and lakes was also avoided.

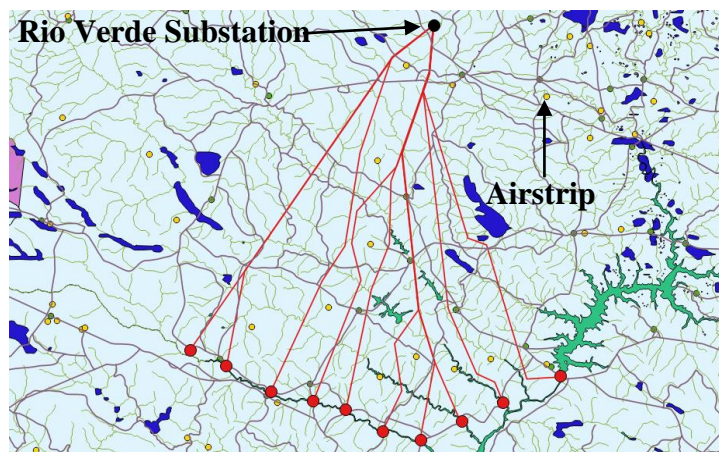


Figure 3: Transmission Lines (red) alternatives analyzed. Source: made by the author using QGIS software.

In figure 4 there are three (A, B and C) compression stations of GASBOL pipeline nearby frontier the state of Goiás.

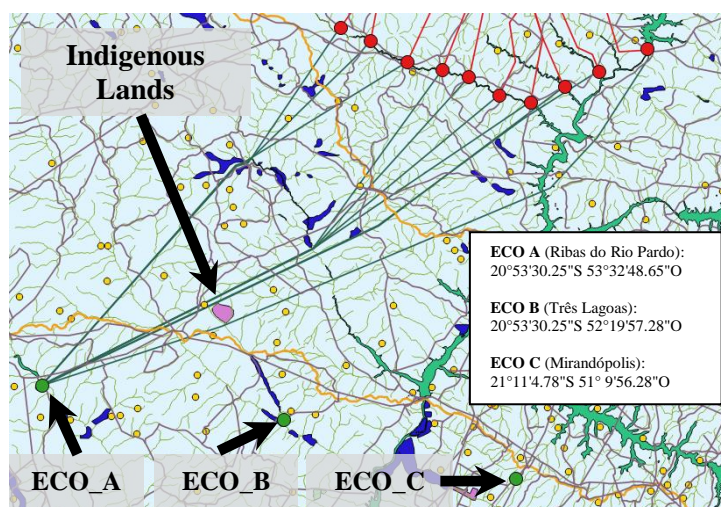


Figure 4: Pipelines (green) alternatives analyzed from ECO A. Source: made by the author using QGIS software.

Crossing of large rivers and lakes was avoided as well as indigenous lands. The compression stations will be adapted to receive the new pipeline to be interconnected. Measurement Systems and pig traps will be installed, among other equipment. Figure 5 shows the pipelines alternatives analyzed from ECO B.

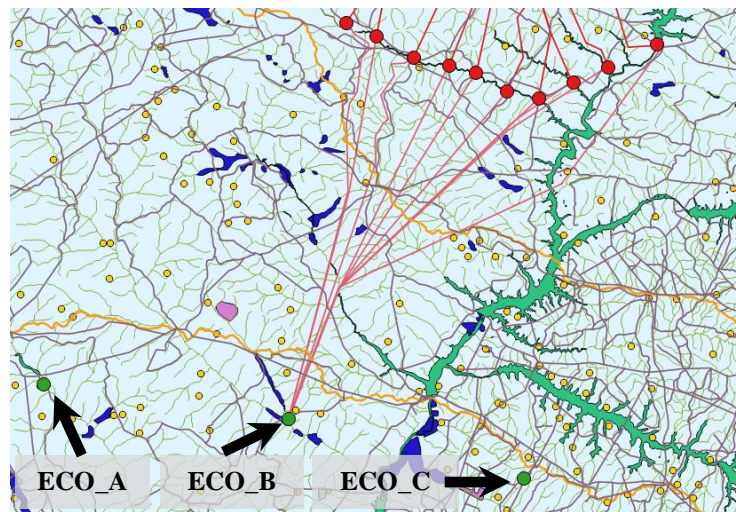


Figure 5: Pipelines (orange) alternatives analyzed from ECO B. Source: made by the author using QGIS software.

The pipeline route selection is not affected by the presence of airstrip, but there is great concern in not crossing large rivers. This special type of work is expensive and known as Horizontal Directional Drilling. Figure 6 shows ducts departing from the ECO\_C station cross more big rivers than pipelines departing from the stations ECO\_A and ECO\_B.

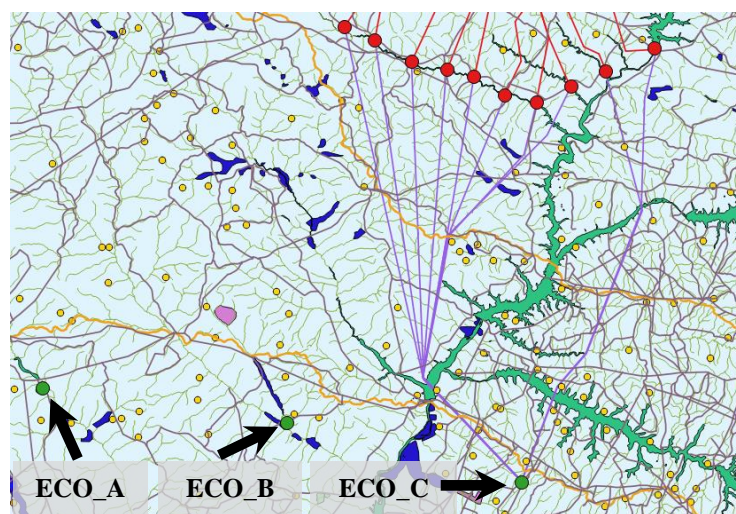


Figure 6: Pipelines (purple) alternatives analyzed from ECO C. Source: made by the author using QGIS software.

The cost of investing in TPP infrastructure implementation is a function of several expenditure, such as engineering design, acquisition of equipment and materials, environmental licensing, management of the work, construction, assembly and commissioning. At this paper, cost will be limited to the acquisition of main equipment and materials. The main expenses in the construction of the pipeline were also included. This case study considers the following values of unit cost of pipeline infrastructure and transmission lines in Brazil, published on the internet and converted to march 2017 basis (IGP-M index): (i) API 5L X65 pipe with 16": R\$ 1,575.12 / meter [13]; (ii) Measurement System Equipment (2 set): R\$ 1,075,537.70 each unit [14]; (iii) Block valve (14"): R\$ 80,698.31 each unit [13]; (iv) Pipeline Cathodic Protection System: R\$ 212,676.95 [14]; (v) SCADA and Pipeline Leak Detection Systems: R\$ 2,114,616.50 [14]; (vi) Pig Trap (2 set): R\$ 2,163,228.37 [14]; (vii) Pipeline x Stream Crossing: R\$ 965,431.81 each [14]; (viii) Pipeline x River Crossing (Horizontal Directional Drilling - HDD): R\$ 9,314,199.53 each [15]; (ix) Pipeline x Road/Rail Crossing (Pipe Jacking With Auger Boring - "Boring Machine"): R\$ 293,494.19 each [14]; (x) Transmission line conductor cable (230 kV): R\$ 490,694.40 / km [16]; (xi) Infrastructure of high voltage towers: R\$ 283,922.40 / km [16]. The distances between each of the facilities in this case study are in table 1. Figure 7 show all the alternatives evaluated in this case study.



Table 1: Dimensional, quantitative and cost data of the infrastructures being studied

		EXTENSION (m)									
		UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
ECO_A:		261.09	266.43	274.93	293.04	298.79	304.10	315.66	337.61	358.46	402.91
ECO_B:		228.69	216.84	214.28	214.54	218.36	220.25	229.75	250.14	270.56	401.65
ECO_C:		277.33	267.89	253.55	249.08	247.43	242.75	250.96	267.32	245.10	255.54
SE:		187.87	187.45	189.45	187.40	182.65	194.93	195.05	188.42	183.35	190.13

		BLOCK VALVES (UNIT)									
		UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
ECO_A:		9	9	9	10	10	10	11	11	12	13
ECO_B:		8	7	7	7	7	7	8	8	9	13
ECO_C:		9	9	8	8	8	8	8	9	8	9

		STREAM CROSSING (UNIT)									
		UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
ECO_A:		18	18	19	22	22	25	27	27	28	39
ECO_B:		21	26	21	20	28	23	24	24	25	43
ECO_C:		38	33	33	33	31	33	30	31	24	31

		RIVER CROSSING									
		UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
ECO_A:		1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
ECO_B:		1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
ECO_C:		2	2	2	2	2	2	2	2	3	3

		ROAD AND RAIL CROSSING									
		UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
ECO_A:		15	15	14	16	16	16	16	16	17	17
ECO_B:		11	10	15	12	13	12	12	12	13	16
ECO_C:		16	16	15	15	15	16	14	16	24	22

		GAS PIPELINE AND INFRASTRUCTURE & CONSTRUCTION SIMPLIFIED COST (MILLION R\$)									
		UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
ECO_A:		443.05	451.47	465.56	497.61	506.69	517.96	538.12	572.77	616.23	696.99
ECO_B:		393.64	379.48	372.08	370.65	384.69	382.56	398.50	430.68	473.48	698.56
ECO_C:		497.58	477.86	454.94	447.89	443.35	438.20	447.67	475.03	444.88	467.53

		TRANSMISSION LINES AND INFRASTRUCTURE SIMPLIFIED COST (MILLION R\$)									
		LT 1	LT 2	LT 3	LT 4	LT 5	LT 6	LT 7	LT 8	LT 9	LT 10
SE_1		145.52	145.21	146.75	145.17	141.49	151.00	151.09	145.95	142.03	147.28

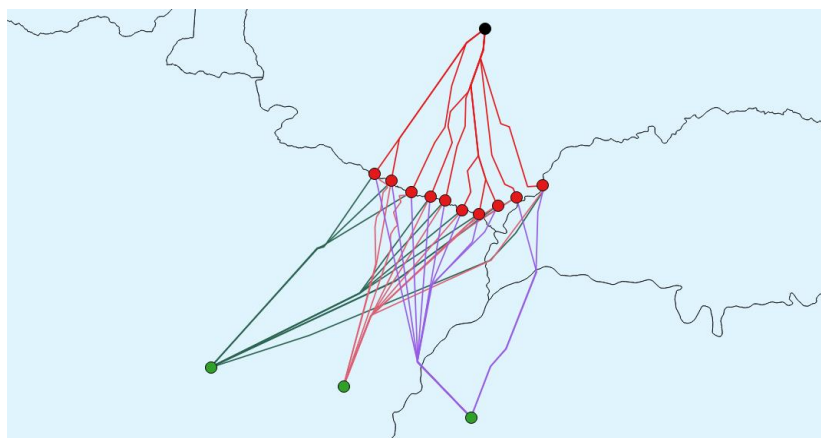


Figure 7: All the alternatives evaluated in this case study. Source: made by the author using QGIS software.

Based on the data in table 1, this paper will study the following cost objective function:

$$\text{Minimize: } 5.57X_{12} + 5.57X_{13} + 5.57X_{14} + 443.05X_{25} + 451.47X_{26} + 465.56X_{27} + 497.61X_{28} + 506.69X_{29} + 517.96X_{2,10} + 538.12X_{2,11} + 572.77X_{2,12} + 616.23X_{2,13} + 696.99X_{2,14} + 393.64X_{35} + 379.48X_{36} + 372.08X_{37} + 370.65X_{38} + 384.69X_{39} + 382.56X_{3,10} + 398.50X_{3,11} + 430.68X_{3,12} + 473.48X_{3,13} + 698.56X_{3,14} + 497.58X_{45} + 477.86X_{46} + 454.94X_{47} + 447.89X_{48} + 443.35X_{49} + 438.20X_{4,10} + 447.67X_{4,11} + 475.03X_{4,12} + 444.88X_{4,13} + 467.53X_{4,14} + 145.52X_{5,15} + 145.21X_{6,15} + 146.75X_{7,15} + 145.17X_{8,15} + 141.49X_{9,15} + 151.00X_{10,15} + 151.09X_{11,15} + 145.95X_{12,15} + 142.03X_{13,15} + 147.28X_{14,15}$$

Subject to the following restrictions presented in table 2:

$- X_{1,2} - X_{1,3} - X_{1,4} = - 1$
$+ X_{1,2} - X_{2,5} - X_{2,6} - X_{2,7} - X_{2,8} - X_{2,9} - X_{2,10} - X_{2,11} - X_{2,12} - X_{2,13} - X_{2,14} = 0$
$+ X_{1,3} - X_{3,5} - X_{3,6} - X_{3,7} - X_{3,8} - X_{3,9} - X_{3,10} - X_{3,11} - X_{3,12} - X_{3,13} - X_{3,14} = 0$
$+ X_{1,4} - X_{4,5} - X_{4,6} - X_{4,7} - X_{4,8} - X_{4,9} - X_{4,10} - X_{4,11} - X_{4,12} - X_{4,13} - X_{4,14} = 0$
$+ X_{2,5} + X_{3,5} + X_{4,5} - X_{5,15} = 0$
$+ X_{2,6} + X_{3,6} + X_{4,6} - X_{6,15} = 0$
$+ X_{2,7} + X_{3,7} + X_{4,7} - X_{7,15} = 0$
$+ X_{2,8} + X_{3,8} + X_{4,8} - X_{8,15} = 0$
$+ X_{2,9} + X_{3,9} + X_{4,9} - X_{9,15} = 0$
$+ X_{2,10} + X_{3,10} + X_{4,10} - X_{10,15} = 0$
$+ X_{2,11} + X_{3,11} + X_{4,11} - X_{11,15} = 0$
$+ X_{2,12} + X_{3,12} + X_{4,12} - X_{12,15} = 0$
$+ X_{2,13} + X_{3,13} + X_{4,13} - X_{13,15} = 0$
$+ X_{2,14} + X_{3,14} + X_{4,14} - X_{14,15} = 0$
$+ X_{5,15} + X_{6,15} + X_{7,15} + X_{8,15} + X_{9,15} + X_{10,15} + X_{11,15} + X_{12,15} + X_{13,15} + X_{14,15} = + 1$
$X_{i,j} \geq 0$

This type of problem already has classified by Dantzig [17] and Pizzolato [18] as Transport Problem. This is a Linear Programming problem because it has integer linear variables and can be solved by the SIMPLEX search method available in MS-Excel 2013 (LP Simplex Solver) or software GAMS (CPLEX) version Win32 24.4.3. The objective function of this paper was solved using MS-Excel 2013.

#### 4. Results

The minimum investment cost of the optimized solution of the problem is R\$ 521.39 million. The optimized location of TPP and its infrastructures are in Fig. 8. The detailed cost is: R\$ 5.57 million of the Três Lagoas Compressor Station new equipment’s (Metering Systems, Pig trap, Cathodic Protection System, SCADA System and Leak Detection System); R\$ 370.65 million for construction (main expenses) and acquisition of main equipment and materials of the gas pipeline from Três Lagoas Compressor Station up to TPP 4; and R\$ 145.17 million for acquisition of main equipment and materials of the transmission line between the substation and TPP 4. The figure 8 shows the three best alternatives, in alphabetic order, verified in this study.

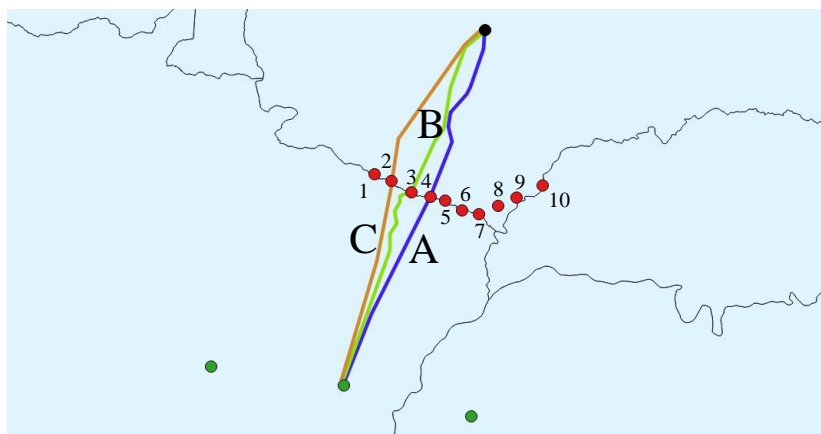


Figure 8: The best routes pointed out by the study. Source: made by the author using QGIS software.



The best alternative is the route of UTE 4 supplied from ECO 4. The second-best alternative, also supplied by ECO 4, is through UTE 3. Thirdly, comes the alternative that includes UTE 2. Considering the restrictions established this solution is the best location of a gas-fired TPP using natural gas from GASBOL in Goiás south region.

## 5. Final Considerations

This work presented a modern alternative of route analysis of pipelines and transmission lines. The technical criteria for assistance in decision-making free of privileges were presented. Although there are several variables that can affect the choice of the best route, it was observed that it was possible to find the optimal choice by linear programming. So the infrastructure cost of gas-fired TTP projects only be as small as possible as the route selection problem is treated as an optimization problem. The paper goal was not solving a complete natural gas supply problem in Goiás state, since it did not consider the cost of gas and all other details cost. In addition to this study must be made on-site visits on the route chosen. More adjustment to increase the amount of cost variables with the application of others localization criteria can increase the accuracy of results.

It is relevant highlight that pipe length can be greater, considering the need to meet future demands of consumers nearby the pipeline and also to settle subjective factors that can influence the process of optimal decision-making, such as the difficulty in acquiring land or negotiating compensation for their owners. Based on this fact, it is important to highlight that the article presents the three best solutions with the objective of helping to make the decision on the best possible route.

## 6. References

- [1]. BP, "Statistical Review of World Energy – June 2014", available on [www.bp.com/statisticalreview/](http://www.bp.com/statisticalreview/), 2014.
- [2]. MME - Ministério de Minas e Energia, 'Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural', Edition no. 118 (Dez/16), available on <http://www.mme.gov.br>, 2017.
- [3]. TBG, "Transport Service Contract", file "contrato\_servi\_o\_17.pdf" available on [http://www.tbg.com.br/pt\\_br/a-tbg/informacoes-a-anp.htm](http://www.tbg.com.br/pt_br/a-tbg/informacoes-a-anp.htm), 2017.
- [4]. ANP, "Technical Note nº 11/2016/SCM", file "Nota\_Tecnica\_n112016SCM.pdf" available on [http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/Consultas\\_publicas/Em\\_Andamento/14\\_2016/](http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/Consultas_publicas/Em_Andamento/14_2016/), 2017.
- [5]. B. A. Akash, R. Mamlook, M. S. Mohsen, Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. *Electric Power Systems Research*, Volume 52, Issue 1, 1 October 1999, Pages 29–35.
- [6]. A. Sharma, N. Dev, R. Attri, Identification of factors for site selection of thermal power plant (TPPS), YMAC, India, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, Volume No 03, Special Issue No 01, ISSN (online): 2348 – 7550, April 2015.
- [7]. EFSEC – The State of Washington Energy Facility Site Evaluation Council, Wild Horse Wind Power Project - Section, 4.7 Criteria Used for Transmission Route, 2005.
- [8]. E. S. Menon, SYSTEK Technologies, Inc. Pipeline Planning and Construction Field Manual, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2011.
- [9]. A. Gamarra, GIS SUITABILITY MODELING TO SUPPORT A PIPELINE ROUTE SELECTION, presented at the ESRI User Conference in San Diego, CA. July 2015.
- [10] A. B. Santos, E. C. A. N. Chrisman, "IBP2131\_16 ANÁLISE DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRAÇADO DE GASODUTOS PARA SUPRIR NOVAS TERMELÉTRICAS", Rio Oil & Gas Expo and Conference 2016.
- [11] A. B. Santos, E. C. A. N. Chrisman, "Power Plant Infrastructures Route Selection", *Quest Journals, Journal of Research in Mechanical Engineering*, Volume 3 ~ Issue 3 (2017) pp: 17-23, 2016.
- [12]. Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL), SIGEL database, available at <http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>, 2017.
- [13]. Tribunal de Contas da União (TCU), Processo 008.472/2008-3, Anexo 9, file DOC029-ANEXO%209.pdf, available in <http://www.senado.gov.br/comissoes/documentos/SSCEPI/>, 2008.
- [14]. National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), "Minuta de edital de licitação para a outorga de contrato de concessão - primeira licitação para concessão da atividade de transporte de gás natural rio de janeiro", pre-edital\_LTG1\_05012015\_vfinal1.pdf, available in site [http://www.brasilrounds.gov.br/round\\_TGas1/portugues\\_TGas1/Edital.asp](http://www.brasilrounds.gov.br/round_TGas1/portugues_TGas1/Edital.asp), 2015.
- [15] TBG, "Transparência Pública - Ano 2015 em R\$", file IM\_2015\_ResumoLAI.pdf available in <http://web.tbg.com.br/acessoinformacao/arquivo/>, 2017.
- [16]. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), Revisão das Diretrizes para Elaboração de Orçamentos de Linhas de Transmissão, ANEXO 3 - Diretrizes para elaboração de orçamentos de Linhas de Transmissão.pdf, available in [www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes\\_administrativas/Documentos/](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes_administrativas/Documentos/), 2005.
- [17]. G. B., Dantzig, *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1963.
- [18]. N. D., Pizzolato, A. A., Gandolpho, *Técnicas de Otimização*, LTC, Rio de Janeiro, 2013.

**Copyright 2016, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2016**, realizado no período de 24 a 27 de outubro de 2016, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2016*.

---

## Resumo

Os aspectos relacionados com a operação de dutos em áreas ambientalmente sensíveis são necessariamente previstos ainda em tempo de projeto. Desta forma, os riscos e os custos com construção, montagem, operação, manutenção e desativação de dutos são avaliados considerando a influência dos fatores ambientais das áreas impactadas e, tipicamente, são estudadas alternativas de traçado e eleita uma melhor solução. Vários critérios relacionados com a seleção de rotas de gasodutos e oleodutos são de domínio público e são aplicados nos seus projetos, que são elaborados pelos agentes do setor de óleo e gás regulados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e submetidos ao órgão ambiental competente, no âmbito da obtenção de licenciamento ambiental. Com relação ao processo de seleção de alternativas de traçado observado nos recentes projetos de novos gasodutos, que visam suprir gás natural para termelétricas brasileiras participantes de leilões de energia promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica, observa-se que existem oportunidades de melhoria, dado que, por conta do estágio técnico de parte dos projetos, alguns submetidos ainda na fase conceitual, a chance de que tais projetos sejam considerados otimizados é menor. O objetivo deste trabalho é sugerir questões relevantes para o debate e apresentar sugestões para a redução de riscos e custos de projetos de gasodutos que suprem termelétricas.

## Abstract

The aspects of pipeline operations in environmentally sensitive areas are necessarily set at design time. Thus, the risks and construction costs, installation, operation, maintenance and decommissioning of pipelines are evaluated considering the influence of environmental factors of the impacted areas and typically are alignment alternatives studied and chosen a better solution. Various criteria relating to the selection of pipeline routes and pipelines are public domain and applied in their projects, which are made by agents of the oil and gas sector regulated by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels and submitted to environmental agency competent, within the environmental licensing. Regarding the selection process of alignment alternatives observed in recent projects of new pipelines, that aim to supply natural gas to participating Brazilian thermoelectric power auctions held by the National Electric Energy Agency, it is observed that there are opportunities for improvement, since, due to the technical stage of the projects, some still undergoing in the conceptual stage, the chance that such projects are considered optimized is smaller. The aim of this paper is to suggest issues relevant to the discussion and make suggestions to reduce risks and pipeline project costs that supply thermal.

## 1. Introdução

Uma termelétrica (UTE) que utiliza gás natural como combustível é um empreendimento de geração de energia elétrica que possui várias infraestruturas auxiliares interligadas, sendo as principais: (i) o gasoduto que fornece o gás natural utilizado como combustível; (ii) a Linha de Transmissão (LT) que fornece a energia elétrica gerada para o consumidor final ou para o Sistema Interligado Nacional (SIN); e (iii) a tubulação do emissário que transporta a água

---

<sup>1</sup> M.Sc (UFRJ, 2010), Doutorando pela UFRJ/EQ/TPQB, Especialista Regulação – ANP

<sup>2</sup> D.Sc (IME, 1998), Professora – UFRJ/EQ

utilizada no sistema de resfriamento dos equipamentos da UTE, que atingem elevadas temperaturas quando em operação. Os processos de licenciamento ambiental e de outorga de construção e operação desse tipo de empreendimento podem requer o envolvimento de diferentes agentes, órgãos reguladores e instituições.

O principal ato normativo que abrange os temas relacionados com o gás natural e com os gasodutos é a Lei nº 11.909/2009, conhecida como a Lei do Gás. Os requisitos para a outorga de concessão ou autorização de construção e operação de gasodutos de transporte pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estão estabelecidos na Resolução ANP nº 52/2015. Já o principal ato normativo que abrange os temas relacionados com serviços de energia elétrica e linhas de transmissão é a Lei nº 9.074/1995. Adicionalmente, o estabelecimento dos requisitos para a outorga de concessão ou autorização de construção e operação de linhas de transmissão é de competência da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

## 2. Histórico

Desde a publicação da Resolução CONAMA nº 1, de 23/01/1986, tipicamente o procedimento adotado para o licenciamento ambiental de projetos de usinas termelétricas contempla a apresentação e seleção por parte do empreendedor da melhor opção avaliada a partir de: (i) 3 (três) alternativas de localização da termelétrica; (ii) 3 (três) alternativas de traçado da linha de transmissão; e (iii) 3 (três) alternativas de traçado do gasoduto. Apenas o empreendedor e os órgãos ambientais fazem a análise das características e dos riscos do empreendimento considerando a influência das interferências e outros fatores ambientais das áreas impactadas. A ANEEL analisa os aspectos relacionados com a UTE e com a linha de transmissão, enquanto a ANP faz a análise dos aspectos do gasoduto.

No Brasil, historicamente, o planejamento do setor do petróleo e do gás natural foi conduzido de forma distinta do planejamento do setor de energia elétrica. Somente após a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (Lei nº 10.847/2004), os estudos e pesquisas para subsidiar o planejamento do energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, passaram a ser realizados por uma única instituição, visando prestar o apoio ao Ministério de Minas e Energia (MME) para a realização das atividades de planejamento sob sua responsabilidade. Desta forma, a EPE também passou a elaborar estudos relacionados com alternativas de localização de empreendimentos de termelétricas e instalações auxiliares.

O sucesso deste planejamento depende da efetiva integração da EPE com as instituições de controle (agências reguladoras e órgãos ambientais), em sintonia com as demandas dos agentes de mercado dos setores do gás natural e energia elétrica.

## 3. Estado da Arte

Tipicamente, sob a ótica da engenharia de processos, os projetos de termelétricas a gás natural podem ser considerados como problemas de otimização e podem ser resolvidos considerando o enfoque nos níveis tecnológico, estrutural e paramétrico. As soluções de otimização com enfoque no nível estrutural estão relacionadas com geração sucessiva de estruturas alternativas com diferentes arranjos visando a obtenção de uma solução ótima que possua baixo custo de investimento e baixo custo de operação e manutenção (PERLINGEIRO, 2005).

A Figura 1 ilustra o processo de seleção das alternativas, representadas com linhas pontilhadas, de traçado das infraestruturas de um caso hipotético da avaliação da localização de uma UTE a partir de 3 opções (A, B e C). Este caso hipotético contém os elementos suficientes para destacar as imperfeições que podem surgir por conta da elaboração, em separado, de estudos de traçado e de suas avaliações. O destino da energia elétrica é a subestação “SE” interligada ao SIN. O ponto de origem do gás escolhido, por opção do empreendedor, para fornecimento é o Ponto de Entrega “PTE 1” de um gasoduto existente.

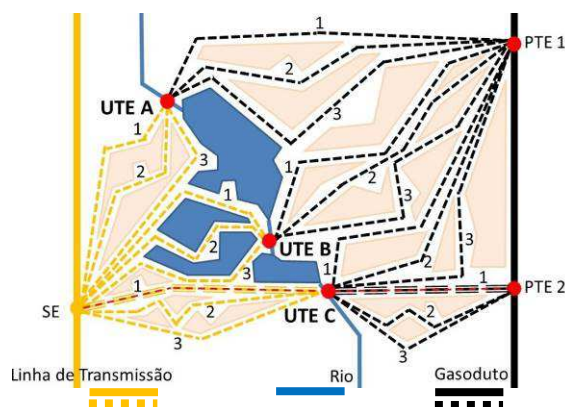


Figura 1. Alternativas de Localização de Termelétricas (elaboração própria)

A partir do PTE 1, observa-se que o menor gasoduto, que é o tipo de infraestrutura auxiliar de maior custo por quilômetro, é a alternativa 2 que vai para a UTE B. A partir da UTE B, observa-se que a LT de menor comprimento é a opção 3. O órgão ambiental e as instituições envolvidas podem, a princípio, ter a impressão de que a solução de menor custo foi alcançada e, desta forma, não enxergam óbice ao prosseguimento nas etapas do licenciamento ambiental e na outorga dos projetos das infraestruturas. Entretanto, a verdadeira solução ótima no exemplo hipotético não foi obtida, nem avaliada. Trata-se da opção da UTE C com a alternativa 1 da LT para a subestação SE e a alternativa 1 do gasoduto que interliga o PTE 2 até a UTE C. Convém destacar que um caso real pode resultar em um número elevado de alternativas a serem estudadas caso existam diversas opções de localização para a termelétrica e diversas opções de interligação com pontos de entrega e subestações.

Percebe-se que tomada de decisão que envolve a escolha da localização de uma termelétrica é uma atividade complexa que requer o uso de técnicas avançadas e ferramentas computacionais para sua realização. Esta complexidade pode ser reduzida através do uso conjunto de técnicas de otimização em complemento às tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas – GIS. Dependendo da localização de uma termelétrica o comprimento de cada infraestrutura auxiliar será maior ou menor, podendo contribuir para a redução da redução de custos de investimento e dos riscos relacionados com a operação desses empreendimentos em áreas ambientalmente sensíveis.

A solução ótima de problemas de localização de uma termelétrica a gás natural pode afetar positivamente a competitividade deste tipo de empreendimento na participação de Leilões de Energia promovidos pela ANEEL.

O processo de seleção das alternativas locais de uma termelétrica e suas infraestruturas auxiliares é realizado de forma criteriosa. Os principais critérios estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais critérios adotados na avaliação da localização de:

	<b>TERMELÉTRICAS</b> (SHARMA et al, 2015 e SAMBASIVARAO et al, 2014)	<b>LINHAS DE TRANSMISSÃO</b> (EFSEC, 2005 e WING, 2007)	<b>GASODUTOS</b> (MENON, 2011)
1	Custo de aquisição do terreno: privilegiar áreas com imóveis de baixo custo	Custo da faixa de servidão: privilegiar áreas da União e rotas / faixas existentes	Custo da faixa de servidão: privilegiar áreas da União e rotas / faixas existentes
2	A área deve ser a maior possível de modo a não criar limitações ou obstáculos para futuras expansões	O comprimento (menor possível): menos custo com materiais / construção e menos perdas elétricas	O comprimento (menor possível): menos custo com materiais / construção e com compressão
3	Proximidade de redes de transporte	Proximidade de redes de transporte	Proximidade de redes de transporte
4	Minimizar os riscos que comprometam a segurança	Minimizar os riscos que comprometam a segurança	Minimizar os riscos que comprometam a segurança
5		Excesso de cruzamentos de pontos notáveis (rios)	Excesso de cruzamentos de pontos notáveis (rios)
6	Proximidade do centro consumidor de energia	Facilidade de interconexão com subestações (SIN)	Facilidade de interconexão com citygates
7		Distância de instalações de comunicação e ferrovias “em paralelo”	Seguir “em paralelo” de instalações de ferrovias, comunicação e rodovias
8	Distância de áreas montanhosas: altitude afeta rendimento da UTE	Distância de áreas com mudança abrupta de nível ou montanhosas	Distância de áreas com mudança abrupta de nível ou montanhosas
9	Distância de cidades / áreas populosas	Distância de cidades / áreas populosas	Distância de cidades / áreas populosas
10	Distância de áreas ambientalmente sensíveis	Distância de áreas ambientalmente sensíveis	Distância de áreas ambientalmente sensíveis
11	Proximidade de locais com disponibilidade de água	Distância de áreas alagadas, rios e terrenos instáveis	Distância de áreas alagadas, rios e terrenos instáveis
12		Evitar área que demande obras especiais	Evitar área que demande obras especiais
13		Distância de áreas arborizadas	Distância de áreas arborizadas
14		Distância de pedreiras ou minas	Distância de encostas
15	Distância de instalações de depósito de munições	Distância de depósito de líquidos inflamáveis	
16		Distância de aeroportos ou heliportos	

A tabela 1 apresentou uma relação com os principais critérios de avaliação da localização de empreendimentos termelétricos observados na esfera internacional. No âmbito nacional merecem destaque os critérios adotados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013), a saber: (i) evitar a interferência direta em unidades de conservação (UC) de Proteção Integral ou em terras indígenas (TI); (ii) dar preferência pelo acompanhamento de estradas existentes; (iii) dar preferência por áreas com relevo de menor gradiente e áreas com menor suscetibilidade à erosão e movimentos de massa; (iv) atravessar a menor quantidade de corpos hídricos atravessados pelo traçado preliminar, fazendo uso da menor da distância entre suas margens; (v) priorizar alternativas com menor área de vegetação nativa; (vi) evitar possíveis interferências do traçado preliminar em outros empreendimentos lineares; (vii) evitar áreas com adensamento populacional; (viii) evitar áreas alagadas; (ix) evitar regiões com imóveis rurais e assentamentos; (x) evitar áreas com afloramentos rochosos; e (xi) evitar proximidade com aeródromos.

Já o processo de tomada de decisão adotado pela Petrobras para a escolha do melhor traçado de um empreendimento tem como premissa a incorporação de alternativas que minimizem, mitiguem ou compensem impactos adversos.

Neste contexto, os principais aspectos avaliados pela Petrobras na avaliação da localização de gasodutos são (PETROBRAS, 2014): (i) extensão total; (ii) relevo (declividade, curvatura e perfis de elevação); (iii) unidades geológicas interceptadas; (iv) classes de solo interceptadas; (v) travessias de cursos d'água; (vi) áreas brejosas ou inundadas; (vii) áreas de instabilidade ou potencial erosivo; (viii) áreas com afloramentos rochosos; (ix) cruzamento com rodovias; (x) cruzamentos com vias urbanas e estradas vicinais; (xi) cruzamento com linhas de transmissão; (xii) áreas com processo de exploração mineral; (xiii) áreas com reconhecido potencial espeleológico; (xiv) interferência com geoparques; (xv) interceptação de áreas de mata nativa; (xvi) interceptação ou distância de unidades de conservação; (xvii) áreas prioritárias para conservação; (xviii) interceptação de áreas de preservação permanente; (xix) áreas de fauna terrestre endêmica e/ou ameaçada; (xx) número de municípios interceptados; (xxi) influência sobre aglomerados urbanos e áreas de uso industrial ou de serviços; (xxii) proximidade de áreas com possibilidade de expansão urbana; (xxiii) interceptação de áreas de culturas agrícolas e de pastagem; (xxiv) interceptação de áreas com potencial arqueológico; e (xxv) interferência no patrimônio histórico e cultural.

Para cada alternativa avaliada são atribuídas notas para cada um dos aspectos acima apresentados. As notas atribuídas podem possuir 3 valores, a saber: (i) nota 3, correspondente à alternativa mais favorável; (ii) nota 2, correspondente à alternativa intermediária; e (iii) nota 1, para a alternativa menos favorável. A alternativa com a maior média total será considerada a alternativa mais favorável. Para esta alternativa será, então, realizada a seleção da melhor alternativa tecnológica para execução do empreendimento, observando os aspectos construtivos aplicáveis.

Percebe-se através do levantamento do estado da arte realizado neste artigo que o processo de seleção da localização de uma termelétrica a gás natural e das rotas de suas infraestruturas auxiliares envolve a aplicação simultânea de vários critérios. Apesar de existirem vários pontos em comum, não existe um padrão único de critérios para seleção da localização de empreendimentos termelétricos a gás natural e de alternativas de traçado de gasodutos e linhas de transmissão. Quanto maior for o número de critérios adotados melhor será o suporte técnico para tomada de decisões e mais complexo se tornará o processo de otimização do projeto do empreendimento como um todo.

#### 4. Estudo de Caso

Este trabalho avaliará, no formato de estudo de caso, a resolução, na forma de problema de otimização, da tomada de decisão para seleção dos traçados das infraestruturas do projeto da empresa Wärtsilä Brasil Ltda. para implantação de UTE São Geraldo I no Estado do Espírito Santo, que foi inscrita no Leilão A-5/2015 da ANEEL e concebida para operar em áreas ambientalmente sensíveis. Os principais dados da UTE São Geraldo I podem ser consultados através do Relatório de Impacto Ambiental desta termelétrica, disponível para consulta no site do órgão ambiental do Espírito Santo (WÄRTSILÄ, 2010).

Em seu estudo ambiental, a Wärtsilä ressalta que a área para a implantação da UTE foi selecionada observando principalmente os seguintes pontos: facilidade de acesso, proximidade com o gasoduto e linha de transmissão existentes, terreno de natureza favorável, sem vegetação e fauna nativa representativa, banhados, cursos d'água, riscos de inundações, afloramentos rochosos, e local que não estejam situados próximos de unidades de conservação, reservas indígenas, quilombos, sítios arqueológicos, áreas urbanas e similares.

A Figura 2 exibe na cor amarela o traçado do gasoduto que parte desde o citygate (Ponto de Entrega) do gasoduto de transporte GASCAV até a UTE São Geraldo. Nesta mesma figura observa-se, na cor rosa, o traçado da linha de transmissão que parte desde a UTE em estudo até a subestação situada na linha de transmissão de 138kV da ESCELSA. Chama atenção o fato da UTE não estar localizada entre o citygate e a subestação.





Figura 2 – Vista aérea do traçado da LT, do gasoduto e da localização da UTE São Geraldo I

Convém mencionar que a quantidade de critérios adotados pela Wärtsilä é menor que o observado na relação de critérios levantados no capítulo Estado da Arte do presente artigo. Além disso, observa-se que o estudo ambiental não contempla o estudo de 3 (três) alternativas de localização da UTE, do gasoduto e da linha de transmissão. Tal estudo apenas limitou-se a apresentar a alternativa escolhida, sem detalhar as demais alternativas ou apresentar memória de cálculo utilizando-se dos seus critérios para justificar a escolha realizada.

Adicionalmente, apesar de ter sido mencionada a preocupação com riscos de inundações, ressalta-se que as localizações escolhidas para o ponto de entrega e para a subestação possuem elevação inferior (a metade) da observada elevação proposta para a UTE, que é de 22m.

Visando avaliar a escolha da melhor alternativa de locação da UTE São Geraldo I e de suas infraestruturas foram consideradas 3 opções de localização para construção do citygate no GASCAV (PTE\_A, PTE\_B e PTE\_C). Adicionalmente, foram consideradas 6 opções de localização para a UTE São Geraldo I (UTE 1, UTE 2, UTE 3, UTE 4, UTE 5 e UTE 6). A Figura 3 exhibe, com o mesmo padrão de cores adotado no estudo da Wärtsilä, as opções citadas e ilustra como seria a alternativa de interligação PTE\_B – UTE 6 – SE (ESCELSA).

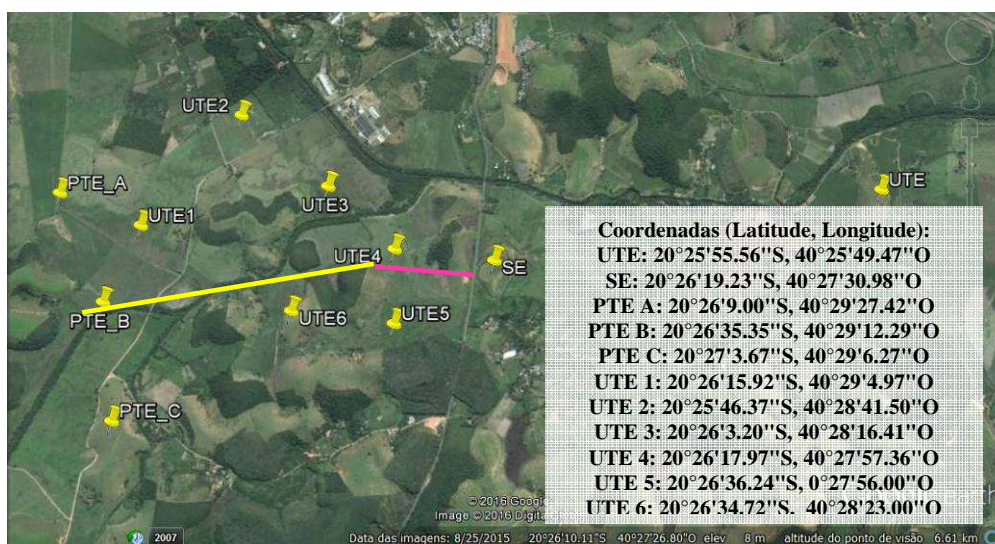


Figura 3 – Vista aérea das alternativas de localização dos citygates e da UTE em estudo

Os critérios considerados na avaliação da localização da UTE São Geraldo e de suas infraestruturas foram: i) extensão total; (ii) relevo (declividade, curvatura e perfis de elevação); (iii) travessias de cursos d'água; (iv) áreas de instabilidade ou potencial erosivo; (v) áreas com afloramentos rochosos; (vi) cruzamento com rodovias; (vii) cruzamentos com vias urbanas e estradas vicinais; (viii) cruzamento com linhas de transmissão; (ix) interceptação de áreas de mata nativa; (x) interceptação ou distância de unidades de conservação; (xi) áreas prioritárias para conservação; (xii) interceptação de áreas de preservação permanente; (xiii) áreas de fauna terrestre endêmica e/ou ameaçada; (xiv) influência sobre aglomerados urbanos e áreas de uso industrial ou de serviços; (xv) proximidade de áreas com

possibilidade de expansão urbana; (xvi) interceptação de áreas com potencial arqueológico; (xvii) interferência no patrimônio histórico e cultural; e (xviii) aspectos construtivos aplicáveis.

Para os principais critérios acima referenciados, foi construído um modelo de custo de investimento considerando os principais aspectos construtivos aplicáveis, tais como o custo de obras especiais, tais como o uso de cavalotes na construção do gasoduto para transposição de cursos d'água e o custo com as tubulações do emissário para admissão/descarte de água utilizado no resfriamento dos equipamentos da termelétrica.

O custo de investimento na implantação das infraestruturas de uma UTE é função de várias rubricas que são comuns aos empreendimentos de gasodutos e de linhas de transmissão, tais como: (i) Projeto de Engenharia; (ii) Licenciamento Ambiental; (iii) Aquisição de Imóveis (Liberação da Faixa); (iv) Gerenciamento e Administração da Obra; (v) Aquisição de Equipamentos e Materiais; (vi) Construção e Montagem; (vii) Obras Especiais (Travessias de Rios / Canais); e (viii) Comissionamento e Pré-Operação, nesta etapa do projeto, o presente estudo de caso será limitado ao item Aquisição de Equipamentos e Materiais (v).

Através de consulta realizada na internet sobre dados públicos dos valores de custos associados com empreendimentos de gasodutos, de linhas de transmissão e dutos para fornecimento de água, foram levantados os seguintes custos atualizados (base março/2016) com base no indicador IGPM-DI: (i) Tubulação gasoduto 16": R\$ 1.585,29/m (TCU, 2008); (ii) Conjunto Lançador/Recebedor de pig: R\$ 9.757.195,84 (ANP, 2015); (iii) Sistema de Proteção Catódica: R\$ 3.705.868,97 (ANP,2015); (iv) Cabos condutores das fases da LT (138kV): R\$ 404,84/m (ELETROBRAS, 2005); (v) Estruturas das torres de transmissão da LT: R\$ 236,49/m (ELETROBRAS, 2005); e (vi) Tubulações (par) de dutos PEAD (12mm) do emissário para admissão/descarte de água: R\$ 2.976,67/m (SINAPI, 2015). Adicionalmente, foi considerado o custo de R\$ 841.725,00 para cada obra especial para transposição do gasoduto sobre cursos d'água por meio do método de construção baseado no uso de cavalotes (ANP, 2015).

Com base no comprimento e nos custos das alternativas de infraestruturas avaliados foram calculados os custos simplificados de investimento com a aquisição dos principais equipamentos e materiais para todas as possibilidades de interligação de cada alternativa de UTE para cada uma das instalações de gasodutos e linhas de transmissão existentes, conforme tabela 2:

Tabela 2 – Dados dimensionais, quantitativos e custos das infraestruturas em estudo

DISTÂNCIA (m) ENTRE OS PONTOS NOTÁVEIS							
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE
PTE_A:	696	1500	2076	2628	2788	2041	-
PTE_B:	644	1761	1901	2246	2204	1417	6950
PTE_C:	1462	2481	2329	2430	2197	1536	-

CUSTO COM INFRAESTRUTURA (TUBULAÇÃO DE 16") DO GASODUTO							Custo Unitário	
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE	
PTE_A:	1.103.361,84	2.377.935,00	3.291.062,04	4.166.142,12	4.419.788,52	3.235.576,89	-	1.585,29 R\$/m
PTE_B:	1.020.926,76	2.791.695,69	3.013.636,29	3.560.561,34	3.493.979,16	2.246.355,93	11.017.765,50	1.585,29 R\$/m
PTE_C:	2.317.693,98	3.933.104,49	3.692.140,41	3.852.254,70	3.482.882,13	2.435.005,44	-	1.585,29 R\$/m

SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA	Custo Unitário (SPC)	LANÇADOR/RECEBEDOR PIG	Custo Unitário (LRP)
	3.705.868,97 R\$		9.757.195,84 R\$

CUSTO SIMPLIFICADO COM INFRAESTRUTURA (TUBULAÇÃO, SPC e LRP) DO GASODUTO							
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE
PTE_A:	14.566.426,65	15.840.999,81	16.754.126,85	18.470.931,93	18.724.578,33	17.540.366,70	-
PTE_B:	15.325.716,57	17.096.485,50	17.318.426,10	18.707.076,15	18.640.493,97	17.392.870,74	28.689.455,31
PTE_C:	17.464.208,79	19.079.619,30	18.838.655,22	18.157.044,51	17.787.671,94	16.739.795,25	-

QUANTIDADE DE TRAVESSIAS (CAVALOTES) PERCORRIDAS PELO GASODUTO							
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE
PTE_A:	0	0	0	1	1	1	-
PTE_B:	1	1	1	2	2	2	5
PTE_C:	2	2	2	1	1	1	-

CUSTO SIMPLIFICADO DAS OBRAS ESPECIAIS (CAVALOTES) DOS GASODUTOS							Custo Unitário	
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE	
PTE_A:	-	-	-	841.725,00	841.725,00	841.725,00	-	841.725,00 R\$
PTE_B:	841.725,00	841.725,00	841.725,00	1.683.450,00	1.683.450,00	1.683.450,00	4.208.625,00	841.725,00 R\$
PTE_C:	1.683.450,00	1.683.450,00	1.683.450,00	841.725,00	841.725,00	841.725,00	-	841.725,00 R\$

CUSTO (R\$) SIMPLIFICADO DAS INFRAESTRUTURAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV							Custo Unitário	
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE	
CONDUTORES:	1.123.094,47	933.390,85	576.061,20	318.898,32	368.777,29	652.515,02	4.047.555,60	408,84 R\$/m
ESTRUTURAS:	649.635,28	539.904,39	333.213,00	184.461,42	213.313,08	377.436,44	780.413,70	236,49 R\$/m
TOTAL:	1.772.729,75	1.473.295,24	909.274,20	503.359,74	582.090,37	1.029.951,47	4.827.969,30	

CUSTO (R\$) SIMPLIFICADO DAS INFRAESTRUTURAS DOS DUTOS DE EMISSÁRIO DE ÁGUA							Custo Unitário	
	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE	
DUTO PEAD 12mm:	3.000.483,36	3.631.537,40	833.467,60	2.214.642,48	5.536.606,20	2.190.829,12	3.274.337,00	2.976,67 R\$/m

Cumpra ressaltar que os custos completos gastos com a aquisição de equipamentos e materiais para os empreendimentos auxiliares (externos) da UTE abrangem diversos itens. Neste artigo o objeto do presente estudo de caso será limitado apenas aos custos de materiais de tubulação, lançadores-recebedores de pig, sistema de proteção catódica, tubulações do emissário para de admissão/descarte de água e cabos condutores e estruturas da linha de transmissão.

A partir das informações levantadas foi elaborada a seguinte função objetivo:

Minimizar (custo, em R\$ milhões):

$$13,46X_{12} + 13,46X_{13} + 13,46X_{14} + 1,1X_{25} + 2,38X_{26} + 3,29X_{27} + 5,01X_{28} + 5,26X_{29} + 4,08X_{210} + 1,86X_{35} + 3,63X_{36} + 3,86X_{37} + 5,24X_{38} + 5,18X_{39} + 3,93X_{310} + 4X_{45} + 5,62X_{46} + 5,38X_{47} + 4,69X_{48} + 4,32X_{49} + 3,28X_{410} + 4,77X_{5,11} + 5,10X_{6,11} + 1,74X_{7,11} + 2,72X_{8,11} + 6,12X_{9,11} + 3,22X_{10,11}$$

Sujeito às seguintes restrições apontadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Equações das Restrições do Problema:

$-X_{1,2} - X_{1,3} - X_{1,4} = -1$	$+X_{2,7} + X_{3,7} + X_{4,7} - X_{7,11} = 0$
$+X_{1,2} - X_{2,5} - X_{2,6} - X_{2,7} - X_{2,8} - X_{2,9} - X_{2,10} = 0$	$+X_{2,8} + X_{3,8} + X_{4,8} - X_{8,11} = 0$
$+X_{1,3} - X_{2,5} - X_{2,6} - X_{2,7} - X_{2,8} - X_{2,9} - X_{2,10} = 0$	$+X_{2,9} + X_{3,9} + X_{4,9} - X_{9,11} = 0$
$+X_{1,4} - X_{2,5} - X_{2,6} - X_{2,7} - X_{2,8} - X_{2,9} - X_{2,10} = 0$	$+X_{2,10} + X_{3,10} + X_{4,10} - X_{10,11} = 0$
$+X_{2,5} + X_{3,5} + X_{4,5} - X_{5,11} = 0$	$+X_{5,11} + X_{6,11} + X_{7,11} + X_{8,11} + X_{9,11} + X_{10,11} = +1$
$+X_{2,6} + X_{3,6} + X_{4,6} - X_{6,11} = 0$	$X_{i,j} \text{ maior ou igual a zero}$

Este tipo de problema já foi classificado anteriormente (DANTZIG, 1963, DANTZIG et al, 1978 e PIZZOLATO, 2013) como “Problema de Transporte”, também conhecido como *Network Flow Problem*, *Shortest path Problem* e *Least Cost Path*. As restrições acima estão relacionadas com o balanço de fluxo observado de cada um dos “nós” da rede de transporte do problema levantado.

Considerando que no problema delimitado existem variáveis lineares discretas e inteiras, o mesmo é considerado um problema de Programação Linear, que pode ser resolvido pelo método de busca sem derivadas SIMPLEX. Para resolução do problema foi utilizada a ferramenta solver LP *Simplex* desenvolvida por John Watson e Dan Fylstra disponível nas planilhas eletrônicas do Excel (LINS, 2006).

## 5. Resultados

A alternativa de localização da Usina Termelétrica de São Geraldo I estudada no EIA-RIMA aprovado pelo órgão ambiental do Espírito Santo previu uma Linha de Transmissão (LT) de 3.300m e um gasoduto de 6.950m. O local escolhido para esta Usina está situado cerca de 550m da fonte de água que seria utilizada no resfriamento de seus equipamentos.

O levantamento das principais rubricas de custo de investimento dessas infraestruturas auxiliares totaliza 36,79 milhões de reais, distribuídos da seguinte forma: (a) 28,69 milhões de reais referente ao gasoduto; (b) 4,83 milhões de reais referente à LT; e (c) 3,27 milhões de reais referente à tubulação de admissão/descarte de água.

Já a alternativa de localização da UTE São Geraldo I apurada de forma otimizada através do presente artigo, correspondente à alternativa UTE 3 suprida pelo PTE A, contemplou uma Linha de Transmissão de 780m e um gasoduto de 696m. Esta Usina está situada cerca de 140m da fonte de água que seria utilizada no resfriamento de seus equipamentos. A figura 4 ilustra a solução otimizada acima descrita.

As principais rubricas de custo de investimento dessas infraestruturas auxiliares totalizam 18,49 milhões de reais, sendo: (a) 16,75 milhões de reais referente ao gasoduto; (b) 0,91 milhões de reais referente à LT; e (c) 0,83 milhões de reais referente à tubulação de admissão/descarte de água.



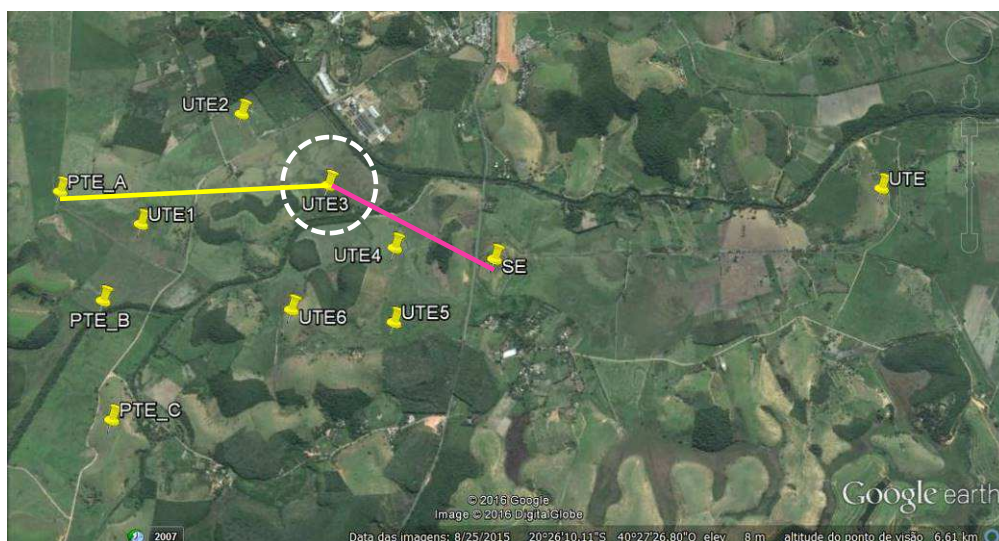


Figura 4 – Vista aérea da alternativa escolhida para localização da UTE em estudo

A análise da solução otimizada para o problema de localização da UTE São Geraldo I indica que seu custo de investimento das infraestruturas auxiliares é, cerca de, 49,73% menor que o custo associado à alternativa de localização proposta pela Wärtsilä na etapa de licenciamento ambiental. A obtenção da solução ótima para seleção de traçado das alternativas de infraestruturas auxiliares de termelétricas a gás natural somente pode ser obtida se o processo de avaliação das alternativas for considerado um problema de otimização e, que sejam verificadas, de forma exaustiva, todas as opções de interligação das infraestruturas.

Além disso, o comprimento total da faixa para instalação das infraestruturas auxiliares previstas no projeto da Wärtsilä, considerado para efeito do cálculo da área de influência com possível impacto no meio biótico (vegetação e fauna), é de 10.800m, enquanto que o comprimento total obtido na solução otimizada foi de 3.625m, ou seja, 66,46% menor. Menores valores de área de influência sujeitos ao impacto ambiental da faixa para instalação das infraestruturas auxiliares de um empreendimento podem contribuir para se alcançar menores custos de constituição, operação e manutenção desta faixa.

Se, mesmo diante dos resultados encontrados, fosse estabelecido que o fator determinante para a escolha da locação da UTE fosse o critério de uma localização de cota elevada, livre de inundações, similar à escolha adotada pela empresa Wärtsilä (altitude de cerca de 22m), a alternativa da UTE 6 (altitude aproximada de 18m), com custo de investimento de infraestruturas auxiliares totalizando 19,96 milhões de reais, teria custo cerca de 45,75% menor que o custo associado à alternativa de localização proposta pela proponente da termelétrica.

Importante destacar que os resultados obtidos são válidos considerando o escopo restrito delimitado na apresentação do estudo de caso. O aprimoramento das premissas inicialmente adotadas, no sentido de agregar um maior número de variáveis de custo que possibilitem um ajuste fino no modelo, é fundamental. Tal ajuste fino deve incluir a aplicação de mais critérios de localização. Convém ressaltar ainda que os resultados obtidos de localização de termelétricas não representam a localização ótima destes empreendimentos no estado do Espírito Santo. A localização ótima da localização da UTE neste estado seria obtida caso fosse realizada uma análise considerando um universo contendo todos os gasodutos/citygates supridores de gás natural e todas as subestações/linhas de transmissão existentes.

## 6. Considerações Finais

Apesar de existir uma grande quantidade de critérios objetivos e subjetivos a serem considerados na tomada de decisão acerca da localização de uma termelétrica a gás natural, a escolha final de tal localização deve contemplar o uso de uma metodologia que apresente uma solução otimizada.

Atualmente, a metodologia adotada pelas instituições de controle (agências reguladoras e órgãos ambientais) e pelos agentes de mercado dos setores do gás natural e energia elétrica aponta para soluções técnicas de localização de termelétricas a gás natural que cobrem parte dos critérios observados no Brasil e no exterior, mas não resultam em uma solução otimizada capaz de reduzir, ainda em tempo de projeto, os custos e os riscos decorrentes de aspectos internos e externos relacionados com a operação desses empreendimentos em áreas ambientalmente sensíveis.

Como melhoria no processo de seleção de alternativas de traçado nos projetos de novos gasodutos, que visam suprir gás natural para Usinas Termelétricas participantes de leilões da ANEEL, sugere-se que sejam adotados os seguintes procedimentos:

a) A criação de um banco de dados contendo os dados, informações levantadas e os critérios nacionais e internacionais adotados para localização de infraestruturas;

- b) A elaboração de modelos matemáticos das funções relacionadas com os dados levantados, tratados e calculados;
- c) A averiguação dos melhores traçados de gasodutos e linhas de transmissão interligados à termelétrica situada no município/estado de interesse.

## 7. Referências

- ANP, MINUTA DE EDITAL DE LICITAÇÃO PARA A OUTORGA DE CONTRATO DE CONCESSÃO - PRIMEIRA LICITAÇÃO PARA CONCESSÃO DA ATIVIDADE DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL RIO DE JANEIRO, pre-edital\_LTG1\_05012015\_vfinal1.pdf, acessado em 01/02/2016 no site [http://www.brasil-rounds.gov.br/round\\_TGas1/portugues\\_TGas1/Edital.asp](http://www.brasil-rounds.gov.br/round_TGas1/portugues_TGas1/Edital.asp), Versão de 5 de janeiro de 2015, 2015.
- DANTZIG, G. B., Linear Programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1963.
- DANTZIG, G. D., Harkey, R. P., Lansdowne, Z. F., Robinson, D.W., Maier, S.F., Formulating and solving the network design problem by decomposition, Stanford University, 1978.
- EFSEC – The State of Washington Energy Facility Site Evaluation Council, Wild Horse Wind Power Project - Section 4.7 Criteria Used for Transmission Route, 2005.
- ELETTROBRÁS, Revisão das Diretrizes para Elaboração de Orçamentos de Linhas de Transmissão, ANEXO 3 - Diretrizes para elaboração de orçamentos de Linhas de Transmissão.pdf, acessado em 01/02/2016 no site [www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes\\_administrativas/Documentos/](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Licitacoes_administrativas/Documentos/), Versão Fevereiro de 2005, 2005.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Plano de Expansão Decenal da Malha de Gasodutos de Transporte – PEMAT 2022, 2013.
- LINS, M. P. E., Calôba, G. M., Programação Linear: com aplicações em teoria dos jogos e avaliação de desempenho, Interciência, Rio de Janeiro, 2006.
- MENON, E. S., Pipeline Planning and Construction Field Manual, GPP, Elsevier, USA, 2011.
- PERLINGEIRO, C. A. G., Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos, Edgard Blücher, São Paulo, 2005.
- PETROBRAS, Estudo de Impacto Ambiental do Gasoduto Rota 3, 04-analise-de-alternativas.pdf, acessado em 01/02/2016 no site [www.ilhabela.sp.gov.br/wp-content/uploads/2015/10/](http://www.ilhabela.sp.gov.br/wp-content/uploads/2015/10/), Versão 01 de 2014, 2014.
- PIZZOLATO, N. D., Gandolpho, A. A., Técnicas de Otimização, LTC, Rio de Janeiro, 2013.
- SAMBASIVARAO, K., RAJ, D. K., DUA, D., An Expert System for Site Selection of Thermal Power Plants, ACSITEET- 2014, Journal of Basic and Applied Engineering Research 2014.
- TCU, Tribunal de Contas da União, Processo 008.472/2008-3, Anexo 9, DOC029-ANEXO%209.pdf, acessado em 01/02/2016 no site <http://www.senado.gov.br/comissoes/documentos/SSCEPI/>, abertura 17/04/08, 2008.
- SINAPI, Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, po\_ampliacao\_544.pdf, acessado em 01/02/2016 no site [www.tramandai.rs.gov.br/download/](http://www.tramandai.rs.gov.br/download/), Versão outubro de 2015, 2015.
- SHARMA, A., Dev, N., Attri, R., Identification of factors for site selection of thermal power plant (TPPS), YMAC, University of Science & Technology, Faridabad, India, 2015.
- WÄRTSILÄ – WÄRTSILÄ Brasil Ltda., Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) da UTE São Geraldo I – Vila Velha (ES), RIMA\_SAOGERALDO\_NOV2010.pdf, acessado em 01/02/2016 no site <http://www.meioambiente.es.gov.br>, SEAMA/ IEMA, Versão agosto de 2010, 2010.
- WING, Transmission & Construction, Construction Manual For Transmission Lines - RAJASTHAN RAJYA VIDYUT PRASARAN NIGAM LTD., July, Jaipur, India, 2007.