Campus de São Carlos

**LOCALIZAÇÃO DE USINAS TERMOELÉTRICAS
UTILIZANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
E MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Autora: Kátia Livia Zambon

Orientador: Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...23/07/04...

Ass.: *Leandro Couvati*

Kátia Livia Zambon

LOCALIZAÇÃO DE USINAS TERMOELÉTRICAS UTILIZANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Alber França Mendes Carneiro

São Carlos
2004

Class. TESE EESC
Cutt. 6365
Tombo T.151/04
Sysno 1384378

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Z24L Zambon, Kátia Livia
Localização de usinas termoeletricas utilizando
sistema de informacao geografica e metodos de decisao
multicriterio / Kátia Livia Zambon. -- São Carlos,
2004.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Alber França Mendes
Carneiro.

1. Usinas termoeletricas. 2. Sistema de Informacao
Geografica. 3. Metodo de decisao multicriterio.
4. Geraçao de energia elétrica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Analista de Sistemas **KATIA LIVIA ZAMBON**

Tese defendida e julgada em 07-05-2004 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **ADRIANO ALBER DE FRANÇA MENDES CARNEIRO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **ANTONIO NELSON RODRIGUES SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **MARIO OLESKOVICZ**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **DOREL SOARES RAMOS**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Dr. **JEAN CESARE NEGRI**
(Companhia Energética de São Paulo/CESP)

APROVADO

P/ Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Prof. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho aos meus pais
pela valiosa inspiração
e constante incentivo.

Agradecimentos

Ao professor Adriano, pelo encaminhamento, orientação e participação neste trabalho. Agradeço pelo apoio e confiança que depositou em mim desde quando iniciei minhas atividades como aluna especial no programa de mestrado da EESC – Departamento de Engenharia Elétrica.

Ao professor Antônio Nélon, pela valiosa contribuição no desenvolvimento deste trabalho, seus conhecimentos na utilização de ferramentas SIG e pela permissão de uso do software Transcad.

Ao Colégio Técnico da UNESP de Bauru, na pessoa do Prof. Carlos Augusto Magalhães (diretor do Colégio na maior parte do período em que cursei o doutorado e agora, vice-diretor), agradeço pelo apoio e conselho nas decisões de afastamento que tive que tomar. Agradeço ao atual diretor Prof. Edson Alberto de Antônio pelos afastamentos concedidos, à Mara Cristina Gimenez pela sua eficiência e presteza em me auxiliar nos processos burocráticos, além de sua amizade. Agradeço também, a todos os colegas de trabalho, que direta ou indiretamente me ajudaram em mais esta conquista, principalmente àqueles que sempre se preocuparam em saber como estava o desenvolvimento do meu trabalho.

Às empresas que forneceram dados e especificações técnicas para o desenvolvimento do trabalho: CTEEP (Bauru), ALL (Curitiba), Ferroban (Bauru e Campinas), Novoeste (Bauru), AES (Usina Hidroelétrica de Bariri), CETESB (Bauru e São Paulo), ANP (São Paulo), DAEE (Bauru) e outras empresas que disponibilizaram informações na *Web*.

À empresa CESP (São Paulo) um agradecimento especial, nas pessoas do Sr. Dorel Soares Ramos e Sr. Jean C. Negri, pela cessão do software LITOM, em versão de demonstração e pelas informações técnicas fornecidas. À Maria Cristina Pellegrini pela sua carinhosa recepção em minhas visitas à CESP e ao Sr. Sérgio Nieri Barillari pela sua atenção.

A toda minha família pelo incentivo e compreensão nas minhas ausências. Aos meus sobrinhos filhos Paula, Marcus, Gustavo, Geovana e Laís. E ao sobrinho posticho, Renan.

Um agradecimento especial ao Paulo Riberto Martins pela sua companhia, dedicação e compreensão de todas as fases do meu doutorado.

Agradeço a amizade das meninas do GRAC, pelos nossos encontros quase que semanais.

À Eloísa, Fátima, Annete, e Ariane, às vezes distantes fisicamente, mas sempre presentes com seu carinho e amizade. À Karen Langona, pelo apoio diário e pela sua colaboração nas traduções dos artigos.

À amiga Silvana Esperanza pela constante companhia nas caminhadas e a Lílian Barizon pela sua dedicada amizade.

Aos meus queridos amigos do LSEE: Ênio, Mário, Nilson, Patrícia, Renan e Renata pela harmonia no nosso ambiente de trabalho e agradável companhia.

Aos meus alunos e colegas de trabalho do Projeto de Profissionalização CTI – APAE (Bauru) que me ensinaram que ser diferente é normal e muito importante.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e do Departamento de Transportes da EESC – São Carlos, pela disposição no atendimento sempre que precisei dos serviços por eles prestados.

A todas as pessoas que mesmo não citadas nominalmente me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço especialmente a Deus por estar me abençoando em mais esta etapa da minha vida.

Resumo

ZAMBON, K. L. (2004). [Localização de Usinas Termoelétricas Utilizando Sistema de Informação Geográfica e Métodos de Decisão Multicritério](#). Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004, 122p.

No setor de energia elétrica, a área que se dedica ao estudo da inserção de novos parques geradores de energia no sistema é denominada planejamento da expansão da geração. Nesta área, as decisões de localização e instalação de novas usinas devem ser amplamente analisadas, a fim de se obter os diversos cenários proporcionados pelas alternativas geradas. Por uma série de fatores, o sistema de geração elétrico brasileiro, com predominância hidroelétrica, tende a ser gradualmente alterada pela inserção de usinas termoelétricas (UTES). O problema de localização de UTES envolve um grande número de variáveis através do qual deve ser possível analisar a importância e contribuição de cada uma. O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de localização de usinas termoelétricas, aqui denominado SIGTE (Sistema de Informação Geográfica para Geração Termoelétrica), o qual integra as funcionalidades das ferramentas SIGs (Sistemas de Informação Geográfica) e dos métodos de decisão multicritério. A partir de uma visão global da área estudada, as componentes espaciais do problema (localização dos municípios, tipos de transporte, linhas de transmissão de diferentes tensões, áreas de preservação ambiental, etc.) podem ter uma representação mais próxima da realidade e critérios ambientais podem ser incluídos na análise. Além disso, o SIGTE permite a inserção de novas variáveis de decisão sem prejuízo da abordagem. O modelo desenvolvido foi aplicado para a realidade do Estado de São Paulo, mas deixando claro a viabilidade de uso do modelo para outro sistema ou região, com a devida atualização dos bancos de dados correspondentes. Este modelo é designado para auxiliar empreendedores que venham a ter interesse em construir uma usina ou órgãos governamentais que possuem a função de avaliar e deferir ou não a licença de instalação e operação de usinas.

Palavras-chave: usinas termoelétricas; Sistema de Informação Geográfica; método de decisão multicritério; geração de energia elétrica.

Abstract

ZAMBON, K. L. (2004). [Location of Thermoelectric Plants Using Geographic Information System and Multicriteria Decision Analysis](#). Ph.D. Thesis. São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2004, 122p.

In the electric power industry, there is an area devoted to study alternatives for the expansion of the energy generation system. The decisions regarding the location and installation of new plants ought to be thoroughly analyzed in that planning activity, in order to foresee the likely scenarios resulting from the combination of distinct alternatives. For a number of reasons, the predominantly hydroelectric generation system historically set in Brazil tends to be gradually altered by the introduction of thermoelectric power plants (TPPs). The site selection problem involves, in the case of TPPs, a large number of variables, which contribute to the analysis process in various ways and with different levels of importance. The general goal of this work is the development of a location model of thermoelectric plants, here named SIGTE (an acronym for Geographic Information System for Thermoelectric Generation), which integrates the functionalities of the GIS tools (Geographic Information Systems) and multicriteria decision methods. Starting from an overall view of the studied area, this combination of techniques ensures a more realistic representation of the spatial components of the problem (e.g., the location of the municipalities, the transportation alternatives, the different voltages of transmission lines, areas of environmental preservation, etc.). It thus allows a straightforward inclusion of environmental criteria in the analysis. In addition, the SIGTE framework is also flexible enough to incorporate new decision variables. The model was applied in a case study carried out in the state of São Paulo, although it can be easily adapted for use in other systems or geographical areas given that the corresponding databases are available. SIGTE was envisaged to be a supporting tool to public and private stakeholders interested in building new power plants or to governmental agencies in charge of the regulation mechanisms required for the installation and operation of plants.

Keywords: thermoelectric power plants; Geographic Information System, Multicriteria Decision Analysis (MCDA), electric energy generation.

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema hidrotérmico típico.....	7
Figura 2 - Gráfico de geração de energia elétrica no Brasil (ONS, 2000).....	9
Figura 3 - UTEs previstas – Junho/2001	10
Figura 4 – Resolução SMA 42/94 para o Estado de São Paulo (CONSEMA, 1999) ...	12
Figura 5 - Mapa de algumas camadas utilizadas no SIGTE.....	19
Figura 6 - Fases do processo de localização de UTE no SIGTE.....	21
Figura 7 - Fase 1: geração de alternativas no SIGTE	22
Figura 8 - Bases de dados de linhas para transporte de combustíveis.....	31
Figura 9 - Tipos de transporte e seus respectivos combustíveis para UTEs	33
Figura 10 - Mapa das LTs no Estado de São Paulo	39
Figura 11 - Unidades de gerenciamento de recursos hídricos – SP / 1999	47
Figura 12 - Mapa representativo das APAs do Estado de São Paulo (APAS, 2004) ...	48
Figura 13 - Mapa classificatório da poluição dos municípios - SOM.....	54
Figura 14 - Mapa classificatório SOM – limites de enxofre (totais em Kg).....	55
Figura 15 - Mapa classificatório da poluição do ar utilizado pelo SIGTE	56
Figura 16 - Fase 2: ordenação de alternativas no SIGTE	58
Figura 17 - Função <i>fuzzy</i> (linear)	62
Figura 18 - Esquema simplificado de uma térmica convencional	67
Figura 19 – Mapa das alternativas ordenadas para a tecnologia TC-OCP - WLC.....	80
Figura 20 – Mapa das alternativas TC-OCP com análise de risco mínimo – OWA....	82
Figura 21 - Mapa das alternativas TC-OCP com análise de risco médio – OWA	83
Figura 22 - Mapa das alternativas TC-OCP com análise de risco máximo – OWA....	85

Figura 23 – Banco de dados de células no LITOM – atributo linhas de transmissão...	88
Figura 24 – Mapa do LITOM para a tecnologia TC-OCP	90
Figura 25 - Esquema simplificado de uma térmica em ciclo combinado.....	92
Figura 26 – Mapa das alternativas ordenadas para a tecnologia TG-CC - WLC	105
Figura 27 – Mapa das alternativas ordenadas pelo custo total: tecnologia TG-CC ...	107

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Capacidade instalada mundial (GW) em janeiro de 2001	8
Tabela 2 – Características técnicas da tecnologia adotadas no SIGTE	23
Tabela 3 – Exemplo hipotético de uma tabela de eficiência da tecnologia	29
Tabela 4 – Custo de construção de ramal do gasoduto	36
Tabela 5 – Custos modulares Eletrobrás – referência: set/01	43
Tabela 6 – Custos de distribuição - companhias atuantes no Estado de São Paulo ...	44
Tabela 7 – Dados para vazão de água dos municípios no Estado de São Paulo	47
Tabela 8 – Arquivo de entrada de dados RNA-SOM	53
Tabela 9 – Compatibilidade poluição tecnologia – municípios	57
Tabela 10 – Pesos definidos para os critérios fatores do SIGTE	61
Tabela 11 – Dados para aplicação da técnica OWA (1º passo)	65
Tabela 12 – Dados para aplicação da técnica OWA (2º passo)	65
Tabela 13 – Características técnicas da tecnologia TC-OCP	67
Tabela 14 – Tabela de eficiência da tecnologia TC-OCP	67
Tabela 15 – Dados para cálculo de CO → tecnologia TC-OCP	70
Tabela 16 – Dados para cálculo de CT em 138kV → tecnologia TC-OCP	73
Tabela 17 – Dados representativos: localização da tecnologia TC-OCP – WLC	79
Tabela 18 – Dados representativos: análise de risco mínimo TC-OCP – OWA	81
Tabela 19 – Dados representativos: análise de risco médio TC-OCP – OWA	83
Tabela 20 – Dados representativos: análise de risco máximo TC-OCP – OWA	84
Tabela 21 – Exemplos de configuração de transporte no LITOM	87
Tabela 22 – Custo de transporte ferroviário no LITOM	87

Tabela 23 – Compatibilidade do nível de poluição do ar no LITOM	89
Tabela 24 – Características técnicas da tecnologia TG-CC	92
Tabela 25 – Tabela de eficiência da tecnologia TG-CC	93
Tabela 26 – Dados para cálculo de CI → tecnologia TG-CC.....	95
Tabela 27 – Dados para cálculo de CO → tecnologia TG-CC.....	96
Tabela 28 – Dados para cálculo de CT em 138kV → tecnologia TG-CC	99
Tabela 29 – Dados representativos: localização da tecnologia TG-CC – WLC	104
Tabela 30 – Dados de custos (CI, CO e CT) da tecnologia TG-CC.....	106

Lista de Abreviaturas e Siglas

AES	- American Energy System
ALL	- América Latina Logística
AM/FM	- Automated Mapping/Facilities Management
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	- Agência Nacional de Petróleo
APAS	- Área de Preservação Ambiental
CESP	- Companhia Energética de São Paulo
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CIF	- Cost, Insurance and Freight (Custo, Seguro e Frete)
COELBA	- Companhia de Eletricidade da Bahia
CONSEMA	- Conselho Estadual do Meio Ambiente
CTEEP	- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DAEE	- Departamento de Águas e Energia Elétrica
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
EIA/RIMA	- Estudos de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental
FERROBAN	- Ferrovias Bandeirantes
FERRONORTE	- Ferrovias Norte Brasil
FOB	- Free on Board
GIS	- Geographic Information System
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LITOM	- Localização Integrada de Termoeletricas com Objetivos Múltiplos

LTs	- Linhas de Transmissão
NOVOESTE	- Ferrovia Novoeste S.A.
PPT	- Programa Prioritário de Termoeletricidade
RAP	- Relatório Ambiental Preliminar
RNA	- Redes Neurais Artificiais
SAEGET	- Sistema de Análise da Expansão da Geração Termoelétrica
SEADE	- Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SIG	- Sistemas de Informação Geográfica
SIG-T	- Sistemas de Informação Geográfica para Transportes
SIGTE	- Sistemas de Informação Geográfica para Geração Termoelétrica
SMA	- Secretaria do Meio Ambiente
SOM	- Self Organizing Maps
TBG	- Transportadora Brasileira do Gasoduto Bolívia – Brasil S.A.
TC-OCP	- Térmica Convencional – Óleo Combinado Pesado
TG-CC	- Turbina Gás – Ciclo Combinado
UGRHI	- Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UTES	- Usinas Termoelétricas

Sumário

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – PANORAMA DA ENERGIA ELÉTRICA	7
3 – LOCALIZAÇÃO E SIG	13
3.1 – GEOPROCESSAMENTO.....	13
3.2 – SIG NO SETOR ELÉTRICO	14
3.3 – SIG TRANSCAD.....	16
4 – MODELO SIGTE	20
4.1 – FASE 1: GERAR ALTERNATIVAS	21
4.1.1 – VARIÁVEL TECNOLOGIA.....	22
4.1.2 – VARIÁVEL TRANSPORTE.....	29
4.1.3 – VARIÁVEL LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	38
4.1.4 – VARIÁVEL ÁGUA.....	44
4.1.5 – VARIÁVEL ÁREAS DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL (APAs)	47
4.1.6 – VARIÁVEL POLUIÇÃO DO AR	49
4.2 – FASE 2: ORDENAR ALTERNATIVAS.....	57
4.2.1 – DEFINIÇÃO DE PESOS PARA OS CRITÉRIOS.....	59
4.2.2 – NORMALIZAÇÃO DE CRITÉRIOS	61
4.2.3 – COMBINAÇÃO DE CRITÉRIOS	62
5 – ESTUDO DE CASO.....	66
5.1 – TÉRMICA CONVENCIONAL – ÓLEO COMBUSTÍVEL PESADO	66
<i>Critérios de avaliação econômica.....</i>	<i>68</i>
<i>Critérios de avaliação ambiental.....</i>	<i>75</i>
5.2 – TÉRMICA A GÁS – CICLO COMBINADO	91
<i>Critérios de avaliação econômica.....</i>	<i>93</i>
<i>Critérios de avaliação ambiental.....</i>	<i>102</i>
6 – CONCLUSÕES.....	108
7 – REFERÊNCIAS.....	116

1 - Introdução

A energia elétrica é proveniente da transformação de outras formas de energia, sendo as principais o calor e a energia potencial da água. Nas Usinas Termoelétricas (UTES) são utilizados diferentes tipos de combustíveis capazes de gerar calor, tais como carvão, óleo combustível, derivados de petróleo, gás natural e outros. Já nas hidroelétricas, o energético utilizado é a água, aproveitando-se sua energia potencial.

Em países com abundância de água, como é o caso do Brasil, o sistema de geração é predominantemente hidráulico, sendo as UTES utilizadas para o abastecimento de regiões isoladas e na complementação do sistema, para suprir a demanda em períodos com condições hidrológicas desfavoráveis. Seu uso é evitado por causa dos custos de operação elevados, devido aos combustíveis nelas empregados.

Por outro lado, é fato que o potencial hidroelétrico a ser explorado é finito. Em algumas regiões praticamente já se chegou a um esgotamento destes recursos, sendo que o remanescente potencial hidroelétrico está localizado em regiões cada vez mais afastadas do mercado. Grande parte do aproveitamento potencial restante está nas bacias do Amazonas e Tocantins.

Além disso, o cenário brasileiro de geração de energia elétrica vem sendo modificado pelo constante crescimento do consumo de energia, em função do estágio de desenvolvimento econômico do país, pela perspectiva de esgotamento do potencial hidroelétrico, bem como pela falta de investimentos governamentais no setor. Este panorama foi agravado por períodos de estiagem, chegando a ponto de haver um racionamento de energia em algumas partes do país para se evitar cortes no fornecimento (os "apagões", nos anos de 2001 e 2002).

Neste contexto se insere a ampliação do parque termoelétrico brasileiro, incluindo o programa termoelétrico de transição, para ser aplicado em regiões ou situações em que o potencial hidroelétrico seja menos competitivo, pelo alto custo de construção das hidroelétricas ou por sua distância em relação aos mercados consumidores (ELETROBRÁS, 2000). Além disso, os projetos termoelétricos possuem uma série de atrativos fundamentais, como o curto prazo de maturação, maior

flexibilidade de localização, disponibilidade de produção física menos dependente de condições hidrológicas, etc (Neto *et al.*, 1997). Entretanto, a inclusão de UTEs deve ser feita de forma cautelosa, estudando-se os custos, benefícios e os riscos de um empreendimento deste porte.

O planejamento da expansão da geração termoelétrica deve ser realizado com o desenvolvimento de metodologias que proporcionem subsídios para a importante decisão da localização de novas UTEs que sejam econômicas e ambientalmente viáveis, sendo necessário analisar as alternativas viáveis para os diversos combustíveis e tecnologias existentes.

A utilização de ferramentas de apoio à decisão no processo de localização de qualquer tipo de empreendimento é de fundamental importância para análises econômicas, sociais e ambientais. Estas metodologias podem fornecer visões globais para a área delimitada para o estudo e depois permitir que análises locais, ou de viabilidade, sejam realizadas em locais pré-estabelecidos, com potenciais para a construção da UTE. No processo de estudo da viabilidade, variáveis como o uso do solo, fauna e flora, aprovação da população local em audiências públicas, etc., são consideradas. A definição do tipo de análise (global ou local) proporcionará os subsídios necessários para identificar quais serão as variáveis incluídas para a resolução do problema (Malczewski, 1999).

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de localização de usinas termoelétricas, aqui denominado SIGTE (Sistemas de Informação Geográfica para Geração Termoelétrica), que integre, por um lado, o ponto de vista dos empreendedores interessados em sua construção e, por outro lado, o ponto de vista do planejamento da expansão energética assistida por órgãos ambientais governamentais, que aprovam o licenciamento de instalação e operação deste tipo de empreendimento.

Os objetivos específicos baseiam-se em: (i) – integrar no modelo as eficientes funcionalidades das ferramentas SIGs (Sistemas de Informação Geográfica); (ii) - incorporar a componente espacial de forma a obter uma representação mais próxima possível da realidade; (iii) – propor análises através dos métodos de decisão multicritério a fim de ordenar as alternativas; (iv) – permitir a inserção de novos critérios de decisão ao modelo sem prejuízo da abordagem utilizada; (v) - testar o modelo para a realidade do Estado de São Paulo; (vi) – permitir a adaptação do modelo para outro sistema ou região, com a alimentação dos bancos de dados correspondentes.

A contribuição para o conhecimento que se procura protagonizar com o presente trabalho é a abordagem inovadora e multidisciplinar à questão da localização

de UTEs, caracterizada pelo processo de avaliação proporcionado pelas componentes espaciais (com o uso de SIG) e a investigação de critérios de decisão (com as técnicas de decisão multicritério) envolvidos neste tipo de localização, propondo um novo modelo e sua real aplicação.

Os critérios podem ser traduzidos na forma de variáveis relevantes ao problema como: tecnologia selecionada para a avaliação e seus devidos custos de instalação e/ou operação, combustíveis utilizados para a operação da UTE e seus respectivos custos (combustível + transporte), nível de poluição proveniente da operação da usina versus nível de poluição do local, requisito mínimo de água para resfriamento dos equipamentos versus vazão de água disponível, áreas de preservação ambiental, etc.

A análise espacial dos dados é uma importante aliada para este tipo de decisão e os SIGs permitem que as informações do mundo real sejam retratadas de forma muito próxima da realidade, através da localização geográfica (Star & Estes, 1991). O SIG utilizado neste trabalho é o Transcad, que além de ser um SIG completo, possui rotinas específicas para o transporte (Caliper, 1996). Neste caso, utilizado para a roteirização do melhor caminho para o transporte de combustíveis para o abastecimento das usinas e para o transporte da energia elétrica gerada, através das linhas de transmissão.

A área delimitada para os estudos de caso apresentados neste trabalho é o Estado de São Paulo, composto atualmente por 645 municípios e a variável espacial é determinada pela área e o centro geográfico de cada município, procurando representar a ocorrência dos fenômenos na forma de entidades gráficas, o que permite uma aproximação da realidade.

A metodologia proposta neste trabalho permite a identificação de métodos para referenciar geograficamente as informações necessárias à geração de alternativas para a localização de UTEs. Por isto, pode ser aplicada a qualquer sistema ou região, desde que haja base de dados disponível dos índices que compõem as variáveis do problema.

É fato destacar que alguns fatores necessitaram minuciosas análises no desenvolvimento deste trabalho. O primeiro ponto se refere à dificuldade de definir os critérios para a modelagem do problema, depois a forma como seriam abordados e ainda, a prioridade dos mesmos para a aplicação das técnicas de análise multicritério. Esta definição também envolveu a coleta de dados em setores como: transportes (ferrovias, rodovias e gasoduto), energia e meio ambiente (poluição e água). Outro ponto foi a indisponibilidade de dados para algumas variáveis, o que exigiu a busca de

metodologias que suprissem a falta destes dados, de forma a permitir, através de cálculos indiretos, a devida e completa atualização dos bancos de dados.

No setor de transportes foram realizadas visitas para obter informações técnicas e dados para o trabalho. Algumas destas visitas foram a empresas ferroviárias, como a Ferrobán (Ferrovias Bandeirantes em Bauru e Campinas), Novoeste (Ferrovia Novoeste S.A. em Bauru), ALL (América Latina Logística em Curitiba) e, por contato telefônico, a Ferronorte (Ferrovias Norte Brasil em Campinas). Todas forneceram material para a pesquisa, tanto mapas (em papel) como valores médios praticados no transporte, estes últimos necessários para as formulações propostas. Também foi contatada uma empresa que opera o gasoduto no Estado de São Paulo, a TBG (Transportadora Brasileira do Gasoduto Bolívia-Brasil S.A.), que forneceu informações sobre o traçado do gasoduto e outros dados. Empresas rodoviárias como a Centrovias (São Carlos) e o DER (Departamento de Estradas de Rodagem em São Paulo) foram contatadas para a obtenção de alguns dados, tendo sido o mapa georeferenciado utilizado no SIGTE obtido junto ao departamento de Transportes da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo).

No setor de energia elétrica as empresas visitadas foram a CESP (Companhia Energética de São Paulo), que forneceu uma versão do software LITOM (Localização Integrada de Termoelétricas com Objetivos Múltiplos), o qual será abordado a seguir. Também foi obtido todo apoio técnico e acompanhamento no desenvolvimento do modelo SIGTE, incluindo toda a parte de formulações dos custos analisados. Outra empresa deste setor foi a CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica em Bauru), a qual forneceu alguns dados referentes à transmissão de energia elétrica.

Na área ambiental, com relação à poluição, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental em Bauru) foi visitada pessoalmente e a sede de São Paulo foi contatada por telefone. Nesta instituição foi realizado um levantamento e se constatou que não havia dados de medição do nível de poluição do ar que abrangessem todo o Estado de São Paulo, objeto de teste deste estudo. No caso de necessidade de aferição em algum local específico a empresa instala estações de medição para a averiguação. Isto provocou o estudo e a proposta de uma ferramenta para a determinação do nível de poluição do ar nos municípios, na qual foi utilizada uma técnica de redes neurais artificiais e dados indiretos de consumo de combustíveis móveis e estacionários (Zambon *et al.*, 2003b).

Ainda se tratando de meio ambiente, a variável referente à disponibilidade de água nos rios dos municípios foi objeto de estudo e visita a empresa do setor. No

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica em Bauru) foram disponibilizados dados e técnicas para a obtenção da vazão de referência dos municípios.

As pesquisas realizadas em empresas de diversos setores contribuíram para o enriquecimento de informações contidas no trabalho e provocaram a geração de outras ferramentas que foram acopladas ao modelo SIGTE. O objetivo destas pesquisas em relação à coleta de dados foi o de propor uma modelagem que não tivesse restrições para ser testada na área pré-determinada, no caso o Estado de São Paulo, por falta de dados. O resultado foi a obtenção de um modelo aplicável em qualquer área ou região com a devida alimentação de seus bancos de dados.

O software citado e que foi disponibilizado em uma versão de demonstração pela CESP é chamado LITOM ou ainda denominado por SAEGET (Sistema de Análise da Expansão da Geração Termoelétrica). Este programa foi utilizado como base para obtenção de dados e formulações e foi muito útil em toda a pesquisa desenvolvida. A abordagem utilizada faz uso de células uniformes, com dimensões de 25 x 33 km para representar o território. Uma célula é composta por um ou vários municípios. As respostas deste procedimento são fornecidas como células válidas para a implantação da UTE (PROMON-PSR, 1996).

A diferença fundamental entre os modelos SIGTE e LITOM está na abordagem das componentes espaciais adotadas, o que incide diretamente na definição dos dados para os municípios. No LITOM os dados atribuídos à célula são representados por valores médios pertencentes aos municípios de cada célula ou retirados do município sede (normalmente o de maior extensão ou relevância econômica). No SIGTE os dados são referentes a cada município e sua divisão coincidente com a divisão geopolítica do estado. Outras diferenças podem ser salientadas como o transporte de combustíveis, que no SIGTE é realizado através de bases de dados georeferenciadas, incluindo o custo de construção de ramais e permitindo que se considere esta variável como um critério fator para a geração das alternativas. No LITOM, um modelo auxiliar otimiza o caminho entre as células que possuem conexão a fim de minimizar os custos de transporte, excluindo as alternativas não factíveis. Uma revisão realizada recentemente inclui os custos de construção de ramais do gasoduto, mas para uma pequena área de estudo. Outra diferença é que no LITOM existem atributos de fundamental importância para a avaliação ambiental, mas estes não são alimentados porque nem os órgãos que deveriam possuir estes dados não os têm. No SIGTE, como está exposto no capítulo 4, os critérios ambientais utilizados possuem dados para todos os municípios do Estado de São Paulo, com a proposta de utilizar técnicas auxiliares para a estimativa de valores. Em Zambon *et al.* (2003c) foi

realizado um estudo comparativo entre os dois modelos com o objetivo de abordar as diversas variáveis do problema e suas principais diferenças.

A estrutura da tese é composta por esta introdução e por outros capítulos descritos a seguir.

No capítulo 2 é exposto o panorama do Setor Elétrico Brasileiro em relação à geração de energia elétrica, com algumas das principais mudanças que estão ocorrendo no setor e suas conseqüências.

Como dito anteriormente, o uso de SIG é fundamental para o estudo em questão, pois permite que dados espaciais sejam manipulados de forma a obter um cenário muito próximo da realidade geográfica. A decisão de localizar um empreendimento considera muitas variáveis que devem representar o mundo real para satisfazer os critérios analisados. Esta ferramenta é discutida no capítulo 3 com ênfase às aplicações existentes no setor elétrico.

No capítulo 4 o modelo SIGTE é detalhado, apresentando os critérios adotados e as características relevantes. Também são apresentadas as considerações para a manipulação da estrutura de dados representada no ambiente georeferenciado.

Os estudos de casos propostos são apresentados no capítulo 5, dividindo-se em tipos de ciclos de operação das usinas. Estes estudos são analisados separadamente porque as usinas que operam em ciclo simples (turbina a vapor) ou em ciclo combinado (turbina a vapor + turbina a gás) possuem características distintas, com a potência gerada a gás influenciada pela altitude e temperatura local.

As conclusões, no capítulo 6, são referentes ao modelo proposto e às premissas adotadas, muitas vezes utilizadas para suprir a indisponibilidade de dados. Também são discutidas as potenciais vantagens da modelagem com o uso de SIG e das técnicas de avaliação multicritério para o problema de localização de UTEs. Os testes realizados na área do Estado de São Paulo, possibilitando a visão da aplicação do modelo com dados reais para os critérios estabelecidos, são comentados neste capítulo, além de algumas recomendações para desenvolvimentos futuros e continuidade deste trabalho.

2 - Panorama da Energia Elétrica

Os Sistemas Elétricos de Potência podem ser divididos em três segmentos: geração, transmissão e distribuição da energia. A geração compreende tudo o que diz respeito à transformação de outras formas de energia em energia elétrica. A transmissão tem a função de interligar as usinas geradoras às subestações de transmissão e o segmento denominado por distribuição se encarrega de distribuir a energia aos diferentes tipos de consumidores.

O sistema hidrotérmico típico é apresentado, de forma simplificada, na Figura 1, refletindo o sistema energético brasileiro.

Figura 1 - Sistema hidrotérmico típico

A geração de energia elétrica se dá por fontes renováveis de energia (a energia potencial da água, a força dos ventos, o sol e a biomassa) e por fontes não renováveis (combustíveis fósseis e nucleares).

Segundo Püttgen *et al.* (2003) os principais tipos de usinas geradoras de energia elétrica são as hidroelétricas e as termoelétricas. A cada tipo de usina está associado um conjunto de problemas, seja para a construção destas usinas ou para sua operação. Os recursos naturais de cada país e as necessidades e oportunidades

é que determinarão as características para a predominância de geração de energia elétrica. A Tabela 1 mostra a capacidade instalada com base em dados mundiais no século 20 e a geração de energia elétrica por UTEs com uma representatividade de 66,6%.

Tabela 1 – Capacidade instalada mundial (GW) em janeiro de 2001

Região	Térmica	Hidro	Nuclear	Outras/ Renováveis	Total
América do Norte	642	176	109	18	945
América Central e do Sul	64	112	2	3	181
Europa Ocidental	353	142	128	10	633
Europa Oriental e URSS	298	80	48	0	426
Oriente Médio	94	4	0	0	98
África	73	20	2	0	95
Ásia e Oceania	651	160	69	4	884
Total (GW)	2.175	694	358	35	3.262
Total (%)	66,6	21,3	11,0	1,1	100,0

Fonte: Energy Information Administration (apud Püttgen *et al.*, 2003)

O Brasil possui um grande número de rios, que têm possibilitado a construção de usinas hidroelétricas, algumas de grande porte, permitindo que se tenha uma participação hidráulica de cerca de 93% do processo de geração de energia elétrica (Rodríguez, 2001).

Um gráfico demonstrativo da geração de energia no Brasil é apresentado na Figura 2. A cada tipo de geração há um índice associado, representando sua capacidade instalada.

Com a predominância da geração hidroelétrica, e apesar de só ter 25% deste potencial já explorado, instaurou-se uma crise energética no país, provocada principalmente pela falta de investimentos no setor e agravada pelas condições hidrológicas desfavoráveis. Isto provocou um déficit de energia que chegou a se refletir em racionamento nos anos de 2001 e 2002, como precaução para se evitar cortes no fornecimento.

Figura 2 - Gráfico de geração de energia elétrica no Brasil (ONS, 2000)

Diante deste cenário, algumas medidas foram tomadas e propôs-se a implantação de um programa termoeletrico prioritário ou emergencial e um de transição, com vistas à gradual redução do potencial hidroelétrico disponível, ou mesmo para compensar seu esgotamento em algumas regiões.

O Programa Prioritário de Termoeletricidade (PPT) foi instituído pelo Ministério das Minas e Energia em fevereiro de 2000 pelo decreto Nº.3371, visando à implantação de novas unidades geradoras termoeletricas. Este programa já passou por reestruturações, devido às constantes mudanças do setor elétrico no Brasil (PPT, 2000).

Na Figura 3 é apresentado um mapa contendo as UTEs previstas inicialmente no PPT para o Estado de São Paulo. As usinas estão divididas em viabilizadas e não viabilizadas na data de junho de 2001, porém algumas das que estavam em processo de viabilização tiveram seus projetos postergados e até mesmo abandonados por parte dos empreendedores, como a UTE de Araraquara e a usina denominada Carioba, pertencente ao município de Americana.

O PPT teve uma dimensão inicial prevendo a construção de várias unidades geradoras de energia elétrica via termoeletricidade. No entanto, este programa foi emergencial, realizado em um período crítico do setor elétrico brasileiro, e está sendo constantemente revisto e reformulado, reduzindo-se suas pretensões. Os motivos aparentes são os próprios processos de licenciamento a que este tipo de empreendimento deve se submeter para receber aprovação, condições hidrológicas mais favoráveis a partir do ano de 2002, amenizando o problema de abastecimento de

água nos reservatórios das hidroelétricas, além, é claro, do custo mais elevado da energia de origem termoeleétrica em relação à de origem hidroelétrica.

Figura 3 - UTEs previstas – Junho/2001

Pelos fatos ocorridos e alguns outros já previstos, o Brasil está passando por um processo de reestruturação do setor elétrico, resultado da implantação de um modelo comercial competitivo. Isto poderá acarretar a transição de um sistema considerado basicamente hidroelétrico, com pouquíssima participação térmica, para um sistema com crescentes participações térmicas (Vieira Filho *et al.*, 2001).

Dada à natureza do problema para o setor elétrico e sua abrangência, há a necessidade de se evitar que soluções em curto prazo comprometam ações que seriam adequadas no futuro. Deve-se propor diferentes soluções para o problema e analisá-las sob diversos aspectos (Goldemberg, 1995).

Em todo o processo de localização de novas unidades geradoras envolvidas no planejamento da expansão para geração de energia elétrica, seja para construção de usinas hidroelétricas ou termoeletricas, haverá a consideração de inúmeros aspectos no empreendimento, seja de ordem técnica e econômica, bem como ambiental e social.

Apesar de algumas medidas anunciadas em janeiro de 2002 ainda não terem sido totalmente esclarecidas, provocando incertezas no setor, é fato que, pelos motivos já citados, o aumento do número de UTEs no Brasil parece ser irreversível, principalmente pelas previsões de esgotamento dos recursos hídricos em certas regiões.

As construções destas novas unidades passam por processos de aprovação por órgãos governamentais. No caso do Estado de São Paulo, quando há interesse de um empreendedor em construir uma nova unidade termoeletrica é necessário realizar alguns procedimentos para licenciamento, com avaliação de impacto ambiental regulamentado pela SMA (Secretaria do Meio Ambiente) e verificado pelo CONSEMA (Conselho Estadual do Meio Ambiente), através do processo descrito na Figura 4.

Neste processo de licenciamento é realizado um diagnóstico ambiental, como levantamento das áreas de influência, uso do solo, vegetação e fauna, caracterização da bacia hidrográfica, caracterização climática, qualidade do ar, proximidade de rios e suas respectivas vazões, etc. Além destes, impactos sócio-econômicos, como geração de empregos, aumento do tráfego do sistema viário e outros fatores, devem ser considerados.

O procedimento de licença ambiental é iniciado com a preparação do RAP (Relatório Ambiental Preliminar) para obtenção da licença prévia junto à Secretaria do Meio Ambiente. Esta Secretaria analisa o RAP e três caminhos podem ser percorridos até o empreendedor obter a licença.

O caminho indicado por 1 na Figura 4 é tomado quando o RAP não apresenta todas as características necessárias para a obtenção da licença e deve ser refeito para que possa ser reapresentado. Na indicação 2 são descritos os procedimentos para empreendimentos de grande porte e na 3 para empreendimentos de médio porte, que não necessitam do EIA/RIMA (Estudos de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental).

Para a implantação de uma UTE devem ser analisados vários aspectos reais do problema para que se possa obter como solução um local o menos prejudicial possível ao meio ambiente, mas que seja economicamente viável.

O programa térmico exige um planejamento adequado, cujo objetivo é preparar o País para administrar, no futuro, a implantação de novas fontes geradoras, com uma contribuição termoeletrica crescente. Isto exige o desenvolvimento de metodologias, a fim de propiciar uma expansão termoeletrica econômica e ambientalmente viável (RE-SEB, 1996). Sendo assim, a decisão de implantação de uma UTE deve ser tomada com base em fatores reais e analisada, a princípio, com dados sobre a localização em uma área global, a qual pode ser definida como a área de um estado,

para que se possa obter um panorama das necessidades de cada região e o melhor tipo de usina a ser ali instalada. A seguir devem ser realizados estudos de viabilidade a fim de definir, dentre os locais com potencial selecionados no estudo global, aspectos relevantes ao local.

Figura 4 – Resolução SMA 42/94 para o Estado de São Paulo (CONSEMA, 1999)

3 – Localização e SIG

O problema da localização consiste em encontrar o local ótimo para instalar um determinado projeto, enquanto se procura minimizar os custos de investimento e operação deste projeto (Kilmer *et al.*, 2001). No caso deste trabalho o estudo tem o objetivo de encontrar o melhor local para instalar uma UTE, baseado nas necessidades de investidores do setor elétrico e de relevantes órgãos reguladores, que aprovam este tipo de empreendimento, e também em analisar os diferentes cenários para uma tecnologia pré-selecionada.

Tipicamente, os problemas de localização envolvem um grande número de alternativas viáveis e critérios de avaliação conflitantes e incomensuráveis (Malczewski, 1999). Os Sistemas de Informação Geográfica, também designados por SIGs ou GIS (*Geographic Information Systems*) e os métodos de decisão multicritério (MCDM – *Multicriteria Decision Making*) podem beneficiar a solução de problemas do mundo real baseados em planejamento espacial (Ewart, 1994; Eastman *et al.*, 1998; Jankowski e Ewart, 1996).

3.1 - Geoprocessamento

O termo geoprocessamento envolve um conceito bastante abrangente e representa qualquer tipo de processamento de dados georeferenciados. Os SIGs estão inseridos no contexto de geoprocessamento como uma ferramenta para processar dados gráficos e não gráficos, com ênfase às análises espaciais e modelagens de superfícies (Câmara *et al.*, 2001).

Os SIGs se enquadram muito bem na definição computacional de Sistemas de Informação, que são conjuntos integrados de rotinas de programação desenvolvidas para representar ou manipular grandes quantidades de dados, armazenados em um banco de dados. No caso dos SIGs, além dos atributos (campos), estes bancos de dados contêm informações que representam o mundo real através de coordenadas geográficas, possibilitando análises espaciais (Star & Estes, 1991).

A identificação espacial dos dados é representada por estruturas de dados, tais como os **pontos** de localização, que podem significar escolas, hospitais, indústrias; as **linhas**, que podem representar os rios de uma cidade, rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, etc.; as **áreas** que caracterizam a área de um município, de um estado, de uma região, etc. (Birkin *et al.*, 1996).

Segundo Rhind* (1989 apud Ramos, 2000), o que diferencia um SIG de outros sistemas de informação é a geografia. A geografia faz parte da vida diária das pessoas e está presente na maior parte das decisões a serem tomadas. É verdade que as pessoas não percebem que ao escolher um caminho para ir ao trabalho, ou escolher o local onde vão comprar uma casa, estas são decisões apoiadas pela geografia do município onde moram.

A relação com a geografia também é válida para as empresas que têm que decidir onde irão construir suas indústrias, seus escritórios, seus postos de vendas, onde instalar aterros sanitários para não afetar a saúde da população, a melhor rota para entrega de produtos etc. A grande contribuição dos SIGs deriva de sua capacidade para resolver problemas deste tipo.

Pela flexibilidade de se trabalhar com dados geográficos propiciada pelos SIGs e pelo conjunto de fatores que compõem o problema de localização de UTEs é que se optou pelo uso desta ferramenta.

3.2 - SIG no Setor Elétrico

Com a constante evolução do mundo moderno, tomar decisões com múltiplos objetivos e de forma realista tornou-se imprescindível. Neste ponto a análise espacial de dados, antes feita manualmente, pode agora, com o uso de ferramentas eficientes como os SIGs, ser realizada de maneira rápida e segura.

No setor elétrico, os SIGs têm contribuído para fornecer informações importantes no planejamento da expansão dos sistemas de potência. A maior contribuição desta ferramenta se encontra na área de transmissão e distribuição de energia elétrica (Jardini, 1997).

As empresas do Setor Elétrico buscam métodos eficientes para gerenciar suas redes de distribuição e transmissão de energia. Estes métodos são refletidos na melhoria do fornecimento, na redução de custos operacionais, no melhor aproveitamento dos recursos existentes e outros benefícios.

* Rhind, D. W. (1989), *Why GIS?* ARC/News, v. 11, n. 3.

A aplicação de SIG otimiza os serviços porque permite mapear as áreas de concessão e todos os elementos pertencentes às redes elétricas, com todos os dados cadastrados e referenciados geograficamente.

Segundo Bias (1998) neste processo de integração da tecnologia de geoprocessamento à realidade das empresas de energia elétrica foram identificadas muitas razões para o uso desta ferramenta.

A CESP qualificou o uso da ferramenta SIG como uma possibilidade para reduzir custos com materiais; a COELBA (Companhia de Eletricidade da Bahia) apresentou, como uma das razões para o uso, a precisão na obtenção de dados para a análise da expansão das redes de energia elétrica; a ELETROPAULO, dentre outros pontos destacados, citou a necessidade e a facilidade de automatizar o sistema de mapeamento e cadastro da empresa.

Muitos outros projetos podem ser citados como exemplo do uso de SIG no setor elétrico, como o da COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica), que mapeou sua área de concessão e fez o cadastramento das redes de distribuição urbana e rural, com o objetivo de manter um banco de dados atualizado a fim de desenvolver, de forma confiável, as atividades básicas de distribuição com o auxílio de SIG (Marques *et al.*, 1996).

Para sistemas baseados em AM/FM (*Automated Mapping/Facilities Management*), a ferramenta SIG permite considerar cada elemento que afeta de alguma forma a rede de distribuição e o fluxo da corrente, garantindo as análises necessárias do modelo elétrico presente no mundo real (Weber, 1995).

Mesmo com as dificuldades encontradas no processo de levantamento e aquisição de dados, que são muito complexos, as empresas de energia têm se preparado para aprimorar seus serviços com a utilização de tecnologias como geoprocessamento. O objetivo almejado é a otimização de processos provenientes de um gerenciamento mais seguro e rápido, além de atingir um alto grau de qualidade nos serviços.

Outras aplicações de SIG na área de planejamento incidem diretamente no propósito deste trabalho, a localização de UTEs. A Panda Energy International, uma companhia de energia dos Estados Unidos, utilizava até outubro de 2000 um processo de localização de usinas em mapas de papel para auxiliar na determinação do melhor local para instalar a UTE. Segundo Lori Alsobrook, coordenador de desenvolvimento de negócios da Panda: *“Este processo é extremamente manual. Isto requer semanas para pesquisar a infra-estrutura adequada, seguida de meses para verificar os possíveis locais com potencial para a instalação”*. Com o desenvolvimento do PowerMap implementado sob a estrutura do GIS, este processo tornou-se rápido e

eficiente. No entanto, ele contém as informações referentes ao mercado de energia da América do Norte, não sendo divulgados os critérios e parâmetros utilizados em sua concepção, bem como propostas de aplicação para outros mercados de energia (Arnold, 2002).

A aplicação desenvolvida por Delaney and Lachapelle (2003) utiliza o SIG para determinar os locais mais promissores para instalar uma usina de carvão em Franklin, Illinois, EUA. Os critérios utilizados foram explanados no contexto do trabalho, mas são específicos para a realidade daquele estado e para usinas a carvão.

3.3 - SIG Transcad

O SIG utilizado para o desenvolvimento do modelo SIGTE referente ao processo de seleção de alternativas para a localização de UTEs é o Transcad. Este *software* é considerado um SIG completo, incluindo rotinas específicas para tratamento de problemas de transporte (Caliper, 1996).

Os SIGs permitem a combinação de vários critérios (variáveis abordadas para a resolução do problema) principalmente os de natureza espacial, além de serem capazes de manipular um grande volume de dados geográficos (Kao *et al.*, 1997).

Na aplicação desenvolvida foram incluídas bases de dados que pudessem representar as variáveis envolvidas no problema, como os municípios, os meios de transporte (rodovias, ferrovias e gasoduto), linhas de transmissão e outras.

No caso específico do transporte de combustíveis e do transporte da energia elétrica gerada, ambos representados pelas bases de dados de linhas, pôde-se aplicar as rotinas de tratamento para a escolha do melhor caminho a ser percorrido, respeitando-se os limites impostos pela constituição da própria rede. A importância atribuída a estes cálculos deve-se ao fato de que os valores de distância encontrados incidem diretamente sobre o custo de operação e de transmissão de uma UTE.

Para a utilização de ferramentas que adotam informações no espaço, algumas considerações são necessárias para a manipulação dos dados. Por exemplo, quando se trabalha com os municípios do Brasil a partir de uma escala determinada, as cidades podem ser representadas por pontos. Neste caso as diferenciações internas às cidades desaparecem e opta-se por analisar as relações entre as cidades, como o trajeto a ser percorrido para transportar os combustíveis para a operação das usinas. Estas considerações terão conseqüências diretas sobre os processos que se pretende estudar (Barcellos & Bastos, 1996).

No processo de localização de informações espaciais faz-se necessário definir o âmbito em que o objeto de pesquisa se encaixa. Neste caso, optou-se por trabalhar com a análise global, representada no estudo de caso pela área ocupada pelo estado de São Paulo, analisando-se o fenômeno de implantação de UTEs nos municípios. A análise de viabilidade realizada dentro de cada município, análise local, seria um outro estudo, não incluído neste trabalho. A aplicação desta modelagem pode ser adaptada para qualquer sistema ou região, desde que haja dados disponíveis para a alimentação dos bancos de dados necessários. Com a diversificação de objetos existentes no mundo real é necessário fazer uma simplificação e definir um modelo de dados que possa representar o espaço e que atinja o objetivo proposto pelas análises espaciais. No entanto, é importante que se tenha um modelo que contemple a realidade.

Dois modelos de dados espaciais podem ser considerados para representação da realidade: vetorial e *raster*.

No vetorial, as entidades são representadas por pontos, linhas ou áreas, com os significados inerentes a cada caso estudado. Por exemplo, um município pode ser representado por um ponto com uma localização específica dentro do mesmo se a análise do problema está sendo feita de forma global, relevando-se aspectos como distância entre os municípios, disponibilidade de transportes rodoviários, ferroviários etc. Pode ainda ser representado pela entidade área, se a análise for local e desejar-se encontrar uma localização ótima considerando aspectos do uso do solo, tráfego urbano, valores de densidade populacional, a não proximidade do centro urbano, etc.

A vantagem da utilização deste modelo está na representação mais próxima da realidade, principalmente em relação aos atributos que são designados às entidades. A desvantagem muitas vezes é a necessidade de simplificação para permitir a representação e as premissas adotadas em decorrência deste fato.

Em modelos do tipo *raster* a realidade é representada por uma malha que é colocada sobre o mundo real. Esta malha forma células regulares, às quais são designados atributos. Tem como vantagem a utilização de ferramentas mais simples para análises, em decorrência da regularidade das células, mas tem como desvantagem a representação de diversas características de uma mesma área, sendo preciso criar várias malhas, cada uma contendo atributos relativos a apenas uma característica do mundo real (Ramos, 2000).

O SIG-Transcad utiliza o modelo de dados do tipo vetorial e as entidades representativas para o modelo proposto para este estudo de localização de UTEs são descritas abaixo de acordo com Silva & Waerden (1997). Algumas premissas foram adotadas e serão descritas no capítulo 4.

- Base de dados de **área**: caracteriza-se por uma série de coordenadas (x, y) que definem segmentos de linhas que fechados formam uma área. Para este estudo delimitou-se a área correspondente ao Estado de São Paulo.
- Base de dados de **pontos**: caracteriza-se por ponto toda entidade geográfica que pode ser localizada por um par de coordenadas (x, y) capaz de representar o local de um fenômeno geográfico. Neste caso a representação ponto identifica os centros geográficos dos 645 municípios de São Paulo, dados fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e que contém a localização central da área urbana do mesmo.
- Base de dados de **linhas**: são definidas por, no mínimo, 2 pares de coordenadas (x, y) utilizadas para representar feições do mapa que são muito estreitas para serem mostradas como áreas. São compostas por arcos e nós.
 - Base de dados de **linhas 1**: correspondente à malha ferroviária. Nesta base, alguns nós formam a camada (*layer*) de pátios, considerados pelas empresas como pontos de carga e/ou descarga de combustíveis.
 - Base de dados de **linhas 2**: composta pela malha rodoviária do Estado de São Paulo.
 - Base de dados de **linhas 3**: representa o trecho do gasoduto no Estado de São Paulo.
 - Base de dados de **linhas 4**: representa as linhas de transmissão de energia elétrica com tensão de 138 kV.
 - Base de dados de **linhas 5**: representa as linhas de transmissão de energia elétrica com tensão de 440 kV.

Cada camada (seja de pontos, linhas ou áreas) armazena em um banco de dados relacional, além da informação geográfica como a latitude e longitude, outros atributos (campos). Por exemplo, para a camada de municípios estes atributos podem ser seus respectivos nomes, população, nível de poluição, distância calculada até o

pátio mais próximo da base de ferrovias, distância de cada ponto à linha de transmissão, custos e outros, os quais relacionados poderão fornecer uma resposta ao problema da localização de UTEs.

Pode-se observar na Figura 5 algumas bases de dados utilizadas para a resolução do problema. As bases de dados densas como a que representa as rodovias, linhas de transmissão e a de pontos representando os 645 municípios, não permitem uma boa visualização no mesmo mapa devido à sua dimensão. Por isto, apenas algumas camadas ou layers foram apresentadas. Também para os municípios foram selecionados apenas alguns pontos para efeito de visualização.

Figura 5 - Mapa de algumas camadas utilizadas no SIGTE

4 – Modelo SIGTE

O processo de localização para a geração termoelétrica abordado no SIGTE refere-se à análise global da área sob investigação, representando as variáveis em sua forma ampla e obtendo como resposta os municípios (delimitados pelas suas áreas) de um determinado estado, por exemplo. Este estudo possibilita que se tenha como base o direcionamento de locais com potencial para a instalação da UTE, o combustível que pode ser utilizado em sua operação e análises econômicas simplificadas com intuito comparativo para efeito de cotejo das alternativas. Uma outra proposta de estudo, não incorporada ao SIGTE é a análise de viabilidade que transfere a visão macro dos municípios selecionados para aspectos relativos às suas áreas, como estudo do tipo de relevo, uso e ocupação do solo e outros detalhamentos.

No SIGTE, o processo é dividido em duas fases. A primeira é a geração de alternativas (municípios com potencial para receber a tecnologia da UTE) realizada através da análise de critérios relevantes ao problema. Estes critérios podem ser do tipo fator, aumentando ou diminuindo a aptidão da variável em questão na solução final do problema, ou do tipo exclusão, o qual restringe a localidade por não apresentar as características necessárias. A outra fase refere-se à classificação das alternativas selecionadas. É nesta fase que são inseridos os métodos de decisão multicritério, a fim de obter a ordenação das alternativas segundo os critérios mais relevantes e determinados sob a análise em questão. Mediante a decisão multicritério é possível analisar diferentes cenários, em virtude dos pesos que podem ser atribuídos pelos decisores.

A abordagem realizada e apresentada na Figura 6 foi adotada no SIGTE e representa as duas fases do processo de localização de alternativas para a instalação da UTE.

Figura 6 - Fases do processo de localização de UTE no SIGTE

4.1 – Fase 1: gerar alternativas

Na fase de geração das alternativas, o estabelecimento dos critérios a serem abordados no modelo é uma das etapas mais importantes para seu sucesso. É nesta etapa que se identifica o problema, avalia as ferramentas disponíveis, verifica a existência de informações para a alimentação dos bancos de dados e finalmente aplica-se o modelo à área selecionada para estudo. A seguir são descritos os critérios analisados no SIGTE e as premissas adotadas em sua modelagem.

Crítérios são atributos que podem ser quantificados ou avaliados e que contribuem para a decisão. A busca da solução de um problema pode ocorrer em ambiente onde os critérios são conflitantes, onde o ganho de um critério poderá causar uma perda em outro. Estes critérios podem ser do tipo fator, compostos por variáveis que acentuam ou diminuem a aptidão de uma determinada alternativa para o objetivo

em causa ou podem ser do tipo exclusão, variáveis que limitam as alternativas em consideração na análise, excluindo-as do conjunto solução (Mousseau, 1997).

A identificação dos critérios e a definição dos mesmos em fatores ou exclusões se faz necessário para a aplicação dos métodos de análise multicriterial, os quais são indicados para problemas onde existam vários critérios sob investigação. Para a localização de uma UTE, por exemplo, os critérios analisados são, em geral, conflitantes, já que uma usina economicamente viável não é garantia de ser ambientalmente aconselhável. Na Figura 7 estão dispostos os critérios estabelecidos na fase de geração de alternativas para o modelo SIGTE e, na seqüência, suas definições.

Figura 7 - Fase 1: geração de alternativas no SIGTE

4.1.1 – Variável Tecnologia

A definição da tecnologia a ser utilizada é fator primordial para desencadear o processo de geração de alternativas na localização de UTEs. O mercado oferece uma vasta gama de turbinas, geradores e todos os equipamentos necessários para a geração de energia elétrica e possibilita que estudos sejam realizados considerando

aspectos decisivos para a localização, decorrentes da definição destas características técnicas. Algumas características relevantes adotadas para o modelo em questão são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características técnicas da tecnologia adotadas no SIGTE

Característica	Descrição
Módulo	indica a potência em MW da tecnologia; cada configuração tem uma capacidade típica em MW
Custo de Instalação	valor relativo aos equipamentos necessários para sua implantação
Emissão de Dióxido de Enxofre (kg/MJ)	substância emitida na operação da usina, indicará em nível qualitativo (Alto, Médio ou Baixo), ou quantitativo, a emissão do poluente
Emissão de Óxido de Nitrogênio (kg/MJ)	substância emitida na operação da usina, indicada por índices qualitativos (Alto, Médio ou Baixo), ou quantitativos
Emissão de Particulados (kg/MJ)	substância emitida na operação da usina, indicada por índices qualitativos (Alto, Médio ou Baixo), ou quantitativos
Fator para Custo de Internação (K)	fator relativo ao custo de importação dos equipamentos, incluindo, de forma optativa, custos de impostos e taxas no investimento
Vida Útil do equipamento	é o período para o cálculo do custo anualizado do investimento, dado em anos
Custo Variável de O&M (US\$/MWh)	custo variável de operação e manutenção, dependendo da energia gerada
Custo Fixo de O&M (US\$/kWano)	custo fixo de operação e manutenção, que não depende da geração, incluindo equipe de operação
Requisito de Água (m³/s)	relativo ao tipo de resfriamento da tecnologia
Ajuste de Temperatura e Altitude	valor lógico (sim ou não) para indicar se a tecnologia depende do ajuste de temperatura e altitude
Potência gerada a gás	para tecnologias que utilizam turbinas a gás
Combustíveis que utiliza	lista os combustíveis que podem ser utilizados na operação da usina
Tabela de Eficiência (exemplo na Tabela 3)	inclui o fator de capacidade da usina em %, o <i>Heat Rate</i> (taxa de consumo de energia ou de calor) e a fração de tempo em %. É composta por parâmetros críticos que afetam a competitividade econômica do projeto.

Outras informações fazem parte do rol de características técnicas, como ano de disponibilidade comercial, estágio de desenvolvimento, tipo de usina (ponta, base ou intermediária), etc. Porém, são informações passivas, não relevantes ao problema da localização de UTEs proposto no SIGTE.

Custo de Investimento

Com a definição da tecnologia e suas respectivas características técnicas, é possível calcular o custo de investimento para a implantação da UTE, um dos componentes do item critérios de avaliação econômica, apresentado na Figura 7 (pág.22).

O custo de investimento (CI) inclui os custos com os equipamentos para a construção da usina, bem como custos de importação destes equipamentos (k), sobre os quais incide um grande número de impostos, tempo de importação e outros, pois a maioria destes equipamentos é proveniente de outros países. Todos os cálculos são relacionados com a potência a ser gerada (Módulo) e a potência de referência do sistema ($P_{\text{referência}}$), utilizada como parâmetro base. Nesta formulação é considerado o critério econômico da inserção do empreendimento no sistema, seja como concessionária, produtor independente ou autoprodutor. Inclui também o retorno do investimento, através do fator de recuperação de capital (FRC).

Na Equação 1 é apresentado o cálculo de CI (PROMON-PSR, 1996; Fortunato *et al.*, 1990). Esta formulação pode ser aplicada para tecnologias que utilizam ou não turbinas a gás. Para as usinas geradoras que utilizam turbinas a gás, parâmetros locais como altitude e temperatura alteram sua potência (Fadigas, 1997).

$$CI = \frac{\text{Custo}_{\text{Pot}} * \text{FRC} * k * \left(\frac{\text{Pot}_{\text{AltTemp}}}{P_{\text{referência}}} \right)^{0,15}}{8,76 * \frac{E}{P_{\text{referência}}}} \quad (1)$$

Observação: no trabalho foi utilizado o critério econômico E, designando a situação em que o projeto será inserido no sistema (concessionária, produtor independente ou autoprodutor). No entanto, este critério pode ser modificado e o termo $\frac{E}{P_{\text{referência}}}$ pode ser substituído pelo fator de capacidade médio da usina.

→ para tecnologias que utilizam turbinas a gás

$$\text{Custo}_{\text{Pot}} = \frac{C_{\text{inst}} * \text{Módulo}}{\text{Pot}_{\text{AltTemp}}} \quad (2)$$

$$\text{Pot}_{\text{AltTemp}} = \text{Módulo} - \text{Pot}_{\text{Gás}} + (\text{Variação}_{\text{Alt}} * \text{Variação}_{\text{Temp}} * \text{Pot}_{\text{Gás}}) \quad (3)$$

→ para tecnologias que não utilizam turbinas a gás

$$\text{Custo}_{\text{Pot}} = C_{\text{inst}} \quad (4)$$

$$\text{Pot}_{\text{AltTemp}} = \text{Módulo} \quad (5)$$

Com:

C_{inst} = custo de instalação da tecnologia, incluindo custos operacionais da montagem dos equipamentos.

Módulo = capacidade da tecnologia, dada em MW, determinando quanto de energia elétrica será gerada quando a usina está operando com capacidade máxima.

$\text{Pot}_{\text{AltTemp}}$ = potência gerada considerando a altitude e temperatura do local (Equação 3). Para usinas que não utilizam turbinas a gás, este valor será referente ao Módulo da usina, apresentado na Equação 5.

$\text{Pot}_{\text{Gás}}$ = valor numérico referente à parcela de potência gerada com turbina a gás no ciclo combinado. Em geral, num ciclo combinado, 2/3 da potência é proveniente das turbinas a gás e 1/3 das turbinas a vapor. Em usinas que operam somente com turbina a vapor, o valor da potência gerada a gás é nulo.

As variáveis $\text{Variação}_{\text{Alt}}$ e $\text{Variação}_{\text{Temp}}$ utilizadas na Equação 3 são calculadas através da sequência de passos fornecida pelo Algoritmo 1.

Algoritmo 1 – Cálculo da variação da potência em função da temperatura e da altitude

```

VariaçãoAlt = 1
VariaçãoTemp = 1
Se (Ajuste_Temperatura_Altitude <> nulo) e (PotGás <> nulo) então
  Se (Ajuste_Temperatura_Altitude = SIM) e (PotGás > 0) então
    VariaçãoAlt = 1 – (0,01 / 80) * Altitude
    Se Temperatura_Local > 15 então
      VariaçãoTemp = 1 + (0,01 / 1,4) * (15 – Temperatura_Local)
  
```

Ajuste_Temperatura_Altitude = atributo lógico que indicará se a potência gerada na usina depende ou não desses ajustes. Para usinas que não utilizam turbinas a gás, este ajuste não é necessário.

Altitude = valor atribuído em metros para o local a ser considerado nas alternativas para a instalação da tecnologia.

Temperatura_Local = valor numérico referente à temperatura média anual do local, calculada em função da altitude e latitude de cada município. Para a formulação utilizada neste trabalho, representada pela Equação 6, segue o que foi proposto por Pinto *et al.* (1972).

$$T_{ANUAL} (^{\circ}\text{C}) = 38,98 - 0,005783 * \text{Altitude(m)} - 0,01125 * \text{Latitude(min)} \quad (6)$$

Obs.: esta formulação foi utilizada pela indisponibilidade de dados de temperatura para toda a área proposta no estudo de caso.

FRC = fator de recuperação de capital, utilizado para calcular o valor anual do investimento, dado por:

$$FRC = \frac{i * (1+i)^{nv}}{[(1+i)^{nv} - 1]} \quad (7)$$

Com: i = taxa de desconto anual;

nv = vida útil do equipamento, em anos.

k = fator de custo de internação, utilizado para correção dos preços de produtos importados, levando em conta as despesas tributárias e de transporte (PROMON-PSR, 1996). É uma simplificação para que se possa considerar os impostos. É calculado através da fórmula:

$$k = \{ (1 + v) * (1 + u) * [(1 + z) * (1 + y) + x] + t \} \quad (8)$$

Onde:

- v = alíquota do IPI;
- u = alíquota do ICMS;
- z = alíquota referente a frete e seguro;
- y = alíquota do imposto de importação;
- x = despesa alfandegária;
- t = taxa de expediente.

$P_{referência}$ = potência de referência, utilizada para parametrizar os custos de uma tecnologia selecionada em função de uma potência de referência para efeito de comparação entre diversos empreendimentos.

O termo $\left(\frac{Pot_{AltTemp}}{P_{referência}} \right)^a$ é utilizado como um fator de economia de escala para

corrigir o custo de instalação. Ao expoente a foi atribuído um valor médio de 0,15 utilizado a partir de referências para tecnologias convencionais (turbinas a vapor) e para tecnologias de ciclo combinado (turbinas a vapor e turbinas a gás) como apresentado a seguir (EPRI, 1993).

Tecnologias convencionais		Tecnologias ciclo combinado	
a	escala de potência	a	escala de potência
0,15	500 – 1000 MW	0,26	250 – 500 MW
0,24	400 – 500 MW	0,16	500 – 750 MW
0,25	300 – 400 MW		
0,28	200 – 300 MW		

$8,76$ = constante associada ao número de horas no ano e utilizada para a conversão de kW em MW.

E = critério econômico. Indica como o projeto será inserido no sistema. Para este critério foram realizadas algumas alterações e a formulação aqui apresentada e utilizada poderia ser discutida e redefinida, principalmente com relação ao autoprodutor.

- **Concessionária** $\Rightarrow$ agente titular de concessão ou permissão federal para explorar a prestação de serviços públicos de energia elétrica (ANEEL, 2001).

$$E = FC_{Max} * P_{referência} \quad (9)$$

- **Produtor Independente** $\Rightarrow$ é a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que receberam concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco (ANEEL, 2001).

$$E = (1 - (\text{Consumo}_{\text{próprio}} / 100)) * FC_{Max} * P_{referência} \quad (10)$$

- **Autoprodutor** $\Rightarrow$ é a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que receberam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, podendo comercializar excedentes, eventual e temporariamente, mediante autorização da ANEEL (ANEEL, 2001).

$$E = (1 - (\text{Consumo}_{\text{próprio}} / 100)) * FC_{Médio} * P_{referência} \quad (11)$$

Onde:

Consumo_{próprio} = consumo de energia elétrica interno da usina (bombas, ventiladores, iluminação, etc.) dado em porcentagem.

FC_{Max} = fator de capacidade máximo da usina, com valores retirados da tabela de eficiência da tecnologia (vide exemplo hipotético na Tabela 3).

Algoritmo 2 – Cálculo de FCMax

```

FCMax = 0
Ler do início ao final da tabela de eficiência da tecnologia
Para cada valor lido, verificar:
    Se (Fator_Capacidade / 100) > FCMax então
        FCMax = (Fator_Capacidade / 100)

```

FCMédio = fator de capacidade médio econômico da usina com valores retirados da tabela de eficiência da tecnologia. Este valor inclui definições de tempo que a usina irá funcionar, dependendo de paradas programadas para manutenção, desligamento em períodos com condições hidrológicas favoráveis em sistemas hidrotérmicos, etc. O Algoritmo 3 apresenta os passos para efetuar este cálculo.

Algoritmo 3 – Cálculo de FCMédio

```

FCMédio = 0
Ler do início ao final da tabela de eficiência da tecnologia
Para cada valor lido, acumular:
    FCMédio = FCMédio + (Fator_Capacidade / 100) * (Fração_Tempo/100)

```

Tabela 3 – Exemplo hipotético de uma tabela de eficiência da tecnologia

Fator_Capacidade (%)	Heat Rate	Fração_Tempo (%)
25	Valor_1	25
50	Valor_2	25
75	Valor_3	25
100	Valor_4	25

4.1.2 – Variável Transporte

O transporte exerce um papel importante na escolha do local para a instalação de uma usina termoeletrica. Em primeiro lugar, está relacionado ao suprimento de combustível até o município escolhido para a implantação da UTE e depois porque

envolve todo o processo de operação da mesma estando diretamente relacionado ao seu custo de operação. Por isto, o estudo neste ponto é realizado considerando as bases de dados de linhas georeferenciadas no SIGTE, as quais permitem que se obtenha o menor caminho para que o combustível saia de uma origem e chegue a um destino, utilizando o meio de transporte previamente selecionado.

No caso do Estado de São Paulo, o gasoduto é um importante aliado à instalação de usinas termoeletricas, porque permite transportar o combustível gás natural da Bolívia, o qual possui um baixo nível de poluição e que no momento tem grandes expectativas de incentivos econômicos e garantia de abastecimento por parte do governo, diante da crise energética. Recentemente, a Petrobrás descobriu imensas reservas do produto na Bacia de Santos, gerando expectativas de um crescimento significativo no consumo de gás.

Outra forma de transporte é o ferroviário, que tem uma boa participação no transporte de derivados de petróleo. A malha ferroviária de São Paulo foi operada por empresas estatais por muito tempo e passou por diversas crises, que levaram ao sucateamento de muitas linhas e uma imagem negativa quanto ao seu uso. Apesar disto, empresas privadas que assumiram o controle depois da privatização estão inserindo novas tecnologias com o intuito de modernizar e restaurar seus equipamentos, atraindo um grande volume de negócios, possibilitando a utilização do extenso trecho que percorre praticamente todo o Estado, como mostrado na Figura 8.

As rodovias também podem ser usadas para transportar combustíveis para a operação das usinas, porém utilizadas apenas para pequenos trechos, por causa do custo em relação ao volume transportado. Este transporte é realizado através de caminhões, que conduzem volumes relativamente pequenos. Seu uso poderia ser viável, no entanto, em conjunto com outros tipos de transporte, caracterizando o transporte multimodal.

O custo do transporte de combustíveis permitirá que o custo unitário de operação da usina seja calculado para os diferentes municípios que não foram descartados do processo de análise por outras condições, sendo uma variável importante no processo de localização das usinas.

As bases de dados envolvidas no processo de transporte de combustível para operação das UTEs são definidas por redes, que são estruturas compostas de nós e arcos que unem esses nós, cada qual com sua representatividade.

Uma rede de transporte é um conjunto de locais geográficos conectados entre si por uma certa quantidade de arcos. A estrutura geométrica de uma rede de transporte é, por conseguinte, o padrão topológico formado por seus elementos (nós e arcos). As redes, no entanto, podem apresentar problemas na sua análise caso a

mesma tenha sido construída de forma inconsistente, ou seja, se os nós da rede não estiverem conectados, não permitirão a interconexão. Muitas vezes, pequenos problemas na construção de uma rede podem distorcer completamente os resultados das análises (nos casos em que se procura otimizar o caminho a ser percorrido). Existem técnicas para verificar este tipo de erro como, o proposto por Raia Jr & Silva, (1998), que foram aplicadas às bases de linhas envolvidas no problema de transporte de combustíveis.

Neste estudo, os meios de transporte georeferenciados e analisados pelo SIGTE são apresentados na Figura 8, formando as bases de dados de linhas utilizadas nas análises.

Alguns modos de transporte e os respectivos e possíveis combustíveis utilizados na geração de energia elétrica pelas UTEs podem ser observados na Figura 9. Para o estudo proposto no SIGTE foram incorporados como bases de dados de linhas as ferrovias, as rodovias e o gasoduto. O oleoduto e a hidrovias foram apresentados com alguns dados, apenas como informação, porque não foram utilizados nos testes propostos e não havia disponibilidade destes dados no momento. No entanto, podem ser incorporados ao modelo como base de dados de linhas georeferenciadas e serem incluídos nas análises, sem prejuízo da metodologia adotada.

Figura 8 - Bases de dados de linhas para transporte de combustíveis

Na fase de geração de alternativas (Figura 7), a variável transporte é analisada como um critério fator para a solução do problema, não sendo mais manipulada como a variável de caráter restritivo proposta em estudos anteriores (Zambon *et al.*, 2002). Neste ponto surgiu a necessidade de verificar a pré-existência de transporte para levar o combustível até o município em que será instalada a usina em análise. Nos casos em que houver a necessidade de se construir ramais de interligação, os custos serão incorporados ao problema.

Na Figura 9, alguns custos de construção de ramais foram obtidos em GEIPOT (2003), enquanto outros foram pesquisados diretamente com as empresas de cada setor, mas todos representam valores médios.

A inclusão do custo de construção de ramais de transporte é uma variável que incorpora em seu cálculo muitos outros aspectos relevantes, como uso de material usado ou novo (caso das ferrovias), tipo de estrutura (bitola no caso de ferrovias, tipo de pavimento para rodovias, tubulação para o gasoduto, entre outros), aspectos ambientais (tipo de relevo e solo), vida útil dos materiais, manutenção, entre outros. Em pesquisas realizadas diretamente em empresas do setor de transporte, os técnicos responsáveis são unânimes em afirmar que estes acordos, para a construção de pequenos trechos, devem ser analisados e calculados para cada situação em questão. Pelos motivos apresentados, estudos foram realizados e houve dificuldade em incorporar os custos de construção de ramais na avaliação de critério econômico das alternativas para a localização de UTEs.

O custo de construção de ramais foi incorporado ao custo de operação da usina (Equações 14 e 16) e a proposta é anualizar o custo de investimento da construção em função de uma vazão de referência relativa ao combustível transportado (por isto este cálculo será realizado para cada tecnologia sob análise). Houve dificuldade na definição de onde e como incorporar o custo de construção dos ramais no critério de avaliação econômica do problema e uma das formas encontradas foi a adotada neste trabalho. No entanto, esta formulação pode ser revista e, se conveniente, alterada, não acarretando nenhum problema ao modelo proposto.

No LITOM, recentemente houve a inclusão dos custos de construção de ramais do gasoduto para testes em uma pequena área específica do Estado de São Paulo. No entanto, na versão preliminar do software, a variável transporte foi considerada como de exclusão das alternativas entre células origem e destino que não possuísem conexão, dados estes manipulados através de tabelas de distâncias e custos correspondentes, geradas em modelo auxiliar de transporte.

Figura 9 - Tipos de transporte e seus respectivos combustíveis para UTEs

Custo de Operação

Em consequência da seleção do tipo de tecnologia para a instalação da UTE, é possível definir o combustível a ser utilizado e seu respectivo modo de transporte. Com estas definições pode-se calcular o custo de operação da usina, um dos critérios de ordem econômica contemplados no SIGTE.

O custo de operação (CO) de uma usina termoeletrica é utilizado para estimar o valor a ser gasto na operação da usina, incluindo manutenção dos equipamentos, pessoal contratado para trabalhar em sua operação, combustíveis utilizados (custo + transporte), etc. Este custo é dividido em três parcelas, descritas a seguir:

- **Custo Básico de Operação (Custo_Básico)**, o qual considera o custo do combustível e o custo do seu transporte, estando relacionado com a qualidade do mesmo para a geração de energia elétrica, dada através do seu poder calorífico.
- **Custo Variável de Operação e Manutenção (Custo_Var)**, está relacionado com a quantidade de energia gerada, incluindo eventuais paradas para manutenção dos equipamentos.
- **Custo Fixo de Operação e Manutenção (Custo_Fixo)**, não está relacionado com a quantidade de energia gerada, e sim com custos fixos como da equipe de operação e valores fixos de manutenção dos equipamentos.

$$CO = \text{Custo_Básico} + \text{Custo_Var} + \text{Custo_Fixo} \quad (12)$$

Custo Básico de Operação

$$\text{Custo_Básico} = 1000 * \text{Custo_1kJ} * \text{FMédioTec} / \text{FCMédio} \quad (13)$$

Observação: esta formulação foi adotada para os testes apresentados e em novas discussões achou-se coerente modificar a Equação 13 e substituir o FCMédio por FCMax, além de incluir uma parcela representativa da aquisição de energia a curto prazo.

Onde:

Custo_1kJ = cálculo do custo para gerar 1kJ de energia na usina.

$$\text{Custo_1kJ} = \frac{\text{Custo_Combustível} + \text{Custo_Transporte} + \text{Custo_Ramal}}{\text{Poder_Calorífico_Superior}} \quad (14)$$

Onde:

Custo_Combustível = custo FOB (*Free on Board*) do combustível no município de origem e/ou de entrada na área sob análise.

Custo_Transporte = custo relativo ao tipo de transporte utilizado no percurso da origem ao destino. Seu valor é dado pela Equação 15.

$$\text{Custo_Transporte} = \text{Distância_Percorrida} * \text{Custo_km} \quad (15)$$

Onde:

Distância_Percorrida = pode representar todo o percurso da origem ao destino ou o trecho até onde existe meio de transporte para a conexão com o ramal que será construído.

Custo_km = custo por km referente ao tipo de transporte utilizado.

Custo_Ramal = custo relativo à construção do ramal de interligação entre o meio de transporte pré-existente e o município destino. É um valor que inclui custos médios da obra, além de operação e manutenção do ramal em função da vazão de referência do combustível que a tecnologia sob análise utilizará, dado pela Equação 16.

$$\text{Custo_Ramal} = \text{Valor_Ramal_km} * \text{Distância_Construída} \quad (16)$$

Onde:

Valor_Ramal_km = valor médio anualizado da obra (através do fator de recuperação de capital - FRC, descrito no custo de investimento, seção 4.1.1) em

função da vazão de referência de cada combustível transportado, acrescido do custo de operação e manutenção da rede, apresentado na Equação 17. Para o caso específico do gasoduto, onde é considerado o diâmetro da tubulação, a vazão de referência e a distância de construção, são utilizados programas específicos para a determinação da variável Valor_Ramal_km. Estes valores são apresentados na Tabela 4, sendo referentes às vazões de 100.000 m³/h.

$$\text{Valor_Ramal_km} = \frac{\text{Custo_Obra_km} * \text{FRC}}{\text{Vazão}_{\text{Referência}} * 8760} * \text{Fator_Correção O \& M} \quad (17)$$

Tabela 4 – Custo de construção de ramal do gasoduto
(capacidade do gasoduto: 100.000 m³/h)

Distância (km)	Custo (US\$/m ³)
10	0.000780
20	0.001271
30	0.001690
40	0.002509
50	0.003031
60	0.003548
70	0.004070
80	0.004592
90	0.005110
100	0.006610
110	0.007225
120	0.007845
130	0.008464
140	0.009080
150	0.009699
160	0.010319
170	0.010934
180	0.011554
190	0.012170
200	0.012789
210	0.013531
220	0.014185
230	0.014839

Vazão_{Referência} = relativa ao combustível que será transportado no ramal construído. É calculado em função da tecnologia que está sendo analisada.

Fator_CorreçãoO&M = refere-se ao custo de operação e manutenção da rede. Em alguns estudos, como apresentado em Mascaró* (apud Silva, 1993), considera-se que o índice para as despesas de operação e manutenção pode variar ao longo da vida útil da rede, mas optou-se por utilizar um valor médio de 10%.

Poder_Calorífico_Superior = dado relativo à qualidade do combustível, segundo o qual, quanto maior o poder calorífico, melhor o aproveitamento do mesmo.

FMédioTec = fator de capacidade da tecnologia, com valores retirados da tabela de eficiência da tecnologia, dado pelo Algoritmo 4. Para tecnologias com ajuste de temperatura e altitude, este valor é calculado para cada município e influencia o valor Heat_Rate em função da temperatura média local, sendo que este é alterado em 1% a cada 9 graus em locais com temperatura acima de 15 graus.

Algoritmo 4 – Cálculo de FMédioTec

FMédioTec = 0

Ler do início ao final da tabela de eficiência da tecnologia

Se (Ajuste_Temperatura_Altitude = SIM) então

Se Temperatura_Local > 15 então

Heat_Rate = Heat_Rate * (0,01 / 9 * Temperatura_Local + 8,85 / 9)

FMédioTec = FMédioTec + (Fator_Capacidade / 100) * Heat_Rate*

Fração_Tempo/100

Onde:

Heat_Rate = permite avaliar o desempenho na utilização do combustível das unidades geradoras através do consumo de calor - "Heat_Rate" - definido como a energia térmica necessária à geração de um quilowatt-hora, geralmente expresso em kJ/kWh. É inversamente proporcional à eficiência da usina.

FCMédio = fator de capacidade médio da usina, com valores retirados da tabela de eficiência da tecnologia, apresentado no Algoritmo 3 na seção 4.1.1.

Os valores de Fator_Capacidade, Heat_Rate e Fração_Tempo são retirados da Tabela de Eficiência de cada tecnologia (exemplo hipotético – Tabela 3).

* MASCARÓ, J. L. (1977) – coord. Estudos dos Custos de Infra-estrutura em Cidades de Porte Médio, São Paulo, FAU, 1977-1979. 5v. [59, 62, 64]

Custo Variável de O&M

Este custo é relacionado à tecnologia e indica o custo variável de operação e manutenção da usina porque depende da energia elétrica gerada. Seu valor é representado em US\$/MWh e sua denominação neste contexto é dada por Custo_Var. Se vários custos variáveis de O&M estiverem associados à tecnologia, é necessário calcular e representar este valor por uma média entre os custos. Este(s) valor(es) constam da tabela de características de cada tecnologia (aqui representada genericamente pela Tabela 2).

Custo Fixo de O&M

$$\text{Custo_Fixo} = \frac{\text{CFixo}}{8,76 * \text{FCMédio}} \quad (18)$$

Onde:

CFixo = custo relacionado à tecnologia, armazenado no banco de Tecnologias. Seu valor é dado em US\$/kWano.

8,76 = constante associada à quantidade de horas no ano. É utilizada para a conversão de US\$/kWano para US\$/MWh.

4.1.3 – Variável Linhas de Transmissão

A influência das linhas de transmissão (LTs) neste processo de localização é de fundamental importância. Delas depende o transporte da energia elétrica gerada pela UTE, das subestações até os consumidores, com perdas aceitáveis neste deslocamento. No cálculo do custo de conexão à LT já estão incluídos os valores para interligar as usinas térmicas ao sistema elétrico. Dependendo da tensão utilizada e da distância de interligação, este custo poderá ser elevado, colocando em risco a viabilidade da implantação da usina no local.

Outro aspecto a ser considerado é que as UTEs são flexíveis sob o ponto de vista de serem construídas próximas aos centros de carga, possibilitando que seja analisado um local viável para sua construção, sem a incidência de altos custos de

conexão, evitando as LTs extensas. Normalmente as LTs de longa distância necessitam ser de alta tensão para se evitar perdas na transmissão, porém com altos custos.

No caso das usinas hidroelétricas, pela forma de geração de energia elétrica, são construídas em grandes rios e longe dos principais centros de carga. Um exemplo é a usina de Ilha Solteira, que gera uma grande quantidade de energia elétrica, a qual é transmitida por uma LT, denominada “linhão”, de alta tensão e longa distância, passando por todo o Estado de São Paulo.

As linhas de transmissão existentes foram importadas de mapas originalmente manipulados pelo AutoCad e georeferenciadas através do Transcad, como mostra a Figura 10. Apesar de LTs com diferentes tensões estarem representadas no mapa, somente as LTs de 138 kV e de 440 kV serão utilizadas nos testes aqui conduzidos.

Figura 10 - Mapa das LTs no Estado de São Paulo

Custo Unitário do Benefício da Transmissão

O custo do benefício da transmissão utilizado no SIGTE está baseado em formulações do LITOM, descritos em PROMON-SP (1996), com algumas modificações provenientes da necessidade de atualização do setor elétrico frente às privatizações ocorridas recentemente. Ressalta-se que este custo pode ser reavaliado e futuramente modificado no próprio SIGTE, face à nova realidade em que se encontra o mercado de energia elétrica brasileiro, aberto e competitivo.

O custo unitário do benefício da transmissão (CT) é formulado considerando-se o custo de conexão e de utilização da rede de transmissão mais um crédito pela redução de perdas devido à geração local, ou seja, da usina termoeletrica estar gerando energia próxima ao centro de carga. Este custo é comparado com a importação de energia da região em estudo.

O custo é dado pela formulação:

$$CT = \frac{\text{DeltaPerda_MW} * VL_Marginal}{P_{\text{referência}}} + \text{CustoConexão} + \text{EncargosTrans} \quad (19)$$

Observação: Na formulação da Equação 19, o termo $\frac{\text{DeltaPerda_MW} * VL_Marginal}{P_{\text{referência}}}$

está sendo utilizado como uma aproximação ao fato de não se ter ainda um fator de perdas locais definido.

Onde:

CT = é um valor apresentado em US\$/MWh, e que significará o benefício associado à construção da UTE próxima ao centro de carga.

DeltaPerda_MW = é um valor associado às perdas existentes na transmissão da energia gerada. É calculado um valor da perda total em relação à perda de referência do sistema. Para este cálculo são utilizadas formulações próprias divulgadas pela empresa responsável para levar a energia ao centro de gravidade. A Equação 20 apresenta o cálculo realizado.

VL_Marginal = se refere ao custo marginal de longo prazo de geração. No caso estudado será referente à região Sudeste. Pode ser usado o preço publicado pela

empresa responsável, o que atualmente ocorre uma vez por semana. Seu valor é dado em US\$/MWh.

$P_{\text{referência}}$ = potência de referência, dada em MW – valor informado para os testes. Esta variável também pode ser associada ao próprio Módulo(MW) da tecnologia.

CustoConexão = este valor será relacionado com o tipo de conexão a ser feita, na linha de 138 kV ou na linha de 440 kV. Inclui em seu cálculo o fator de recuperação de capital (FRC), algumas constantes utilizadas para transformação e o fator de capacidade médio da usina, descrito na seção 4.1.1. As Equações 24 e 27 apresentam os cálculos para as diferentes tensões.

EncargosTrans = é um valor associado aos custos de transmissão e distribuição das empresas de energia. Para a tensão de 138kV incidem os custos médios de transmissão (CusT) e os custos médios de distribuição (CusD). Para 440 kV somente CusT. As Equações 25 e 28 apresentam os cálculos para as diferentes tensões.

$$\text{DeltaPerda_MW} = \text{PerdaTotal_MW} - \text{PerdaRef_MW} \quad (20)$$

Onde:

PerdaTotal_MW = é um valor associado a cada município com distinção para a instalação a ser feita em 138 kV ou em 440 kV (representadas nas Equações 23 e 26, respectivamente) em relação à potência de referência do sistema ($P_{\text{referência}}$). O cálculo da PerdaTotal é dado abaixo:

$$\text{PerdaTotal_MW} = \text{Perda(em 138kV ou em 440kV)} * P_{\text{referência}} \quad (21)$$

PerdaRef_MW = é um valor calculado para indicar a perda de referência em MW no sistema em foco. Seu cálculo é dado por:

$$\text{PerdaRef_MW} = \text{VL_Perda} * P_{\text{referência}} \quad (22)$$

Onde:

VL_Perda = valor dado em MW/(MW instalado) para as perdas na região estudada.

Para identificar por qual tensão de linha a energia gerada será transportada deve haver um valor identificando o limite de instalação em 138 kV (LimInst_138). Se a potência da usina exceder este limite, a transmissão será realizada em 440kV.

A condição abaixo demonstra a dependência da variável perda total e custo de conexão em relação à tensão de linha utilizada. Assim, dependendo da quantidade de energia a ser transmitida (Módulo) e do limite de instalação, estes valores serão calculados. O limite de instalação em LTs de 138kV é definido em torno de 400MW.

Se Módulo < LimInst _138kV **então**

A instalação é feita na linha com tensão de 138 kV:

$$\text{PerdaTotal_MW} = \text{Perdas_138kV} * P_{\text{referência}} \quad (23)$$

$$\text{CustoConexão} = \frac{\text{CustoConexão_138kV} * \text{FRC}}{8760 * \text{FCMédio} * P_{\text{referência}}} \quad (24)$$

$$\text{EncargosTrans} = \text{CusT138kV} * \frac{1000}{730} + \text{CusD138kV} * \frac{1000}{730} \quad (25)$$

Senão

A instalação é feita na linha com tensão de 440 kV:

$$\text{PerdaTotal_MW} = \text{Perdas_440kV} * P_{\text{referência}} \quad (26)$$

$$\text{CustoConexao} = \frac{\text{CustoConexão_440kV} * \text{FRC}}{8760 * \text{FCMédio} * P_{\text{referência}}} \quad (27)$$

$$\text{EncargosTrans} = \text{CusT440kV} * \frac{1000}{730} \quad (28)$$

Onde:

LimInst_138kV = limite de instalação em 138 kV (MW). Este atributo é limitado pelo fluxo de carga nas linhas de 138 kV.

Perdas_138kV ou Perdas_440kV = perdas para a transmissão nos diferentes tipos de tensão. Este valor pode ser calculado obtendo-se uma ponderação através do sinal locacional retirado de programas nodais e os custos das perdas publicados nos relatórios do ONS. A fórmula para o cálculo das perdas ajusta o valor para um ano, sendo dada pela Equação 29.

$$\begin{aligned} \text{Perdas}_{138kV} &= \frac{\text{Fator}_{\text{Perdas}_{138kV}} * 12}{\text{Custos}_{\text{Perdas}_{138kV}}} \\ \text{ou} \\ \text{Perdas}_{440kV} &= \frac{\text{Fator}_{\text{Perdas}_{440kV}} * 12}{\text{Custos}_{\text{Perdas}_{440kV}}} \end{aligned} \quad (29)$$

CustoConexão_138kV ou CustoConexão_440kV = custo de conexão à rede. Valor dado em função da distância do centro geográfico do município à linha de transmissão. Os valores para as diferentes tensões serão retirados da Tabela 5 - referentes aos custos da Eletrobrás.

Tabela 5 – Custos modulares Eletrobrás – referência: set/01

Nível de tensão (kV)	Custo Médio (10 ³ US\$/km)
69	73
138	119
230	157
345	281
440	359
500	370
750	287

CusD138kV = custo de distribuição fornecido pelas empresas que atuam na área do município. Este custo pode ser obtido sobrepondo os mapas de linhas de transmissão de 138kV e relacionando as empresas que atuam no município. Se várias empresas atuarem, sugere-se que seja calculada uma média dos custos de distribuição. Pela Tabela 6 é possível verificar alguns custos para as empresas

atuantes no sistema de distribuição do Estado de São Paulo e que foram determinados através de resoluções da própria ANEEL.

CusT138kV ou CusT440kV = custo de transmissão nas linhas. Este custo pode ser obtido através do uso de programas nodais para a simulação de tarifas, obtendo-se os valores por barras pertencentes a cada município. É calculado para os diferentes tipos de tensão.

Tabela 6 – Custos de distribuição - companhias atuantes no Estado de São Paulo

Empresa	Descrição	CUSD R\$/kW.mês
EBE	Bandeirante Energia S/A	1,68
CPFLP	Companhia Piratininga de Força e Luz (Bandeirante)	1,68
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz	1,87
ELEKTRO	Eleticidade e Serviços S/A	2,69
ELP	Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S/A	2,49
CSE	Caiuá - Serviços de Eletricidade S/A	2,26
CLFM	Companhia Luz e Força de Mococa	1,37
CLFSC	Companhia Luz e Força Santa Cruz	1,9
CNEE	Companhia Nacional de Energia Elétrica (res 286)	2,86
CPEE	Companhia Paulista de Energia Elétrica	1,26
EEB	Empresa Elétrica Bragantina S/A	1,95
EEVP	Empresa de Eletricidade Vale Paranapanema S/A (res 286)	1,99
CJE	Companhia Jaguarí de Energia	1,72
CSPE	Companhia Sul Paulista de Energia	1,36

4.1.4 – Variável Água

A água é utilizada no sistema de resfriamento no processo de geração de energia elétrica das UTEs. A compatibilidade entre o requisito de água exigido pela tecnologia e a disponibilidade de água no local analisado para a implantação da UTE está sendo considerada no SIGTE como um critério fator, aumentando ou diminuindo a aptidão do local para a análise em questão. Uma indicação feita recentemente sugere que este critério seja também do tipo exclusão (caso da variável poluição). Em futuros desenvolvimentos deste trabalho, na qual se pretende aprimorar o modelo, a sugestão dada será contemplada, além de incluir a qualidade das águas como outro requisito do critério.

Requisito da tecnologia

Os dados relativos ao sistema de resfriamento que as tecnologias utilizam são obtidos a partir de dados informativos disponíveis no mercado, proveniente dos fabricantes e do banco de dados do LITOM. Assim, através das características técnicas da tecnologia é possível definir o requisito mínimo de água exigido.

Vazão mínima disponível nos municípios

Por falta de dados precisos disponíveis para determinar as vazões dos rios existentes no Estado de São Paulo, utilizaram-se dados da rede composta pelas 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI).

A caracterização geral desta rede e de suas unidades baseia-se no princípio fundamental de adoção da bacia hidrográfica como unidade físico-territorial para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos. Há uma grande dificuldade nesta abordagem porque não há coincidência das divisas político-administrativas com os divisores de águas. Observa-se ainda que as inter-relações políticas, sociais e econômicas entre regiões e comunidades não respeitam nem as divisas nem os divisores. Mesmo no campo restrito dos recursos hídricos, o conjunto de bacias hidrográficas é utilizado. No mapa da Figura 11 é possível verificar as 22 UGRHI.

No caso específico do Estado de São Paulo, as bacias hidrográficas pertencem à bacia do rio Paraná ou às bacias do Atlântico Sul-Leste e Atlântico Sudeste, conforme divisão hidrográfica adotada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) (SIGRH, 2001).

Cada UGRHI possui uma delimitação e engloba vários municípios, sendo os dados fornecidos para cada unidade utilizados em cada município.

Os valores utilizados para cálculo são referentes às vazões mínimas anuais de 7 dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos, ou seja, com probabilidade de nova ocorrência no período de 10 anos. Estes dados são disponibilizados no *sítio* da Fundação SEADE (Sistema Estadual de Análise de Dados) no departamento referente aos aspectos ambientais (SEADE, 2001).

Segundo Liazi *et al.* (1988), uma solicitação freqüente sobre vazões mínimas refere-se àquela com sete dias de duração, cuja vantagem é sofrer menos influência de erros operacionais e intervenções humanas no curso de água do que a vazão mínima diária e é suficientemente mais detalhada que a vazão mínima mensal. Assim, esta vazão é utilizada com freqüência como indicador da disponibilidade hídrica natural num curso de água.

Ainda segundo Liazzi *et al.* (1988), a técnica de regionalização hidrológica tem-se mostrado instrumento muito ágil e importante nos estudos de planejamento e administração de recursos hídricos. Este método possibilita a obtenção de variáveis hidrológicas básicas, como vazões médias e mínimas, de maneira simples e rápida. Além disso, a estimativa dos valores das variáveis hidrológicas, para uma determinada bacia, baseada nos parâmetros regionais, parece ser, geralmente, mais razoável que a obtida em outro local. Finalmente, a regionalização simultânea de vários parâmetros, como a apresentada e desenvolvida pelo DAEE, permite definir, de maneira precisa e segura, as áreas hidrologicamente semelhantes.

No SIGTE optou-se por atualizar o banco de dados de municípios com os valores das 22 UGRHI do Estado de São Paulo, parcialmente apresentados na Tabela 6. No entanto, outros estudos estão sendo realizados a fim de aprimorar o modelo e são descritos na sequência.

No trabalho desenvolvido por Cordovil (2001) há a proposta de traçar linhas divisórias de uma bacia hidrográfica para aplicações em SIG e, possivelmente, a determinação das vazões de água dessas bacias. Ressalta, no entanto, que há dificuldades nos processos de gerenciamento e monitoramento dos recursos naturais pela ineficiência dos métodos de catalogação, sistematização e manipulação do acervo de dados existentes.

Outra proposta é a utilização de postos de medições de vazões ao longo dos rios, os quais são gerenciados pelo DAEE e disponibilizados através do software “Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo”. A dificuldade existente neste caso é a transposição de dados para os municípios, já que as medições são realizadas nos postos fluviométricos (BCDAEE, 2000).

Uma metodologia apresentada por Santos & Pereira Filho (2000) utiliza redes neurais artificiais para a modelagem hidrológica, onde dados de precipitação de chuva são utilizados como entrada e dados de vazão são obtidos como saída.

Os dados relativos às vazões de cada município, provenientes das UGRHI, são inseridos no banco de dados de municípios e utilizados para as análises propostas. Alguns exemplos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados para vazão de água dos municípios no Estado de São Paulo

ID	Município	Latitude	Longitude	UGRHI	Vazão Mínima (m ³ /s)
1	Adamantina	-21,68	-51,07	21 - Peixe	29,00
2	Adolfo	-21,23	-49,64	16 - Tietê/Batalha	31,00
3	Aguaí	-22,05	-46,97	09 - Mogi-Guaçu	49,00
4	Águas da Prata	-21,93	-46,71	09 - Mogi-Guaçu	49,00
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
645	Zacarias	-21,05	-50,05	19 - Baixo Tietê	27,00

O processo de ponderação para o critério fator água é apresentado nos estudos de casos propostos no Capítulo 5, na Equação 36.

Figura 11 - Unidades de gerenciamento de recursos hídricos – SP / 1999

4.1.5 – Variável Áreas de Preservação Ambiental (APAs)

As APAs são também consideradas como espaços de planejamento e gestão ambiental de extensas áreas que possuem ecossistemas de importância regional, englobando um ou mais atributos ambientais. Necessitam de um ordenamento

territorial orientado para o uso sustentável dos recursos naturais, elaborado por meio de processos participativos da sociedade, que resultem na melhoria da qualidade de vida das comunidades locais (APAS, 2004).

No SIGTE as APAS são consideradas como critério do tipo exclusão do problema, sendo adotados valores iguais a 0 para municípios que estão na lista de áreas protegidas ambientalmente. A partir de dados disponibilizados por órgãos públicos responsáveis pela preservação de áreas que possuem recursos naturais, foi possível atualizar o banco de dados de pontos referente aos municípios do Estado de São Paulo. Para os municípios que possuem algum tipo de área de preservação ambiental não serão aplicadas as propostas de construção de uma UTE pelo SIGTE.

Na Figura 12, as APAS do Estado de São Paulo são identificadas na forma de um mapa para a visualização das referidas localizações.

Figura 12 - Mapa representativo das APAs do Estado de São Paulo (APAS, 2004)

Uma observação a ser feita é que neste estudo optou-se por não instalar UTE em APAs. Porém, se outros dados (tipo de APA, porcentagem de ocupação em relação à área do município, etc.) forem considerados é possível fazer novas análises.

4.1.6 – Variável Poluição do Ar

A compatibilidade entre o nível de poluição local e a emissão de poluentes da tecnologia em análise constitui-se no terceiro critério de avaliação ambiental apresentado na Figura 7. Este critério é considerado do tipo fator, mas também do tipo exclusão. Isto porque no processo de decisão multicritério será identificado um peso para este critério (tipo fator) e também serão atribuídos valores zero ou um, excluindo do conjunto solução os casos de municípios com poluição crítica e de valor zero (tipo exclusão).

Segundo Negri (2001), do ponto de vista ambiental, a expansão termoelétrica gera uma preocupação legítima da sociedade civil e de órgãos competentes que zelam pela qualidade ambiental, a qual possui uma capacidade finita.

No caso do SIGTE, o objetivo é proporcionar uma visão global de toda a área analisada e ordenar os locais com potencial para a instalação da tecnologia. Para a tecnologia é possível obter junto aos fabricantes valores específicos sobre a emissão de poluentes. Para atribuição do nível de poluição para cada município o processo é realizado por medições em pontos estratégicos da área. Na maioria das vezes, não se têm informações tão precisas dos poluentes como no caso das tecnologias.

Em geral, um empreendimento é analisado isoladamente com avaliações das emissões gasosas e valores de qualidade do ar locais. Caberia ao órgão de controle ambiental possuir as informações de monitoramento revelando a situação da poluição dos municípios, mas este em geral não as possui (Negri, 2001).

Segundo dados da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), que monitora a qualidade do ar no Estado de São Paulo, há apenas um sistema de medição automático (rede telemétrica) composto por 28 estações, além de um sistema não automático (manual) composto por 18 postos no interior do Estado, o que não abrange a medição para os 645 municípios (CETESB, 2001).

Verifica-se desta forma a indisponibilidade de dados reais para a medição da qualidade do ar, levando as empresas interessadas em construir uma UTE a adotar alguns procedimentos para a obtenção do nível de poluição, como justificado a seguir.

Uma usina da empresa AES (American Energy System em Bariri), que está em fase de viabilização, colocou em seu Relatório Ambiental Preliminar (RAP) a seguinte nota sobre a qualidade do ar na região estudada: *“Tendo em vista a importância do monitoramento prévio da qualidade do ar para conhecer os níveis existentes de poluentes na atmosfera quando se busca instalar uma UTE – no caso, a UTE AES Termo Bariri – e face à inexistência de monitoramento de rotina na região de Bariri, e o fato de estarem relativamente afastados os municípios onde a CETESB mantém*

estações para a coleta de dados de qualidade do ar, foram pesquisados locais potencialmente aptos a receber uma estação automática de monitoramento que forneceria dados locais sobre partículas em suspensão (totais e inaláveis), dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono, ozônio e hidrocarbonetos. Além de fornecer subsídios para a avaliação prévia de impactos na próxima fase dos trabalhos (EIA-RIMA), estas informações poderiam ser utilizadas para o monitoramento futuro da qualidade do ar” (AES-Bariri, 2001).

Portanto, para este estudo que abrange todo o Estado de São Paulo foi necessário adotar outras formas de verificação do nível de poluição dos municípios, por estar claro que não há infra-estrutura existente para as medições na delimitação da área total do Estado.

Segundo informações da CETESB, as duas maiores fontes de poluição são as indústrias (fontes estacionárias) e os veículos automotores (fontes móveis). Partindo-se deste princípio, foi utilizada a quantidade de combustível automotivo e industrial consumido em cada município, dados fornecidos pela ANP (Agência Nacional do Petróleo), como uma *proxí* da variável estudada.

É interessante salientar que, como a solução proposta para este problema é uma metodologia para abordar o problema da localização de UTEs, este e outros parâmetros podem ser modificados.

O primeiro teste realizado foi o de relacionar os dados de consumo de combustíveis automotivos e industriais com o índice de Dióxido de Enxofre para os municípios monitorados pela CETESB (cerca de 46), que constavam do relatório anual de 2000. Foram conduzidas algumas análises de regressão, mas não foi possível obter índices satisfatórios a ponto de classificar o restante dos municípios que não possuem monitoramento.

Outro teste realizado foi a aplicação de um software que utiliza Redes Neurais Artificiais (RNA) para classificar os dados. O software utilizado foi o *NeuralWorks* (NeuralWare, 1998), com a técnica *SOM (Self Organizing Maps)* (tal como em Mussone & Sala, 2001), a qual permitiu que fosse feita uma classificação, ainda preliminar, mas que poderá ser ajustada com a modificação dos parâmetros da rede, para definir o perfil da poluição nos municípios (Zambon *et al.*, 2003b).

Seleção de dados para análise

O poluente analisado foi o dióxido de enxofre (SO₂), por ser considerado o mais prejudicial e por ser emitido na queima dos combustíveis. Este poluente é um gás

incolor, tóxico, de cheiro forte e irritante, formado da queima do enxofre (S) em reação com o ar ($S + O_2 \text{ (ar)} \rightarrow SO_2$), e que pode reagir na atmosfera formando a “chuva ácida” e causando sérios impactos ambientais.

Os dados de enxofre nos combustíveis foram considerados da seguinte forma:

- Fonte de poluição Móvel

Para cada município do Estado foram disponibilizados dados referentes ao consumo total de álcool, gasolina e diesel para o ano de 2000.

Segundo relatórios disponibilizados em PETROBRAS (2001), os teores de enxofre para cada combustível são:

- **Álcool** – não contém composto de enxofre e, por isso, na sua queima não é liberado o SO_2 .
- **Gasolina** – contém composto de enxofre que na sua queima é lançado na atmosfera. Cada tipo de gasolina contém níveis diferentes de enxofre em sua composição. Para este estudo considera-se um teor de 0,1% por peso.
- **Diesel** – contém maior teor de enxofre que a gasolina e, por isso, o impacto ambiental é maior. As regiões metropolitanas, que são os municípios que são mais atingidos pela poluição, utilizam um tipo de diesel com teor reduzido de enxofre. Considera-se para estes testes um teor de 0,2% por peso.

- Fonte de poluição Estacionária

Os dados de combustíveis industriais foram solicitados à ANP, que forneceu uma listagem contendo, para cada município de São Paulo, o consumo total de óleo combustível, querosene iluminante e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), para o ano de 2000. Outros combustíveis podem contribuir para a poluição industrial, mas seus consumos não foram obtidos e, portanto, não incluídos nestes testes.

Os teores de enxofre para cada combustível são:

- **Óleo combustível** – possui o maior teor de enxofre dos combustíveis utilizados na análise, com cerca de 1% do peso.
- **GLP** – para este combustível o teor de enxofre é muito baixo, com 0,000065% do peso.
- **Querosene iluminante** – este combustível possui 0,3% do peso em quantidade de enxofre.

A partir dos totais de enxofre calculados para cada tipo de combustível foi possível, fazendo uso da técnica RNA-SOM, utilizar estes dados como vetores de entrada no processo de caracterização dos níveis de poluição para os municípios em questão.

Aplicação de RNA - SOM

As redes SOM são também chamadas de mapas de características, pois são baseadas no fato de construírem mapas topológicos agrupando entradas que possuam padrões semelhantes. São utilizadas para resolver problemas como mapeamento de voz para comandos de datilografia, reconhecimento de padrões, previsão de vazões, monitoramento da qualidade de água e outros (Braga *et al.*, 2000).

Para a utilização desta rede foi necessário definir os vetores de entrada ou padrões de entrada do problema. Como no caso aqui estudado se trata do poluente dióxido de enxofre, o arquivo montado contém as quantidades, por município, de enxofre relativo a cada combustível disponível para análise, provenientes das fontes poluidoras, móveis e estacionárias. Ao final, pode-se gerar uma coluna com o total de enxofre dos 5 combustíveis. Parte deste arquivo, que na sua versão completa contém 645 linhas (uma para cada município do Estado de São Paulo), é apresentado na Tabela 8, a título de exemplo.

Tabela 8 – Arquivo de entrada de dados RNA-SOM

Município	S (Kg) Diesel	S (Kg) Gasolina	S (Kg) Óleo Comb.	S (Kg) GLP	S (Kg) Querosene	S (Kg) TOTAL
1	4490,04	13623,45	0,00	0,90	0,00	18114,39
2	228,96	831,16	0,00	0,01	0,00	1060,13
.....						
645	39,60	190,90	0,00	0,00	0,00	230,50

A rede SOM tem seu funcionamento baseado na entrada de padrões (neste caso, descritos em cada linha da Tabela 8), e na busca de semelhanças entre eles para a montagem da camada de saída, resultando no mapa de características. Esta camada é composta por uma grade bidimensional com um número fixo de linhas e colunas. No caso estudado, adotou-se 12 linhas e 12 colunas, conforme apresentado na Figura 13. Outras dimensões foram testadas e não apresentaram resultados satisfatórios para uma boa definição das classes.

A construção do mapa de características procura agrupar de maneira clara os padrões de entrada semelhantes. Para o problema da poluição dos municípios, a idéia foi a de obter, baseando-se nos dados de quantidades de enxofre emitidos, um mapa que caracterizasse com clareza os níveis de poluição e indicasse onde os mesmos se localizavam neste mapa ou camada de saída.

A Figura 13 representa a camada de saída contendo os elementos de processamento (EPs) e uma possível definição de classes de poluição dos municípios, baseada em cinco diferentes níveis.

Em cada EP da camada de saída foram agrupados municípios com características semelhantes quanto ao total de enxofre emitido. O número de municípios alocados em cada EP pode ser diferente, incluindo EPs em que não é alocado nenhum município. Por exemplo, no EP *Le* foram alocados 3 municípios, Barra do Turvo, Olímpia e Santo Antonio da Posse. No EP *LI* foi alocada a cidade de São Paulo.

Figura 13 - Mapa classificatório da poluição dos municípios - SOM

A fase seguinte ao processo de obtenção da camada de saída, com os municípios alocados em cada EP, foi a de analisar o valor da média calculada a partir do total de enxofre (kg) dos municípios agrupados, como apresentado na Figura 14. As casas decimais foram retiradas para melhorar a visualização da tabela. Cada valor da tabela representa a média do total de enxofre dos municípios alocados no EP. Aqueles que contêm um asterisco (*) são os que não possuem nenhum município associado.

A partir dos valores médios dos totais de enxofre dos municípios agrupados em cada EP foi possível localizar algumas fronteiras onde os valores se alteravam com intervalos maiores que os usuais, observando-se o aumento no sentido horizontal ou vertical do mapa de características, apresentando uma mudança de classe. Estas fronteiras podem ser analisadas no sentido horizontal, da esquerda para a direita, ou no sentido vertical, de cima para baixo, com um aumento dos valores máximos do agrupamento.

Há alguns casos, no entanto, em que se pode observar que a regra acima citada não é válida. A este fato foi atribuído o problema de ajuste dos parâmetros da

rede e serão indicados, como continuação do estudo, outros testes para corrigir este balanceamento ou melhorar o treinamento da mesma. No entanto, mesmo com possíveis ajustes a serem feitos, a ferramenta supriu a necessidade de informações para todos os municípios a fim de atualizar o banco de dados.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	J	k	l
A	698	390	751	*	818	929	*	*	2.884	3.522	4.696	4.007
B	341	730	692	*	731	872	1.290	2.112	3.219	3.862	4.133	4.540
C	492	*	*	1.028	749	1.006	1.417	2.873	5.722	5.620	7.157	8.966
D	*	1.004	*	1.125	1.289	1.889	*	4.684	4.407	8.612	19.209	19.033
E	844	*	1.378	2.722	2.341	*	3.841	8.863	16.183	9.194	31.062	27.004
F	1.136	1.625	1.851	2.395	*	6.265	8.279	32.343	28.073	37.053	53.610	47.194
G	2.939	3.124	3.121	4.328	6.363	17.279	31.190	59.706	90.700	119.431	139.656	141.961
H	2.801	3.745	6.356	*	10.778	16.810	40.891	110.999	160.232	226.744	260.157	322.626
I	4.369	7.265	8.887	12.646	19.452	28.638	71.495	132.843	213.066	336.694	500.471	703.259
J	5.632	8.505	12.211	20.387	25.971	38.125	62.478	124.930	170.044	417.945	809.704	1.489.584
K	6.472	9.664	14.508	20.648	30.216	39.898	55.810	60.572	94.822	443.891	1.104.829	2.975.445
L	7.437	10.656	16.133	22.029	32.327	51.727	68.544	94.479	113.701	112.494	383.085	1.0396.816

Nível I (baixa poluição)
 Nível II
 Nível III
 Nível IV
 Nível V (alta poluição)

Figura 14 - Mapa classificatório SOM – limites de enxofre (totais em Kg)

A determinação de agrupamentos a fim de definir classes de poluição para os municípios tem o objetivo de determinar o “contexto de referência” da poluição dos 645 municípios. Mediante a inexistência de dados para se obter um panorama global a fim de localizar usinas termoelétricas no estado, este método foi adotado e os municípios agrupados em 5 níveis. Do Nível I, considerado de baixa poluição ao Nível V, de alta poluição, foi possível determinar estas classes. Com este resultado é verificada a compatibilização entre os dados de poluição dos municípios e da tecnologia selecionada para a implantação.

Com a definição das classes, os níveis de poluição foram atribuídos aos respectivos municípios, na base de dados de pontos do SIGTE, podendo ser representados na forma de um mapa temático, com as devidas localizações geográficas, apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Mapa classificatório da poluição do ar utilizado pelo SIGTE

Há alguns municípios que possuem uma situação conhecida quanto ao nível de poluição ambiental. É o caso dos municípios ao redor da Grande São Paulo e municípios com atividades poluidoras (caso de Paulínia, que abriga uma refinaria de petróleo). Nestes casos, foi verificado que o mapeamento através da rede SOM os classificou satisfatoriamente. Alguns destes municípios estão destacados no mapa da Figura 15. Em síntese, com a utilização da técnica preconizada, os 645 municípios do Estado de São Paulo foram assim classificados, no que diz respeito à poluição: 374 têm Nível I de poluição, 110 Nível II, 53 Nível III, 52 Nível IV e 56 Nível V.

Como em qualquer estudo de estimativa e modelagem, os resultados de caráter preditivo são aproximados e menores erros são obtidos quanto mais precisa for a representação dos fenômenos envolvidos. Sendo assim, outros poluentes podem ser incorporados ao modelo ou mesmo outros dados como a área territorial do município, o que permitirá uma melhor avaliação do impacto ambiental.

Compatibilização do nível de poluição tecnologia - municípios

Com a estrutura de cinco níveis de poluição, tanto para os municípios quanto para a tecnologia a ser analisada, é possível verificar a compatibilidade entre os mesmos através da Tabela 9. Os valores foram assim definidos porque verificaram-se as informações referentes às tecnologias disponíveis para a implantação das UTEs e seus índices de emissão de poluição. A melhor situação obtida é a instalação de uma tecnologia de Nível 1 (baixa emissão de poluentes) em municípios que também se encontram no Nível I (baixa poluição). Neste caso o valor 1,00 é atribuído. No caso inverso, o valor 0,00 é atribuído nesta compatibilização e os municípios serão excluídos da solução para este tipo de tecnologia.

Tabela 9 – Compatibilidade poluição tecnologia – municípios

Tecnologia → Município ↓	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Nível I	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40
Nível II	0,90	0,75	0,60	0,40	0,30
Nível III	0,80	0,60	0,50	0,20	0,15
Nível IV	0,60	0,40	0,20	0,25	0,00
Nível V	0,40	0,30	0,15	0,00	0,00

Com a compatibilização dos níveis de poluição determinados na Tabela 9, a variável poluição está normalizada. Na fase posterior à geração de alternativas no SIGTE, os valores atribuídos ao critério poluição serão inseridos na formulação para compor a fase de ordenação do modelo no processo de normalização, como utilizado em Zambon *et al.* (2003a).

4.2 – Fase 2: ordenar alternativas

Após a geração de alternativas restritas a um conjunto de critérios (Fase 1 do SIGTE), tem-se um conjunto de possíveis locais para a implantação da tecnologia selecionada. Neste ponto é válido adotar metodologias que distinguem as alternativas entre si, considerando-se os métodos de decisão multicritério.

Iniciando pela definição básica, decisão é a escolha entre alternativas. A avaliação multicritério é o procedimento através do qual os critérios são combinados para chegar a uma determinada avaliação, incluindo a própria comparação entre as alternativas no sentido de produzir decisões. Tipicamente, incluem procedimentos para normalizar e combinar diferentes critérios, resultando um índice composto e uma regra que rege a comparação entre alternativas utilizando este índice.

No contexto apresentado no modelo SIGTE, o processo de avaliação multicritério é descrito na Figura 16 e os processos adotados descritos na sequência.

Figura 16 - Fase 2: ordenação de alternativas no SIGTE

4.2.1 – Definição de pesos para os critérios

Uma das grandes dificuldades encontradas em um processo de decisão que envolve múltiplos critérios é a forma como se deve quantificar a importância relativa de cada um deles. Além disso, há de se considerar que os decisores podem atribuir graus variáveis de relevância para os critérios, de acordo com suas necessidades. Portanto, é necessário definir qual a importância relativa de cada critério no processo de decisão, o que é feito normalmente atribuindo um determinado peso a cada um deles. A correta atribuição de pesos é importante para que sejam mantidas as preferências dos decisores.

Para Ramos (2000) não há um método consensual para a definição de pesos, mas várias propostas de procedimentos para este efeito podem ser encontradas na literatura (von Winterfeldt & Edwards, 1986; Malczewski, 1999).

É possível agrupar os métodos de definição de pesos em quatro categorias assim declaradas: métodos baseados em ordenação de critérios (Stillwell *et al.*, 1981), em escalas de pontos (Osgood *et al.*, 1957), em distribuição de pontos (Easton, 1973) e comparação de critérios par a par (Saaty, 1977).

O método aplicado neste trabalho é o de ordenação de critérios, permitindo uma simples implementação de acordo com a ordem de importância (ranking) atribuída pelo decisor. Através da visualização do conjunto solução em ambiente SIG, associada ao uso das técnicas de análise multicritério, vários cenários de observação com diferentes pesos podem ser criados (Vincke, 1992).

O método de ordenação de critérios é limitado pelo número de critérios em causa, sendo pouco adequado quando o número de critérios é grande (Voogd, 1983). No caso deste trabalho, apesar da complexidade de estruturação do modelo e dos critérios envolvidos no problema, a quantidade de critérios é pequena. Além dos exemplos de cálculo de pesos por este método que podem ser encontrados na literatura (como em Malczewski, 1999, p. 179), optou-se por exemplificar este método para o caso específico aqui estudado.

A ordenação de critérios pode ser implementada atribuindo-se ao critério mais importante a ordem 1, ao segundo mais importante a ordem 2, e assim por diante. Estabelecido este ordenamento, os pesos podem ser gerados por três procedimentos descritos em Stillwell *et al.* (1981), assim designados: *rank sum*, que utiliza a ordem no *ranking*, o *rank reciprocal*, que utiliza o inverso da ordem do *ranking* e o *rank exponential*, no qual o decisor define o parâmetro p para a inicialização do processo de definição dos pesos (conforme p aumenta, mais aumentam os pesos normalizados).

Método de ordenação de critérios – Rank Sum

Neste procedimento, segue-se a ordem do *ranking* e cada critério é calculado obtendo-se um peso e então normalizado pela soma de todos os pesos, dado pela Equação 30.

$$w_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum_{k=1}^n (n - r_k + 1)} \quad (30)$$

Onde:

- w_j : peso normalizado do critério j (com $j = 1, \dots, n$)
- r_j : ordem (posição no *ranking*) do mesmo critério
- n : número de critérios (com $k = 1, \dots, n$)

Método de ordenação de critérios – Rank Reciprocal

No *Rank Reciprocal* os pesos são derivados da normalização dos recíprocos da ordem dos critérios no ranking, conforme a Equação 31.

$$w_j = \frac{1/r_j}{\sum_{k=1}^n (1/r_k)} \quad (31)$$

Método de ordenação de critérios – Rank Exponent

O método *Rank Exponent* requer uma informação adicional que é o valor do parâmetro p para o cálculo dos pesos. Na Equação 32 é apresentada sua formulação.

$$w_j = \frac{(n - r_j + 1)^p}{\sum_{k=1}^n (n - r_k + 1)^p} \quad (32)$$

Para os critérios fatores avaliados no SIGTE, de ordem econômica (custo de investimento, custo de operação e custo de transmissão), e de ordem ambiental (poluição e disponibilidade de água), a Tabela 10 exemplifica a utilização dos três métodos de definição dos pesos. Neste caso, os critérios de ordem econômica foram

agrupados como custos. No entanto, para outras análises é possível definir novos agrupamentos.

Tabela 10 – Pesos definidos para os critérios fatores do SIGTE

Critérios Fatores	Ordem no Ranking	Rank Sum		Rank Reciprocal		Rank Exponent	
		Peso (n-r _j +1)	Peso Normalizado	Peso (1/r _j)	Peso Normalizado	Peso (n-r _j +1) ^p , p=2	Peso Normalizado
a	2	2	0,333	0,50	0,273	4	0,286
b	1	3	0,500	1,00	0,545	9	0,643
c	3	1	0,167	0,33	0,182	1	0,071
		6	1,000	1,83	1,000	14	1,000

* a – custos (investimento, operação e transmissão) / b – nível de poluição / c – disponibilidade de água

Segundo Malczewski (1999) os métodos de ordenação podem ser criticados por falta de fundamentação teórica, mas é importante enfatizar que estas técnicas podem ser usadas como técnicas de aproximação de pesos. No entanto, deve-se ter cuidado ao interpretar os resultados em termos do grau de importância de um critério em relação ao outro. Stillwell *et al.* (1981) demonstraram que em muitas situações de decisão, os métodos de aproximação de ordem no ranking têm fornecido respostas satisfatórias para a avaliação de pesos. Assim sendo, eles sugerem que estas técnicas podem ser usadas para simplificar as análises multicritério.

4.2.2 – Normalização de critérios

Este processo permite que valores de critérios não comparáveis entre si sejam normalizados para uma mesma escala, viabilizando a agregação entre eles. A maior parte dos processos de normalização utiliza o valor máximo e mínimo para a definição de uma escala. A forma mais simples é uma variação linear definida pela Equação 33 (Eastman, 1997).

$$x_i = \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} * \text{Intervalo_Normalizado} \quad (33)$$

Onde:

R_i : é o valor a ser normalizado

$R_{\min}$: valor mínimo para o critério

$R_{\max}$: valor máximo para o critério

O processo de normalização é na sua essência idêntico ao processo de *fuzzification* introduzido pela lógica *fuzzy*, segundo o qual um conjunto de valores pode ser expresso (convertido) numa escala normalizada (por exemplo, entre zero e um), tornando-os comparáveis. Para este processo existem várias funções *fuzzy* que podem ser utilizadas, sendo as mais conhecidas: sigmoidal, *j-shaped*, linear e complexa (Zadeh, 1965).

A função linear utilizada para a normalização do critério referente aos custos e disponibilidade de água é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Função *fuzzy* (linear)

Para a normalização do critério nível de poluição, a Tabela 8 apresentada na seção 4.1.6 é utilizada para expressar os valores dos níveis de poluição dos municípios e da tecnologia a ser selecionada. Por exemplo, para uma tecnologia que possui nível de poluição igual a 2 e um município com nível de poluição 1, o valor normalizado é dado por 0,90.

4.2.3 – Combinação de critérios

Após o processo de definição de pesos para os critérios fatores e depois que os valores dos critérios foram normalizados para uma escala de zero a um (utilizada

neste estudo, mas podendo ser outra qualquer), é possível aplicar a análise multicritério para atender ao processo de ordenação de alternativas proposto para a fase 2 do SIGTE. Dois métodos foram incorporados ao modelo, o da Combinação Linear Ponderada (WLC, derivado do inglês *Weighted Linear Combination*) e o da Média Ponderada Ordenada (OWA, do inglês *Ordered Weighted Average*), aqui designados por WLC e OWA, forma como são conhecidos na literatura.

Combinação Linear Ponderada – WLC

O procedimento WLC (Voogd, 1983) combina fatores através de uma média ponderada (Equação 34). Quando há critérios do tipo fator e exclusão, caso em que se insere o problema da localização de UTEs, o *score* de cada alternativa é calculado com base nos critérios normalizados dos fatores e seus respectivos pesos e multiplicado pelo produtório dos critérios exclusão, representados em escala binária, 0 ou 1.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i * \prod_{j=1}^k c_j \quad (34)$$

Onde:

S: valor final do *score*

w_i : peso do critério fator i (com $i = 1, \dots, n$)

n : número de critérios fator

x_i : valor normalizado para o mesmo fator

c_j : *score* (0 ou 1) do critério exclusão (com $j = 1, \dots, k$)

k : número de critérios exclusão

Os dois critérios de exclusão neste modelo são referentes às áreas de preservação ambiental e nível de poluição (critério fator e também exclusão). Este último possui uma característica muito particular, sendo um critério fator e também incluído no produtório da Equação 34 como um critério exclusão. Esta adaptação é para os casos em que se inserem municípios com elevados níveis de poluição, aqueles que, quando normalizados, são iguais a zero.

A mais importante característica do procedimento WLC, cujas aplicações são freqüentes, é o fato de permitir a compensação entre os critérios (*trade-off*), o que significa que uma qualidade (*score* a respeito de um critério) muito pobre numa dada

alternativa pode ser compensada por um conjunto de boas qualidades (*scores* mais altos a respeito de outros critérios) (Mendes *et al.*, 1999).

Média Ponderada Ordenada – OWA

Esta técnica introduz uma nova perspectiva de análise através de um novo procedimento de agregação de fatores (Yager, 1988). Além de utilizar os *scores* obtidos pela técnica WLC, considera a aplicação de outro conjunto de pesos denominados *order weights*. Estes pesos não estão associados aos critérios, mas sim à ordem que lhes é atribuída depois da aplicação da técnica WLC. Através desta agregação de critérios é possível analisar as diferentes situações de risco que podem envolver um empreendimento.

Em um processo de decisão que envolve 3 critérios fatores, neste trabalho caracterizado por custos, poluição e disponibilidade de água, com valores normalizados, as seguintes situações podem ser analisadas:

- **análise de risco máximo:** aplicando um conjunto de pesos [0 0 1] ao critério com o maior *score*, produzindo assim uma solução dita otimista. Na Tabela 11 (1º passo, idêntico ao procedimento da técnica WLC utilizando o método *rank sum* para a definição dos pesos) e na Tabela 12 (2º passo) é possível observar um exemplo numérico hipotético da aplicação desta técnica.
- **análise de risco mínimo:** aplicando um conjunto de pesos [1 0 0] ao critério com o menor *score*, produzindo assim uma solução dita pessimista ou conservadora.
- **análise de risco médio:** aplicando um conjunto de pesos [0,333 0,333 0,333] perfeitamente equilibrado a todos os critérios, permitindo a compensação entre eles (*trade-off* total).

Tabela 11 – Dados para aplicação da técnica OWA (1º passo)

	Critério Fator	Valores Normalizados	Pesos	Avaliação (1º. passo)
A	Custo	0,7398	0,333	0,2463
B	Poluição	0,7500	0,500	0,3750
C	Água	1,0000	0,167	0,1670

Fazendo variar os *order weights*, este procedimento permite implementar uma gama vastíssima de operadores de agregação.

Tabela 12 – Dados para aplicação da técnica OWA (2º passo)

Critério	Avaliação (1º. passo)	Order Weight	Avaliação (2º. passo)	Score final (soma ponderada)
B	0,3750	1	0,3750	0,3750
A	0,2463	0	0	(risco máximo)
C	0,1670	0	0	
B	0,3750	0	0	0,1670
A	0,2463	0	0	(risco mínimo)
C	0,1670	1	0,1670	
B	0,3750	0,333	0,1248	0,2625
A	0,2463	0,333	0,0820	(risco médio-trade-off total)
C	0,1670	0,333	0,0556	

Os *order weights* não estão obviamente restritos aos três casos apresentados na Tabela 12; na verdade, qualquer combinação é possível desde que seu somatório seja a unidade. O deslocamento relativo dos *order weights* no sentido do mínimo, ou máximo, controla o nível de risco, e a homogeneidade de distribuição dos *order weights* pelas posições controla o nível global de *trade-off*.

5 – Estudo de Caso

O estudo de casos apresentado neste capítulo está dividido em tecnologias que operam em ciclo simples (somente turbina a vapor) e tecnologias que operam em ciclo combinado (turbina gás + turbina a vapor). Os critérios considerados para a geração de alternativas e o processo de ordenação dos municípios com potencial para a instalação de cada tipo de usina são exemplificados. A área selecionada para os testes é referente ao Estado de São Paulo, onde estão disponibilizados os dados. Esta área também foi escolhida para que estudos com as mesmas tecnologias fossem obtidos com o uso do LITOM.

5.1 – Térmica convencional – óleo combustível pesado

A escolha da tecnologia é o ponto de partida para a geração de alternativas (Figura 7, pág. 22) no SIGTE. O tipo de tecnologia escolhida para este teste é chamado de Térmica Convencional – Óleo Combustível Pesado e denominada por TC-OCP. Este tipo de usina adota óleos combustíveis pesados para a geração de energia elétrica através da utilização da tecnologia convencional (ciclo simples).

A oportunidade de utilização de óleo combustível para a geração termoelétrica está vinculada à entrada de outros energéticos na matriz. Mais precisamente, esta vinculação dá-se com maior intensidade em função da entrada do gás natural, com grande volume de origem nacional e ainda motivada pelos contratos com a Bolívia e a instalação do gasoduto Brasil-Bolívia. O crescimento da participação do gás na matriz energética terá como consequência uma maior oferta de óleo no mercado energético, o que tende a se refletir em questões de preço e tratamento econômico que incentivem seu uso na geração de eletricidade (PROMON-PSR, 1996).

Um esquema simplificado do funcionamento de uma térmica convencional movida a óleo combustível é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema simplificado de uma térmica convencional

Os dados a serem analisados e considerados na fase de geração das alternativas viáveis para este tipo de tecnologia são descritos na Tabela 13 e na Tabela 14.

Tabela 13 – Características técnicas da tecnologia TC-OCP

Característica	Valor
Módulo (MW)	350
Custo de instalação (US\$/kW)	1070
Emissão de dióxido de enxofre (kg/MJ)	0,014*
Emissão de óxido de nitrogênio (kg/MJ)	0,2
Emissão de particulados (kg/MJ)	0,02
Fator para custo de internação (K)	1,00
Vida útil do equipamento	30
Custo variável de O&M (US\$/MWh)	0,5
Custo fixo de O&M (US\$/kWano)	16
Requisito de água (m³/s)	11,6
Ajuste de temperatura e altitude (S/N)	N
Potência gerada a gás	0
Combustível que utiliza	óleo combustível pesado

* considerando sistemas de controle de emissão de gases

Tabela 14 – Tabela de eficiência da tecnologia TC-OCP

Fator de Capacidade (%)	Heat_Rate (kJ/kWh)	Fração de Tempo (%)
25	-	-
50	-	-
75	-	-
100	9500	100

Critérios de avaliação econômica

Os critérios de avaliação econômica são incorporados à análise pelas variáveis custo de investimento, custo de operação e custo de transmissão, abaixo especificadas para a tecnologia TC-OCP.

Tecnologia → Custo de Investimento

A tecnologia TC-OCP não depende do ajuste de temperatura e altitude dos locais onde será instalada. Por isso, uma vez calculado o custo de investimento, este valor é atribuído para todos os municípios. Da Equação 1 (pág. 24) tem-se:

$$CI = \frac{\text{Custo}_{\text{Pot}} * \text{FRC} * k * \left(\frac{\text{Pot}_{\text{AltTemp}}}{P_{\text{referência}}} \right)^{0,15}}{8,76 * \frac{E}{P_{\text{referência}}}}$$

$$CI = \frac{1070 * 0,10607 * 1 * \left(\frac{350}{350} \right)^{0,15}}{8,76 * \left(\frac{350}{350} \right)} = 12,96 \text{US\$ /MWh}$$

Onde:

$$\text{Custo}_{\text{Pot}} = C_{\text{inst}} = 1070 \text{ US\$ /kW} \quad (\text{retirado da Tabela 13})$$

$$\text{Pot}_{\text{AltTemp}} = \text{Módulo} = 350 \text{ MW} \quad (\text{retirado da Tabela 13})$$

$$\text{FRC} = \frac{i * (1+i)^{nv}}{[(1+i)^{nv} - 1]} = \frac{0,1 * (1+0,1)^{30}}{[(1+0,1)^{30} - 1]} = 0,10607$$

Com: $i = 0,10$ (taxa de desconto anual)

$nv = 30$ anos (vida útil dos equipamentos)

Para i é possível adotar um valor mais representativo para o setor, em torno de 12 a 15%. O valor de 10% ao ano foi utilizado como valor de referência.

$k = 1,00$ (fator de custo de internação, Tabela 13)

$P_{referência} = 350 \text{ MW}$ (valor atribuído para análise)

E = critério econômico. Selecionado como concessionária e o cálculo dado por:

$$E = FC_{Max} * P_{referência} = 1 * 350 = 350$$

FC_{Max} = Fator de capacidade máximo da usina. Seu cálculo é efetuado seguindo-se o Algoritmo 2 da seção 4.1.1(pág. 29), com dados da Tabela 14. O resultado obtido é igual ao valor 1.

Uma observação a ser feita para este tipo de tecnologia, em relação ao custo de investimento, é que para a sua construção se torna imprescindível a utilização de sistemas de controle de emissões de gases provenientes da queima do óleo combustível pesado, elevando o custo do projeto, aumento este já considerado no custo de instalação (Tabela 13).

Transporte → Custo de Operação

O combustível utilizado para a geração de energia elétrica através da tecnologia TC-OCP é o óleo combustível pesado. Seu transporte pode ser realizado pelas ferrovias, rodovias ou oleoduto. Neste experimento, optou-se por utilizar as ferrovias existentes e que estão georeferenciadas em uma das bases de dados de linhas do SIGTE. Este combustível tem como origem o município de Paulínia, onde se situa a maior refinaria de petróleo do Estado de São Paulo e, através deste ponto, o combustível será distribuído para toda a área sob análise.

Algumas premissas foram adotadas para o cálculo da distância a ser percorrida nas linhas férreas existentes, do município origem (Paulínia) até os outros 644 municípios destinos.

Para utilizar a ferramenta de geoprocessamento e obter informações espaciais mais próximas possíveis da realidade foram feitas certas considerações. Para analisar toda a área do estado, foi adotado o centro geográfico (CG) de cada município, já que este é um dado passível de representação, com dados publicados pelo IBGE e que representa o centro de concentração populacional urbano dentro da área abrangida

pelo município. Foi calculada a distância do CG até a ferrovia (base de dados de linhas) através de ferramentas do SIG que minimizam o caminho a ser percorrido, ou seja, procuram na base de dados de linhas a melhor conexão. Para verificar a necessidade de construção ou não de ramais ferroviários, foi adotada uma distância de análise de 10km (subtraída da distância total) por considerar que a usina será construída mais afastada deste ponto, embora não excessivamente. Através deste processo, tem-se a distância do CG à ferrovia, a distância de construção de ramal de interligação e a distância de Paulínia ao CG de cada município. Com estas considerações a variável transporte é analisada como um critério do tipo fator e os cálculos permitem considerar todos os municípios como alternativas onde é possível instalar a TC-OCP, sendo estas restritas apenas por critérios do tipo exclusão (poluição e APAS).

O custo de operação (CO) é calculado para cada município e na base de dados de pontos (representando os CGs dos municípios) alguns atributos para este cálculo foram inseridos. A título de exemplo, parte desta base foi transposta na Tabela 15 e está sendo utilizada no cálculo demonstrado a seguir.

Tabela 15 – Dados para cálculo de CO → tecnologia TC-OCP

ID	Município	Lat	Long	Dist CG-Ferrov (km)	Dist Paulínia (km)	Custo Transporte (US\$/kg)	Custo Ramal (US\$/kg)	CO (US\$/MWh)
1	Adamantina	-21,68	-51,07	3,26	505,92	0,01517	0,0000	33,61
2	Adolfo	-21,23	-49,64	40,31	443,45	0,01330	0,0019	33,58
3	Aguaí	-22,05	-46,97	2,19	131,00	0,00393	0,0000	31,10
4	Águas Prata	-21,93	-46,71	1,50	155,17	0,00465	0,0000	31,26
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
645	Zacarias	-21,05	-50,05	39,55	508,76	0,01526	0,0018	34,04

O CO em cada município é composto pelas parcelas da Equação 12 (pág. 34) e por outras equações descritas na sequência. Incluindo dados numéricos referentes ao município de Adolfo (2ª linha da Tabela 15), é possível verificar os cálculos do custo de operação para TC-OCP:

$$\text{CO} = \text{Custo}_{\text{Básico}} + \text{Custo}_{\text{Var}} + \text{Custo}_{\text{Fixo}}$$

$$= 31,25 + 0,5 + 1,83 = 33,58 \text{ US\$ /MWh}$$

Custo Básico de Operação (Custo_Básico)

$$\begin{aligned}\text{Custo_Básico} &= 1000 * \text{Custo_1kJ} * \text{FMédioTec} / \text{FCMédio} \\ &= 1000 * 3,29 * 10^{-6} * 9500 / 1 = 31,25 \text{ US\$/MWh}\end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}\text{Custo_1kJ} &= \frac{\text{Custo_Combustível} + \text{Custo_Transporte} + \text{Custo_Ramal}}{\text{Poder_Calorífico_Superior}} \\ &= \frac{0,125 + 0,0133 + 0,0019}{42567} = 3,29 * 10^{-6} \text{ US\$/kJ}\end{aligned}$$

$\text{Custo_Combustível} = 0,125 \text{ US\$/kg}$ (preço FOB na origem: Paulínia)

$$\begin{aligned}\text{Custo_Transporte} &= \text{Distância_Percorrida} * \text{Custo_km} \\ &= 443,45 * 0,03 * 10^{-3} = 0,0133 \text{ US\$/kg}\end{aligned}$$

$\text{Custo_km} = 0,03 \text{ US\$/km}$ (por unidade (t) transportada). Este valor foi retirado dos valores médios praticados pelas empresas ferroviárias. Nos cálculos efetuados, este valor é convertido para kg.

$$\begin{aligned}\text{Custo_Ramal} &= \text{Valor_Ramal_km} * \text{Distância_Construída} \\ &= 6,26 * 10^{-5} * (40,31 - 10) = 0,0019 \text{ US\$/kg}\end{aligned}$$

└─> Distância de análise

$$\begin{aligned}\text{Valor_Ramal_km} &= \frac{\text{Custo_Obra_km} * \text{FRC}}{\text{Vazao}_{\text{Referência}} * 8760} * \text{Fator_Correção O \& M} \\ &= \frac{400.000 * 0,10607}{85 * 8760} * 1,1 = 0,0626 \text{ US\$/t ou } 6,26 * 10^{-5} \text{ US\$/kg}\end{aligned}$$

Poder_Calorífico_Superior = refere-se à qualidade do combustível e para o óleo combustível pesado tem o valor de 42.567 kJ/kg.

FMédioTec = Fator de capacidade da tecnologia. Seu cálculo é efetuado seguindo-se o Algoritmo 4 da seção 4.1.2 (pág. 37), com dados da Tabela 14, sendo o resultado obtido igual ao valor 9500. Este valor é atribuído a todos os municípios em função desta tecnologia não possuir a característica de ajuste de altitude e temperatura.

FCMédio = Fator de capacidade médio econômico da tecnologia. Seu cálculo é efetuado seguindo-se o Algoritmo 3 da seção 4.1.1 (pág. 29), com dados da Tabela 14 e o resultado é igual ao valor 1.

Neste estudo de caso o valor de FCMédio resultou no valor 1 porque é um caso específico de uma UTE operando com óleo combustível na base, não sendo uma situação comum. No estudo de caso apresentado na seção 5.2 uma outra situação é proposta.

Custo Variável de O&M (Custo_Var)

$$\text{Custo_Var} = 0,5 \text{ US\$/MWh (dado retirado da Tabela 13)}$$

Custo Fixo de O&M (Custo_Fixo)

$$\text{Custo_Fixo} = \frac{\text{CFixo}}{8,76 * \text{FCMédio}} = \frac{16}{8,76 * 1} = 1,83 \text{ US\$/MWh}$$

Onde:

$$\text{CFixo} = 16 \text{ US\$ / kWano (dado retirado da Tabela 13)}$$

8,76 = para a conversão de US\$ / kWano para US\$ / MWh.

$$\text{FCMédio} = 1$$

Linhas de Transmissão → Custo de Transmissão

O custo de transmissão no SIGTE é um valor que caracteriza o benefício de poder estar gerando a energia elétrica próxima aos centros de carga, uma das vantagens na construção das UTEs.

O primeiro passo para o cálculo deste custo foi adicionar as bases de dados de linhas georeferenciadas correspondentes as LTs de 138kV e as LTs de 440kV ao modelo. Através do uso de ferramentas do SIG que minimizam o caminho a ser percorrido do CG do município até as LTs mais próximas, foi possível preencher os campos de distâncias. Na Tabela 16 estão demonstrados alguns atributos relativos ao cálculo do custo de transmissão em 138kV, os quais serão utilizados no exemplo numérico a seguir.

Tabela 16 – Dados para cálculo de CT em 138kV → tecnologia TC-OCP

ID	Município	Lat	Long	Dist LT 138kV(Km)	Custo Conexão 138kV (US\$/MWh)	CT (US\$/MWh)
1	Adamantina	-21,68	-51,07	2,58	0,0106	-1,1894
2	Adolfo	-21,23	-49,64	9,23	0,0380	-1,1620
3	Aguaí	-22,05	-46,97	0,79	0,0032	-1,1968
4	Águas da Prata	-21,93	-46,71	1,51	0,0062	-1,1938
...	...	...	...	...	...	...
115	Cândido Mota	-22,74	-50,38	72,20	0,2972	-0,9028
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
645	Zacarias	-21,05	-50,05	1,83	0,0075	-1,1925

O custo de transmissão (CT) é analisado a seguir para o município de Cândido Mota (6ª linha da Tabela 16). A Equação 19 (pág. 40) e as outras apresentadas são referentes a este cálculo.

$$\begin{aligned}
 CT &= \frac{\text{DeltaPerda_MW} * \text{VL_Marginal}}{P_{\text{referência}}} + \text{CustoConexão} + \text{EncargosTrans} \\
 &= \frac{-10,5 * 40}{350} + 0,2972 + 0,0 = -0,9028 \text{ US\$ / MWh}
 \end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
 \text{DeltaPerda_MW} &= \text{PerdaTotal_MW} - \text{PerdaRef_MW} \\
 &= 17,5 - 28 = -10,5 \text{ MW / MW instalado}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PerdaTotal_MW} &= \text{Perdas_138kV} * P_{\text{referência}} \\ &= 0,05 * 350 = 17,5 \text{MW / MW instalado} \end{aligned}$$

Uma observação a ser feita é que para estes testes foi utilizado um valor fixo para as perdas em 138kV. Na formulação apresentada na seção 4.1.3 este valor deve considerar o sinal locacional e deve ser calculado para cada município. No entanto, a disponibilidade de dados já calculados refere-se a um pequeno número de municípios (81 municípios pertencentes à Bacia do rio Piracicaba), o que impossibilitou sua utilização neste trabalho incluindo as 645 cidades do Estado de São Paulo, utilizando-se o valor de 0,05 MW/MW instalado.

$$\begin{aligned} \text{PerdaRef_MW} &= \text{VL_Perda} * P_{\text{referência}} \\ &= 0,08 * 350 = 28 \text{MW / MW instalado} \end{aligned}$$

$$\text{VL_Perda} = 0,08 \text{ MW/MW instalado (referente às perdas na região Sudeste)}$$

$$P_{\text{referência}} = 350 \text{ MW}$$

$\text{VL_Marginal} = 40 \text{ US\$/MWh}$. Apesar da sugestão ser o valor publicado semanalmente por empresa do setor, este valor foi retirado da tela de ordenação do LITOM para posterior teste neste software com a tecnologia TC-OCP.

CustoConexão = valor calculado para cada município em função da distância do CG do município à LT e com preços retirados da Tabela 5. Através deste cálculo a base de dados de municípios é atualizada, como apresentado para alguns casos na Tabela 16.

$$\begin{aligned} \text{CustoConexão} &= \frac{\text{Dist_LT138kV} * \text{Valor_km_Eletrobrás} * \text{FRC}}{8760 * \text{FCMédio} * P_{\text{referência}}} \\ &= \frac{72,20 * 119.000 * 0,10607}{8760 * 1 * 350} = 0,2972 \text{US\$/MWh} \end{aligned}$$

EncargosTrans = no caso do uso da rede de 138kV, nos encargos de transmissão incidem os custos de transmissão (CusT138kV) e também o custo de distribuição (CusD138kV). No entanto, pelo mesmo motivo citado para o cálculo das

perdas, não houve a possibilidade de incluir estes dados para os 645 municípios do Estado de São Paulo.

Normalização dos critérios de avaliação econômica

O processo de normalização permite que valores de critérios não comparáveis entre si sejam normalizados para uma mesma escala, viabilizando a agregação entre eles. Assim, para que os custos da implantação da tecnologia TC-OCP sejam comparáveis com os critérios de avaliação ambiental no processo de ordenação das alternativas (Fase 2 do SIGTE) estes devem estar normalizados em uma escala que varia de zero a um, proposta para este estudo.

Os valores econômicos referentes ao custo de investimento do projeto (CI), custo de operação da tecnologia em cada município (CO) e o custo de transmissão de energia gerada em cada município (CT), todos representados em US\$/MWh, formam um valor representativo de todo o custo e foram normalizados pela Equação 35 a fim de se obter para o município com mais baixo custo o valor 1,00 e para o município de mais alto custo, o valor 0,00. Esta inversão de conceitos pode parecer estranha, mas foi assim caracterizada para que os valores normalizados do nível de poluição e das APAS pudessem ser introduzidos no produtório da Equação 34 com sua devida representação.

$$\mu = \frac{(\text{Custo_Total_Max}) - (\text{Custo_Total})}{(\text{Custo_Total_Max}) - (\text{Custo_Total_Min})} \quad (35)$$

Onde:

μ : valor final normalizado para os custos

Custo_Total_Max : valor máximo para os custos de TC-OCP

Custo_Total_Min : valor mínimo para os custos de TC-OCP

Custo_Total : valor de CI+CO+CT de TC-OCP para cada município

Critérios de avaliação ambiental

A avaliação ambiental no SIGTE está representada pelas variáveis: disponibilidade de água, poluição do ar e as áreas de preservação ambiental.

- *Disponibilidade de Água*

➤ Da tecnologia TC-OCP: como consta da Tabela 13, o requisito de água para esta tecnologia é de 11,6 m³/s.

➤ Dos municípios: utilizando os dados das UGRHI (seção 4.1.4), os valores de vazão constam do banco de dados de municípios e serão compatibilizados com o requisito da tecnologia.

Normalização do critério disponibilidade de água

Através da Equação 36 o valor normalizado é atribuído para o critério em questão. Nesta equação os pontos de controle são: valor mínimo de 11,6 m³/s, correspondente ao requisito de água de TC-OCP, e valor máximo igual a 157 m³/s, sendo esta a vazão máxima encontrada nas 22 UGRHI.

$$\mu = \frac{(\text{Dispon_água}) - (\text{Req_Tec})}{(\text{Vazão_Max}) - (\text{Req_Tec})} \quad (36)$$

$$\text{para: } \begin{cases} \text{Dispon_água} > \text{Vazão_Max} \rightarrow \mu = 1 \\ \text{Dispon_água} < \text{Req_Tec} \rightarrow \mu = 0 \end{cases}$$

onde: Dispon_água: referente à vazão do município segundo sua UGRHI

Vazão_Max: valor máximo de vazão encontrada nas 22 UGRHI

Req_Tec: requisito de água da tecnologia

Na Tabela 7 foram apresentados dados representativos para o atributo disponibilidade de água dos municípios. Tomando-se como exemplo um município cuja vazão de água seja 29 m³/s, tem-se:

$$\mu = \frac{(\text{Dispon_água}) - (\text{Req_Tec})}{(\text{Vazão_Max}) - (\text{Req_Tec})} = \frac{29 - 11,6}{157 - 11,6} = 0,12$$

- *Áreas de preservação ambiental*

Este critério independe do tipo de tecnologia que está sendo analisada. Constam da base de dados de municípios aqueles que são preservados, aos quais são atribuídos valores iguais a 0,0 (seção 4.1.5), sendo para todos os demais atribuído o valor igual a 1,0. Neste caso, o critério APAS já se encontra normalizado.

- *Níveis de poluição do ar*

➤ Da tecnologia TC-OCP: a classificação em um dos cinco níveis de poluição para a TC-OCP foi realizada através de análise em um conjunto de 30 tipos diferentes de tecnologias. No caso deste estudo o nível referente é 1 (baixa poluição, Tabela 9). Apesar dos óleos combustíveis pesados apresentarem em média 5% de enxofre em peso, não é admitido o uso de caldeiras convencionais sem equipamentos de controle, pois não atenderiam aos padrões ambientais vigentes. Assim, a utilização de sistemas de controle de emissões é imprescindível, podendo alcançar eficiência de remoção do dióxido de enxofre (poluente aqui analisado) da ordem de 90% (PROMON-PSR, 1996).

➤ Dos municípios: o nível de poluição dos municípios foi obtido através do uso de dados indiretos classificados através de RNA-SOM (seção 4.1.6) e apresentados na Figura 15 no mapa classificatório para a área do Estado de São Paulo.

Normalização do critério nível de poluição do ar

A Tabela 9 fornece os valores normalizados de compatibilidade entre o nível 1 de poluição da tecnologia e os municípios já classificados.

Aplicação da técnica WLC (Weighted Linear Combination)

O processo de ordenação de alternativas do SIGTE apresentado na Figura 16 (pág. 58) contempla os passos de definição de pesos e normalização dos critérios para a aplicação das técnicas de análise multicritério. A definição de pesos foi apresentada na seção 4.2.1 e a Tabela 10 apresenta o resultado para três métodos. O

método escolhido para a realização dos testes é o *Rank Sum*, atribuindo aos critérios fatores os seguintes pesos:

Critério Fator	Ordem no ranking	Peso atribuído (Rank Sum) - w_i
Nível de poluição o ar	1	0,500
Custos (CI + CO + CT)	2	0.333
Disponibilidade de água	3	0.167
		<hr/> 1,000

Após a normalização dos critérios, exemplificada para a tecnologia TC-OCP, e com a definição dos pesos para os critérios fatores, é possível aplicar a técnica WLC que os combina e os agrega de forma a se obter a ordenação das alternativas válidas (as inválidas foram excluídas pelos critérios do tipo exclusão: poluição e APAS) com possibilidade de se instalar a TC-OCP. A Equação 34 (pág. 63) é reescrita a seguir para exemplificação.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i * \prod_{j=1}^k c_j$$

Onde:

S: valor final do *score*

w_i : peso do critério fator i (com $i = 1, \dots, n$)

n : número de critérios do tipo fator, igual a 3 (poluição, custos e água)

x_i : valor normalizado para o mesmo fator

c_j : *score* (0 ou 1) do critério exclusão (com $j = 1, \dots, k$)

k : número de critérios exclusão, igual a 2 (APAS e poluição, também exclusão)

O *score* final identificará, numa escala decrescente, o melhor ou melhores locais (valores próximos a 1) para a instalação da tecnologia TC-OCP, segundo a definição de pesos apresentada.

$$Score_Final = (Poluição*0,500 + Custos*0,333 + Água*0,167)*APAS*Poluição$$

A Tabela 17 apresenta os resultados para alguns dos 645 municípios da área do Estado de São Paulo depois de aplicada a técnica WLC.

Tabela 17 – Dados representativos: localização da tecnologia TC-OCP – WLC

ID	Município	CI (US\$/MWh)	CO (US\$/MWh)	CT (US\$/MWh)	Valores Normalizados Escala 1 → 0 (Alternativa mais apta → menos apta)				Score Final
					Poluição	Custos	Água	APAS	
1	Itariri	12,96	32,27	-1,19	1,00	0,6686	1,000	1	0,8897
2	Barra do Chapéu	12,96	32,83	-1,13	1,00	0,5663	1,000	1	0,8556
3	Itaoca	12,96	32,99	-1,14	1,00	0,5431	1,000	1	0,8478
4	Elias Fausto	12,96	30,66	-1,16	1,00	0,9257	0,216	1	0,8443
5	Monte Mor	12,96	30,78	-1,20	1,00	0,9117	0,216	1	0,8397
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
554	Barretos	12,96	32,67	-1,18	0,40	0,6020	0,064	1	0,1645
555	Araçatuba	12,96	33,41	-1,19	0,40	0,4817	0,106	1	0,1512
556	Jumirim	12,96	31,39	-1,16	1,00	0,8062	0,071	0	0,0000
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
645	Barra do Turvo	12,96	33,56	-1,06	0,90	0,4360	1,000	0	0,0000

Os valores de scores mais altos (próximos de 1) selecionaram os locais mais aptos a receber a tecnologia TC-OCP com os pesos adotados. É fato que outros pesos podem ser testados e levar a outros resultados, mas o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo para o qual o ajuste dos pesos pode ser caracterizado pela especificidade da análise proposta, inclusive desmembrando os custos em critérios fatores individuais e atribuindo pesos a cada um deles.

A característica fundamental da técnica WLC é o fato de permitir a compensação entre os critérios, a qual pode ser verificada comparando-se as linhas 3 e 4 da Tabela 17, onde os scores finais para a implantação de TC-OCP nestes dois municípios apresentam valores próximos, mas com valores normalizados para custos e disponibilidade de água bastante distintos. Isto significa que uma qualidade pobre numa dada alternativa pode ser compensada por um conjunto de boas qualidades de outros critérios em outra alternativa.

Através do mapa da Figura 19 é possível visualizar as alternativas para a tecnologia TC-OCP ordenadas pelo score final de cada município. As alternativas não válidas para a instalação da tecnologia foram as áreas de preservação ambiental, num total de 89 municípios. Estas alternativas estão caracterizadas pela cor verde no mapa.

Figura 19 – Mapa das alternativas ordenadas para a tecnologia TC-OCP - WLC

Aplicação da técnica OWA (Ordered Weighted Average)

Esta outra técnica de ordenação de alternativas permite analisar diferentes situações de risco para a implantação da tecnologia TC-OCP. Nestes testes serão realizadas as análises de risco mínimo, médio e máximo. Os pesos obtidos para a aplicação da técnica WLC são utilizados em OWA atribuindo-lhes uma nova ordem, fazendo variar o conjunto de pesos para a obtenção das situações propostas.

- **Análise de risco mínimo:** aplicando um conjunto de pesos [1 0 0] ao critério fator com o menor score (depois de aplicados os pesos adotados em WLC), produz-se uma solução dita pessimista ou conservadora, onde se prioriza somente a qualidade mais pobre da alternativa (com menor valor normalizado e ponderado), o que significa que os critérios fatores não podem ser compensados uns pelos outros (ausência de *trade-off*). Para todos os municípios não considerados APAS e com nível de poluição do ar diferente de zero, foi verificado qual o menor score e a este critério atribuído o

maior peso do conjunto, o valor um. Aos demais scores foram atribuídos os pesos de valor zero. Na Tabela 18 são apresentados alguns dados representativos desta análise.

Tabela 18 – Dados representativos: análise de risco mínimo TC-OCP – OWA

ID	Município	Critérios fatores normalizados e multiplicados pelos pesos WLC			Menor Critério	Score OWA Mínimo
		Poluição * 0,5	Custos * 0,333	Água * 0,167		
1	Apiaí	0,90	0,5860	1,000	água	0,1670
		0,45	0,1951	0,167		
2	Barra do Chapéu	1,00	0,5663	1,000	água	0,1670
		0,50	0,1886	0,167		
3	Cajati	0,80	0,5471	1,000	água	0,1670
		0,40	0,1822	0,167		
4	Itaoca	1,00	0,5431	1,000	água	0,1670
		0,50	0,1808	0,167		
5	Itariri	1,00	0,6686	1,000	água	0,1670
		0,50	0,2226	0,167		
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
10	São Lourenço da Serra	0,90	0,8283	1,000	água	0,1670
		0,45	0,2758	0,167		
11	Itapirapuã Pta	1,00	0,4907	1,00	custos	0,1634
		0,5	0,1634	0,167		
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
555	Suzanápolis	1,00	0,2243	0,0028	água	0,0005
		0,50	0,0747	0,0005		
556	Rosana	1,00	0,0000	0,1541	custos	0,0000
		0,50	0,0000	0,0257		

Numa escala em ordem decrescente (melhor localização, maior score) pode-se verificar que os melhores locais na análise de risco mínimo apresentam nível de poluição baixo, custos baixos ou médios e disponibilidade de água abundante (valores normalizados próximos de 1). Na última linha da Tabela 18, o município de Rosana apresenta como menor critério normalizado pela técnica WLC os custos do empreendimento, o que, na verdade, é o local com maior custo para a construção da tecnologia TC-OCP (dado pela Equação 34), sendo considerado, na análise de risco mínimo, o pior local de instalação para este tipo de usina.

A visualização no mapa do Estado de São Paulo é apresentada na Figura 20 incluindo a localização das APAS, as quais, por serem um critério do tipo exclusão, foram retiradas da análise de risco mínimo.

Figura 20 – Mapa das alternativas TC-OCP com análise de risco mínimo – OWA

Uma observação a ser feita é que os 11 municípios selecionados como melhores alternativas possuem vazão disponível de água igual ao valor máximo ($157\text{m}^3/\text{s}$) e não são áreas de preservação ambiental. Isto é um processo natural porque a disponibilidade de água é o critério fator menos prioritário na ordem do *ranking* utilizado nestes testes, discutidos na seção 4.2.1, sendo o critério com maior peso na análise de risco mínimo.

➤ **Análise de risco médio:** aplicando um conjunto de pesos [0,333 0,333 0,333] perfeitamente equilibrado aos critérios fatores, produz-se uma solução onde há compensação entre as qualidades da alternativa (*trade-off* total), no sentido em que maus *scores* em alguns fatores podem ser compensados por bons *scores* em outros fatores. Na realidade este caso é um equivalente do WLC ou, ainda mais corretamente, o procedimento WLC é um caso particular do procedimento mais geral OWA. Na Tabela 19 são apresentados alguns dados representativos desta análise. Para todos os municípios não considerados APAS foi atribuído o conjunto de pesos citado.

Tabela 19 – Dados representativos: análise de risco médio TC-OCP – OWA

ID	Município	Critérios fatores normalizados Escala 1 → 0			Critérios fatores com pesos WLC e pesos OWA médio			Score OWA Médio
		Poluição	Custos	Água	Poluição * 0,5 * 0,333	Custos * 0,333 * 0,333	Água * 0,167 * 0,333	
1	São Lourenço Serra	0,90	0,8283	1,00	0,1498	0,0918	0,0556	0,2972
2	Itariri	1,00	0,6686	1,00	0,1665	0,0741	0,0556	0,2962
3	Barra do Chapéu	1,00	0,5663	1,00	0,1665	0,0628	0,0556	0,2849
4	Itaoca	1,00	0,5431	1,00	0,1665	0,0602	0,0556	0,2823
5	Elias Fausto	1,00	0,9257	0,2160	0,1665	0,1026	0,0120	0,2811
6	Monte Mor	1,00	0,9117	0,2160	0,1665	0,1011	0,0120	0,2796
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
554	São José Rio Preto	0,40	0,5930	0,0990	0,0666	0,0657	0,0055	0,1378
555	Barretos	0,40	0,6020	0,0646	0,0666	0,0667	0,0036	0,1369
556	Araçatuba	0,40	0,4817	0,1059	0,0666	0,0534	0,0059	0,1259

Os locais com melhores scores obtidos nesta análise assemelham-se aos mesmos obtidos em WLC, com algumas diferenças provocadas pela não multiplicação do critério fator e também exclusão do valor normalizado da poluição.

O mapa obtido para esta análise é apresentado na Figura 21 com os melhores scores destacados na cor preta.

Figura 21 - Mapa das alternativas TC-OCP com análise de risco médio – OWA

➤ **Análise de risco máximo:** aplicando um conjunto de pesos [0 0 1] ao critério fator com o maior score (depois de aplicados os pesos adotados em WLC), produz-se uma solução dita otimista ou de elevado risco, onde se prioriza somente a melhor qualidade da alternativa (com maior valor normalizado e ponderado). Assim como na análise de risco mínimo, os critérios fatores não podem ser compensados uns pelos outros (ausência de *trade-off*). Na Tabela 20, para os municípios não considerados como APAS, alguns dados representativos desta análise são apresentados com a identificação do critério fator com maior score, ao qual foi atribuído o maior peso do conjunto, o valor um. Aos demais critérios fatores foram atribuídos os pesos de valor zero.

Tabela 20 – Dados representativos: análise de risco máximo TC-OCP – OWA

ID	Município	Critérios fatores normalizados e multiplicados pelos pesos WLC			Maior Critério	Score OWA Máximo
		Poluição	Custos	Água		
		Poluição * 0,5	Custos * 0,333	Água * 0,167		
1	Adolfo	1,00	0,4430	0,1334	poluição	0,50
		0,5	0,1475	0,0222		
2	Águas da Prata	1,00	0,8318	0,2572	poluição	0,50
		0,5	0,2770	0,0429		
3	Águas de Lindóia	1,00	0,8173	0,2572	poluição	0,50
		0,5	0,2721	0,0429		
4	Alambari	1,00	0,7747	0,0715	poluição	0,50
		0,5	0,2579	0,0119		
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
332	Zacarias	1,00	0,3785	0,1059	poluição	0,50
		0,5	0,1260	0,0177		
333	Adamantina	0,90	0,4484	0,1197	poluição	0,45
		0,45	0,1493	0,0199		
.	.	.	.	.	.	.
342	Vargem Grande Pta	0,90	0,8484	0,0715	poluição	0,45
		0,45	0,2825	0,0119		
.	.	.	.	.	.	.
555	Araçatuba	0,40	0,4817	0,1059	poluição	0,20
		0,20	0,1604	0,0177		
556	Barretos	0,40	0,6022	0,0646	custos	0,20
		0,20	0,2005	0,0108		

Pela Tabela 20 e pelo mapa apresentado na Figura 22 é possível avaliar que a análise de risco máximo para TC-OCP priorizou na maior parte dos municípios o nível de poluição. Isto porque o critério fator com maior peso quando aplicada a técnica WLC é o da poluição. Apenas em 49 municípios (desconsiderando as APAS) o custo foi determinado como maior critério na análise, casos em que o nível de poluição é alto e possui valor próximo de zero. Este processo assemelha-se com a classificação dos níveis de poluição pelo motivo citado.

Figura 22 - Mapa das alternativas TC-OCP com análise de **risco máximo** – OWA

Abordagem pelo LITOM (SAEGET)

O teste realizado para a localização da tecnologia TC-OCP no LITOM requer algumas considerações. A primeira delas é que a versão aqui utilizada possui caráter demonstrativo e não contempla todas as atualizações dos bancos de dados. Por isto, pode apresentar algumas deficiências e deve ser considerada a análise da metodologia adotada nos pontos discutidos a seguir.

No LITOM, a componente espacial é caracterizada por células uniformes de 25 x 33 km e a área do Estado de São Paulo dividida em 416 células, as quais

englobam seus 645 municípios. Neste contexto, um município pode pertencer a uma ou várias células e uma célula é composta por um ou mais municípios. Os dados relativos à célula são representativos de um município, denominado sede, ou um valor médio de todos os seus municípios.

O programa determina as alternativas a partir da seleção do trinômio: tecnologia e/ou combustível e/ou município (posicionado pela célula ou células a que pertence este município) ou somente por um destes atributos. Esta é uma forma interessante de gerar as alternativas e uma das etapas futuras para o SIGTE, sendo permitido ao usuário selecionar os parâmetros da geração das alternativas.

- *Variável tecnologia*

Baseando-se no mesmo processo utilizado no SIGTE, a tecnologia selecionada é a TC-OCP com as características técnicas apresentadas nas Tabelas 13 e 14 da seção 5.1. No LITOM as informações fazem parte de um banco de tecnologias.

- *Variável transporte*

Assume-se neste ponto que o único combustível selecionado para o teste é o óleo combustível pesado. No entanto, pela tela de geração de alternativas seria possível selecionar os 25 tipos de combustíveis que estão presentes no banco de dados de combustíveis.

No processo de geração das alternativas a variável transporte possui caráter restritivo e as células que não possuem “ligação”, pelo meio de transporte pré-determinado para o combustível em questão, são excluídas do conjunto solução das possíveis alternativas para a instalação da TC-OCP. A Tabela 21 apresenta a forma como os dados sobre esta variável são determinados e a distância existente entre as células de origem e destino, estando o ponto de referência para o cálculo no centro de cada célula. Para o cálculo do custo de transporte é utilizado um modelo auxiliar de otimização, com os resultados manipulados pelo LITOM através das tabelas geradas.

Tabela 21 – Exemplos de configuração de transporte no LITOM

Célula de origem	Célula de destino	Tipo de transporte	Distância (km)
282 (Paulínia)	13 (Santa Fé do Sul)	11 (Ferroviário)	629
282	14 (Santa Albertina)	11	601
.....			
282	34 (Fernandópolis)	11	544
369 (Santos)	2 (Populina)	1 (Rodoviário)	664
369	13 (Santa Fé do Sul)	1	684
.....			
369	415 (Cananéia)	1	251

O custo do transporte, dado pela distância a ser percorrida e o preço a ser pago, é retirado de uma tabela contendo faixas de distâncias. A Tabela 22 é um exemplo dado para o combustível óleo combustível pesado transportado pelas ferrovias.

Tabela 22 – Custo de transporte ferroviário no LITOM

Tipo de combustível	Tipo de transporte	Distância (km)	Custo (\$/unidade)
17	11	50	3,49
17	11	100	4,48
17	11	150	5,47
.....			
17	11	1000	20,3

O custo de operação apresentado para o SIGTE no capítulo 4, seção 4.1.2, nas Equações 12 a 18, foi originado do LITOM com algumas modificações. Por isto, este custo é o mesmo já exemplificado, excluindo o custo de construção do ramal, que no SIGTE foi incluído para que a variável transporte fosse um critério fator e não de exclusão.

- *Variável linhas de transmissão*

Os valores utilizados no LITOM para a variável LT são retirados diretamente do banco de dados de células, sendo os valores de distância calculados do centro de

cada célula até as LTs para as tensões de 138 kV e 440 kV. Este dado é calculado para uma área grande, em torno de 800 km² (em função das dimensões da célula: 25 x 33 km), sendo os valores extrapolados para todos os municípios pertencentes à célula. Na Figura 23 esta exemplificada uma tela do banco de dados de células indicando o atributo LT.

Para o cálculo do custo de transmissão são utilizados os dados do banco de dados de células e os cálculos são os mesmos apresentados para o SIGTE (provenientes do LITOM) no capítulo 4, seção 4.1.3, a partir da Equação 19. Na versão utilizada para este teste no LITOM ainda não estão incluídos na formulação de CT os encargos da transmissão.

Manipulação de Dados
 São Tabelas Atributos Dados Relatórios 2

Sede: FERNANDÓPOLIS Célula: 34

Lista de atributos:

- Área de Inundação (S ou N)
- Áreas Naturais sob Proteção
- Baragens
- Barragem de Distribuição de Combustíveis
- Classificação do Risco Sísmico (fração de g)
- Consumo de Energia (MW)
- Cota Média (m)
- Custo de Conexão à Rede de 138 kV (MUS\$)
- Custo de Conexão à Rede de 440 kV (MUS\$)
- Distância Rodoviária da Capital (km)
- Ondas
- Ferrovias
- Hidroviárias
- Identificação da Estação Meteorológica
- Limite de Instalação (MW)
- Limite de Instalação em 138 kV (MW)
- Linhas de Transmissão
- Municípios
- Nível de Dióxido de Enxofre (micro g/Nm³)
- Nível de Dióxido de Enxofre (micro g/Nm³)sc
- Nível de Fumaça (micro g/Nm³)
- Nível de Fumaça (micro g/Nm³)sc
- Nível de Óxidos de Nitrogênio (micro g/Nm³)
- Nível de Óxidos de Nitrogênio (micro g/Nm³)sc
- Nível de Poluição das Águas (100 - IQA)
- Nível de Poluição das Águas (100 - IQA)sc
- Número da Carta do IBGE
- Perdas em 138 kV (MW / MW instalado)
- Perdas em 440 kV (MW / MW instalado)
- Postos
- Refinarias

Identificação da Estação Meteorológica
 POSTO DE VOTUPORANGA

Hidroviárias
 SIGLA

Limite de Instalação (MW)
 2000

Linhas de Transmissão

COMPANHIA	TENSÃO (KV)	DISTÂNCIA (KM)
CESP	440	15
CESP	138	0

Limite de Instalação em 138 kV (MW)
 20

Municípios

NOME	SEDE (S OU N)	CÉLULA
FERNANDÓPOLIS	S	
PEDRANÓPOLIS	S	
MERIDIANO	S	

Próxima Anterior

Figura 23 – Banco de dados de células no LITOM – atributo linhas de transmissão

• Variável água

No LITOM a variável água possui caráter restritivo e um valor lógico do tipo S (sim) ou N (não) é atribuído para a verificação do requisito de água da tecnologia em relação à vazão de água disponível na célula. A dificuldade estabelecida é a de determinar para as 416 células o valor da vazão de água disponível.

- *Variável poluição do ar*

Uma importante variável de todos os modelos de localização de UTEs é a poluição. No LITOM existem vários atributos referentes ao nível de poluição do ar, tanto para definição qualitativa (níveis alto, médio e baixo) como para quantitativa, considerando as alternativas válidas ou não para a instalação da tecnologia sob análise (tipo restritiva). No entanto, para o abastecimento destas informações no banco de células, estes dados deveriam existir para todos os municípios do Estado de São Paulo, porém, como já citado anteriormente, esta situação não ocorre. A tabela de compatibilização do nível de poluição da tecnologia e das células é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Compatibilidade do nível de poluição do ar no LITOM

Tecnologia → Célula ↓	Alta	Média	Baixa
Alta	Não	Não	Sim
Média	Não	Sim	Sim
Baixa	Sim	Sim	Sim

O mapa obtido pelo LITOM para o estudo de caso proposto é apresentado na Figura 25 com as melhores localizações definidas por posições próximas à célula 282, onde se localiza o município de Paulínia (ponto considerado de origem do combustível óleo pesado). As alternativas (células) válidas para a instalação da tecnologia TC-OCP seguem alguns dos traçados de ferrovias do Estado de São Paulo (o qual pode ser observado na Figura 8, pág. 31).

O processo de ordenação das alternativas consideradas válidas é denominado função distância e está apresentado na Equação 37. Como as variáveis ambientais não estão com seus dados atualizados, os atributos considerados foram relativos aos custos.

$$Z(x) = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^j w_i A_i(x)^n} \quad (37)$$

Onde:

$Z(x)$ - distância do ponto x com relação ao plano de referência adotado

n - expoente utilizado para cálculo. Neste caso, igual a 2 (representando a combinação quadrática das distâncias entre as variáveis)

j - número de variáveis a ser avaliado

w_i - peso atribuído a cada variável

A_i - variável a ser avaliada

Figura 24 – Mapa do LITOM para a tecnologia TC-OCP

As células apresentadas na cor amarela e com valor 0 para a função objetivo são alternativas não válidas para a instalação da tecnologia TC-OCP, restritas pelas variáveis envolvidas no problema.

5.2 – Térmica a gás – ciclo combinado

Como no estudo de caso apresentado na seção 5.1, a escolha da tecnologia é o primeiro passo para a geração de alternativas no SIGTE. Neste caso, a tecnologia sob análise é uma termoeétrica a gás operando em ciclo combinado, aqui designada por TG-CC.

Este tipo de usina adota como combustíveis o gás médio do Brasil, o gás natural liquefeito, e o gás natural da Bolívia. Porém, somente este último será utilizado nos testes por questões de disponibilidade de dados.

O gás é um combustível que apresenta características que o tornam o combustível ideal para a geração de energia elétrica pelo seu baixo teor de enxofre, que elimina a necessidade de equipamentos de purificação de efluentes gasosos, hoje um dos itens que mais pesa nos custos da geração termoeétrica convencional. A quase ausência de cinzas aumenta a eficiência de geração e reduz a necessidade e o custo das manutenções (PROMON-PSR, 1996).

A tecnologia que utiliza ciclo combinado tem seu nome derivado da utilização de combustível na geração elétrica através dos ciclos Brayton e Rankine em cascata, isto é, usando-se turbinas a gás e turbinas a vapor combinadamente. Nele o combustível é queimado em uma ou mais turbinas a gás, gerando energia elétrica de maneira inteiramente igual às turbinas de ciclo simples. Os gases queimados, que deixam a turbina a gás, são aproveitados em uma caldeira de recuperação, para gerar vapor que aciona a turbina a vapor. Como o vapor é obtido sem a queima de combustível, a potência acrescentada pela turbina a vapor não tem um correspondente consumo de combustível, o que faz do ciclo combinado o meio prático mais eficiente para se gerar energia elétrica termicamente (PROMON-PSR, 1996). Na Figura 26 é possível observar um esquema genérico de funcionamento deste tipo de usina.

Figura 25 - Esquema simplificado de uma térmica em ciclo combinado

Os dados referentes às características da tecnologia TG-CC são apresentados nas Tabelas 24 e 25 e serão utilizados para a geração das alternativas.

Tabela 24 – Características técnicas da tecnologia TG-CC

Característica	Valor
Módulo (MW)	225
Custo de instalação (US\$/kW)	659
Emissão de dióxido de enxofre (kg/MJ)	0,027
Emissão de óxido de nitrogênio (kg/MJ)	0,027
Emissão de particulados (kg/MJ)	0
Fator para custo de internação (K)	1,31
Vida útil do equipamento	30
Custo variável de O&M (US\$/MWh)	0,42
Custo fixo de O&M (US\$/kWano)	27,8
Requisito de água (m ³ /s)	7,5
Ajuste de temperatura e altitude (S/N)	S
Potência gerada a gás	150
Combustível que utiliza	gás natural

Tabela 25 – Tabela de eficiência da tecnologia TG-CC

Fator de Capacidade (%)	Heat_Rate (kJ/kWh)	Fração de Tempo (%)
25	11090	25
50	8780	25
75	7930	25
100	7700	25

CrITÉRIOS de avaliação econômica

Para os critérios de avaliação econômica incorporados à análise são calculados os custos: de investimento, de operação e de transmissão. Na seqüência, alguns exemplos numéricos são apresentados para a tecnologia TG-CC.

Tecnologia → Custo de Investimento

Para a tecnologia TG-CC o custo de investimento depende do ajuste de temperatura e altitude dos locais onde esta será instalada. Sendo assim, o cálculo será efetuado para cada um dos 645 municípios sob análise e demonstrado aqui para o município de Franca, correspondente à linha em destaque na Tabela 26. Da Equação 1 (pág. 24) e, outras subseqüentes, tem-se:

$$CI = \frac{\text{Custo}_{\text{Pot}} * \text{FRC} * k * \left(\frac{\text{Pot}_{\text{AltTemp}}}{P_{\text{referência}}} \right)^{0,15}}{8,76 * \frac{E}{P_{\text{referência}}}}$$

$$CI = \frac{733,35 * 0,10607 * 1,31 * \left(\frac{202,18}{350} \right)^{0,15}}{8,76 * \left(\frac{350}{350} \right)} = 10,71 \text{US\$/MWh}$$

Onde:

$$\text{Custo}_{\text{Pot}} = \frac{C_{\text{inst}} * \text{Módulo}}{\text{Pot}_{\text{AltTemp}}} = \frac{659 * 225}{202,18} = 733,35 \text{ US\$ /kW}$$

Com:

$$C_{\text{inst}} = 659 \text{ US\$/kW} \quad (\text{retirado da Tabela 24})$$

$$\text{Módulo} = 225 \text{ MW} \quad (\text{retirado da Tabela 24})$$

$$\text{Pot}_{\text{Gás}} = 150 \text{ MW} \quad (\text{retirado da Tabela 24})$$

$$\begin{aligned} \text{Pot}_{\text{AltTemp}} &= \text{Módulo} - \text{Pot}_{\text{Gás}} + (\text{Variação}_{\text{Alt}} * \text{Variação}_{\text{Temp}} * \text{Pot}_{\text{Gás}}) \\ &= 225 - 150 + (0,8750 * 0,9690 * 150) = 202,18 \text{ MW} \end{aligned}$$

Com $\text{Variação}_{\text{Alt}}$ e $\text{Variação}_{\text{Temp}}$ (Algoritmo 1 - seção 4.1.1):

$$\begin{aligned} \text{Variacao}_{\text{Alt}} &= 1 - (0,01 / 80) * \text{Altitude} \\ &= 1 - (0,01 / 80) * 1000 = 0,8750 \end{aligned}$$

$$\text{Temperatura média local} = 19,33 \text{ °C}$$

$$\begin{aligned} \text{Variacao}_{\text{Temp}} &= 1 + (0,01 / 1,4) * (15 - \text{Temperatura_Local}) \\ &= 1 + (0,01 / 1,4) * (15 - 19,33) = 0,9690 \end{aligned}$$

$$\text{FRC} = \frac{i * (1+i)^{nv}}{[(1+i)^{nv} - 1]} = \frac{0,1 * (1+0,1)^{30}}{[(1+0,1)^{30} - 1]} = 0,10607$$

$$\text{Com: } i = 0,10 \quad (\text{taxa de desconto anual})$$

$$nv = 30 \text{ anos} \quad (\text{vida útil dos equipamentos})$$

$$k = 1,31 \quad (\text{fator de custo de internação, Tabela 24})$$

$$P_{\text{referência}} = 350 \text{ MW} \quad (\text{valor atribuído para parametrização dos custos entre as tecnologias, para efeito de comparação})$$

E = critério econômico. Selecionado como concessionária e o cálculo indicado por:

$$E = \text{FCMax} * P_{\text{referência}} = 1 * 350 = 350$$

FCMax = Fator de capacidade máximo da usina. Seu cálculo é efetuado seguindo-se o Algoritmo 2 da seção 4.1.1 (pág. 29), com valores da Tabela 25, resultando no valor igual a 1.

Tabela 26 – Dados para cálculo de CI → tecnologia TG-CC

ID	Município	Lat	Long	Alt. (m)	Temp. (°C)	Var. Alt.	Var. Temp.	Potência Alt e Temp (MW)	CI (US\$/MWh)
1	Adamantina	-21,68	-51,07	440	21,80	0,9450	0,9514	209,86	10,37
2	Adolfo	-21,23	-49,64	442	22,09	0,9448	0,9494	209,54	10,39
3	Aguaí	-22,05	-46,97	680	20,16	0,9150	0,9632	207,20	10,49
4	Águas da Prata	-21,93	-46,71	840	19,32	0,8950	0,9692	205,11	10,58
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
188	Franca	-20,53	-47,40	1000	19,33	0,8750	0,9690	202,18	10,71
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
645	Zacarias	-21,05	-50,05	410	22,40	0,9488	0,9472	209,80	10,38

Como pôde ser observado, o custo de investimento para este tipo de tecnologia depende da localização onde esta será instalada. Isto porque a potência gerada a gás perde eficiência de acordo com a altitude e temperatura do local (para temperaturas acima de 15°C). Este processo pode ser analisado pela potência resultante representada na coluna 9 da Tabela 26 (com a indicação *Potência Alt e Temp (MW)*) onde municípios com altitudes próximas a zero e temperaturas próximas a 15°C sofrem menos variação.

Na área do Estado de São Paulo, apenas o município de Campos do Jordão, cuja temperatura média anual é igual a 14,26°C não sofre variação da temperatura, mas em compensação é o município com mais alta altitude, 1620m. Para todos os municípios do Estado de São Paulo a potência mínima encontrada foi de 194,62MW e a máxima foi de 217,33MW, para a TG-CC, cujo módulo é de 225MW. O custo de investimento é diretamente proporcional a esta variação da potência.

Transporte → Custo de Operação

O combustível utilizado para a geração de energia elétrica através da tecnologia TG-CC é o gás natural. Seu transporte é realizado pelo gasoduto, que está georeferenciado em uma das bases de dados de linhas do SIG. Este combustível tem o mesmo preço em toda a extensão do gasoduto e, por isto, pode ter como origem qualquer ponto de conexão.

Como no caso estudado anteriormente, foi adotado o centro geográfico (CG) de cada município dentro de sua área. Foi calculada a distância do CG até o gasoduto (base de dados de linhas) através de ferramentas do SIG que minimizam o caminho a ser percorrido, ou seja, procuram na base de dados de linhas a melhor conexão. Para verificar a necessidade de construção ou não de ramais do gasoduto, foi adotada a mesma distância de análise de 10km, considerando-se que a usina será construída em um raio de, aproximadamente, 10km do CG do município. Através deste processo, tem-se a distância do CG ao gasoduto que é o trecho de construção do ramal de interligação. Com estas considerações a variável transporte é analisada como um critério do tipo fator e os cálculos permitem considerar todos os municípios como alternativas onde é possível instalar a tecnologia TG-CC, sendo as mesmas restritas apenas por critérios do tipo exclusão.

Na Tabela 27 estão representados alguns atributos para o cálculo do custo de operação (CO). Este custo é calculado para cada município da área sob análise.

Tabela 27 – Dados para cálculo de CO → tecnologia TG-CC

ID	Município	Lat	Long	Temp (°C)	Dist. CG ao Gasoduto (km)	Custo Ramal (US\$/m ³)	FMédioTec	CO (US\$/MWh)
1	Adamantina	-21,68	-51,07	21,80	43,53	0,002509	5241,80	27,50
2	Adolfo	-21,23	-49,64	22,09	43,52	0,002509	5243,49	27,51
3	Aguaí	-22,05	-46,97	20,16	50,28	0,003031	5232,31	27,57
4	Águas Prata	-21,93	-46,71	19,32	80,36	0,004592	5227,44	27,86
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
645	Zacarias	-21,05	-50,05	22,40	53,93	0,003031	5245,27	27,62

O CO em cada município é composto pelas parcelas da Equação 12 (pág. 34) e equações subsequentes da seção 4.1.2. Para o município de Adolfo (2ª linha da Tabela 27) é possível verificar os cálculos do custo de operação para TG-CC:

$$\begin{aligned}
 \text{CO} &= \text{Custo}_{\text{Básico}} + \text{Custo}_{\text{Var}} + \text{Custo}_{\text{Fixo}} \\
 &= 22,01 + 0,42 + 5,0776 = 27,51 \text{ US\$ / MWh}
 \end{aligned}$$

Custo Básico de Operação (Custo_Básico)

$$\begin{aligned}\text{Custo_Básico} &= 1000 * \text{Custo_1kJ} * \text{FMédioTec} / \text{FCMédio} \\ &= 1000 * (2,63 * 10^{-6}) * 5243,49 / 0,625 = 22,01 \text{US\$ / MWh}\end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}\text{Custo_1kJ} &= \frac{\text{Custo_Combustível} + \text{Custo_Transporte} + \text{Custo_Ramal}}{\text{Poder_Calorífico_Superior}} \\ &= \frac{0,107 + 0 + 0,002509}{41734} = 2,63 * 10^{-6} \text{ US\$ / kJ}\end{aligned}$$

$\text{Custo_Combustível} = 0,107 \text{ US\$/m}^3$ (preço FOB em qualquer ponto do gasoduto)

$\text{Custo_Transporte} = 0$. Este custo não é incluído para o caso do transporte realizado pelo gasoduto, pois existe a necessidade de construção do ramal em qualquer situação, diferentemente do custo de transporte nas ferrovias, onde o trajeto é realizado por ferrovias já existentes e ramais a serem construídos.

$\text{Custo_Ramal} = 0,002509 \text{ US\$/m}^3$ (valor retirado da Tabela 4 referente à faixa de 40km de construção do ramal do gasoduto, pois a $\text{Distância_Construída} = 43,52 - 10 = 33,52 \text{ km}$)

→ Distância de análise

$\text{Poder_Calorífico_Superior}$ = refere-se à qualidade do combustível e para o gás natural tem o valor de 41.734 kJ/m³.

FMédioTec = Fator de capacidade da tecnologia. Seu cálculo é efetuado seguindo-se o Algoritmo 4 da seção 4.1.2 (pág. 37). Com dados das 4 linhas da Tabela 25 (eficiência da tecnologia TG-CC) e o valor da temperatura média local (2ª

linha da Tabela 27), o cálculo abaixo é apresentado tendo como referência o município de Adolfo. Este fator é influenciado pela temperatura do local, influenciando o Heat_Rate e diminuindo a eficiência da tecnologia em locais com temperaturas acima de 15°C.

Ler do início ao fim da Tabela 25 e calcular Heat_Rate em função da temperatura local:

$$\text{Heat_Rate} = \text{Heat_Rate} * (0,01 / 9 * \text{Temperatura_Local} + 8,85 / 9)$$

$$1^{\text{a}}. \text{ linha: } 11090 * (0,01 / 9 * 22,09 + 8,85 / 9) = 11.177,36$$

$$2^{\text{a}}. \text{ linha: } 8780 * (0,01 / 9 * 22,09 + 8,85 / 9) = 8.849,16$$

$$3^{\text{a}}. \text{ linha: } 7930 * (0,01 / 9 * 22,09 + 8,85 / 9) = 7.992,47$$

$$4^{\text{a}}. \text{ linha: } 7700 * (0,01 / 9 * 22,09 + 8,85 / 9) = 7.760,66$$

$$\text{FMédioTec} = \text{FMédioTec} + \text{Fator_Capacidade} / 100 * \text{Heat_Rate} * \text{Fração_Tempo} / 100$$

$$\begin{aligned} &= 0 + 25/100 * 11177,36 * 25/100 + \\ &\quad 50/100 * 8849,16 * 25/100 + \\ &\quad 75/100 * 7992,47 * 25/100 + \\ &\quad 100/100 * 7760,66 * 25/100 \end{aligned}$$

$$= 5243,49 \text{ kJ/kWh}$$

FCMédio = Fator de capacidade médio econômico da tecnologia. Seu cálculo é efetuado seguindo-se o Algoritmo 3 da seção 4.1.1 (pág. 29), com dados da Tabela 25:

Ler do início ao fim da Tabela 25 e calcular FCMédio:

$$\begin{aligned} \text{FCMédio} &= \text{FCMédio} + (\text{Fator_Capacidade} / 100) * (\text{Fração_Tempo} / 100) \\ &= 0 + [(25/100) * (25/100)] + [(50/100) * (25/100)] + \\ &\quad [(75/100) * (25/100)] + [(100/100) * (25/100)] = 0,625 \end{aligned}$$

Custo Variável de O&M (Custo_Var)

$$\text{Custo_Var} = 0,42 \text{ US\$/MWh} \quad (\text{dado retirado da Tabela 24})$$

Custo Fixo de O&M (Custo_Fixo)

$$\text{Custo_Fixo} = \frac{\text{CFixo}}{8,76 * \text{FCMédio}} = \frac{27,8}{8,76 * 0,625} = 5,0776 \text{ US\$/MWh}$$

Onde:

$$\text{CFixo} = 27,8 \text{ US\$ / kWano} \quad (\text{dado retirado da Tabela 24})$$

8,76 = constante associada ao número de horas no ano, utilizada para a conversão de US\$ / kWano para US\$ / MWh.

Linhas de Transmissão → Custo de Transmissão

Utilizando as bases de dados de linhas georeferenciadas correspondentes as LTs de 138kV e de 440kV é possível calcular o custo da transmissão (CT) para a geração de energia elétrica através da tecnologia TG-CC. Na Tabela 28 estão demonstrados alguns atributos relativos ao cálculo do custo de transmissão em 138kV, os quais serão utilizados no exemplo numérico a seguir.

Tabela 28 – Dados para cálculo de CT em 138kV → tecnologia TG-CC

ID	Município	Lat	Long	Dist LT 138kV(Km)	Custo Conexão 138kV (US\$/MWh)	CT (US\$/MWh)
1	Adamantina	-21,68	-51,07	2,58	0,0170	-1,1830
2	Adolfo	-21,23	-49,64	9,23	0,0608	-1,1392
3	Aguaí	-22,05	-46,97	0,79	0,0052	-1,1948
4	Águas da Prata	-21,93	-46,71	1,51	0,0099	-1,1901
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
645	Zacarias	-21,05	-50,05	1,83	0,0121	-1,1879

O custo de transmissão (CT) é analisado a seguir para o município de Adolfo (2ª linha da Tabela 28). A Equação 19 (pág. 40) e as outras apresentadas na seção 4.1.3 são referentes a este cálculo.

$$CT = \frac{\text{DeltaPerda_MW} * \text{VL_Marginal}}{P_{\text{referência}}} + \text{CustoConexão} + \text{EncargosTrans}$$

$$= \frac{-10,5 * 40}{350} + 0,0608 + 0,0 = -1,1392 \text{ US\$ / MWh}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \text{DeltaPerda_MW} &= \text{PerdaTotal_MW} - \text{PerdaRef_MW} \\ &= 17,5 - 28 = -10,5 \text{ MW / MW instalado} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PerdaTotal_MW} &= \text{Perdas_138kV} * P_{\text{referência}} \\ &= 0,05 * 350 = 17,5 \text{ MW / MW instalado} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PerdaRef_MW} &= \text{VL_Perda} * P_{\text{referência}} \\ &= 0,08 * 350 = 28 \text{ MW / MW instalado} \end{aligned}$$

$$\text{VL_Perda} = 0,08 \text{ MW/MW instalado (referente às perdas na região Sudeste)}$$

$$P_{\text{referência}} = 350 \text{ MW}$$

Tal como no caso anterior, uma observação a ser feita é que para estes testes foi utilizado um valor fixo para as perdas em 138kV. Na formulação apresentada na seção 4.1.3 este valor deve considerar o sinal locacional e deve ser calculado para cada município. No entanto, a disponibilidade de dados já calculados refere-se a um pequeno número de municípios, o que impossibilitou sua utilização neste trabalho incluindo as 645 cidades do Estado de São Paulo.

$$\text{VL_Marginal} = 40 \text{ US$/MWh}$$

CustoConexão = valor calculado para cada município em função da distância do CG do município à LT e com preços retirados da Tabela 5. Através deste cálculo a

base de dados de municípios é atualizada, como apresentado para alguns casos na Tabela 28.

$$\begin{aligned}\text{CustoConexão} &= \frac{\text{Dist_LT138kV} * \text{Valor_km_Eletrobrás} * \text{FRC}}{8760 * \text{FCMédio} * P_{\text{referência}}} \\ &= \frac{9,23 * 119.000 * 0,10607}{8760 * 0,625 * 350} = 0,0608 \text{ US\$ /MWh}\end{aligned}$$

EncargosTrans = no caso do uso da rede de 138kV, nos encargos de transmissão incidem os custos de transmissão (CusT138kV) e também o custo de distribuição (CusD138kV). No entanto, pelo mesmo motivo citado para o cálculo das perdas, não houve a possibilidade de incluir estes dados para os 645 municípios do Estado de São Paulo.

Normalização dos critérios de avaliação econômica

Para que os custos da implantação da tecnologia TG-CC sejam comparáveis com os critérios de avaliação ambiental no processo de ordenação das alternativas (Fase 2 do SIGTE) estes devem estar normalizados em uma escala que varia de zero a um, proposta para este estudo. Para normalizar os valores econômicos referentes ao custo de investimento do projeto (CI), custo de operação da tecnologia em cada município (CO) e o custo de transmissão de energia gerada em cada município (CT), todos representados em US\$/MWh, a Equação 35 (pág. 75) foi utilizada a fim de se obter para o município com mais baixo custo o valor 1,00 e, para o município de mais alto custo, o valor 0,00.

$$\mu = \frac{(\text{Custo_Total_Max}) - (\text{Custo_Total})}{(\text{Custo_Total_Max}) - (\text{Custo_Total_Min})}$$

Onde:

μ : valor final normalizado para os custos

Custo_Total_Max : valor máximo para os custos de TG-CC

Custo_Total_Min : valor mínimo para os custos de TG-CC

Custo_Total : valor de CI+CO+CT de TG-CC para cada município

Critérios de avaliação ambiental

A avaliação ambiental no SIGTE está representada pelas variáveis: disponibilidade de água, poluição do ar e as áreas de preservação ambiental.

- *Disponibilidade de Água*

- Da tecnologia TG-CC: como consta da Tabela 24, o requisito de água para esta tecnologia é de 7,5 m³/s.

- Dos municípios: utilizando os dados das UGRHI (seção 4.1.4), os valores de vazão constam do banco de dados de municípios e serão compatibilizados com o requisito da tecnologia.

Normalização do critério disponibilidade de água

Através da Equação 36 (pág. 76) o valor normalizado para o critério em questão é atribuído. Nesta equação, os pontos de controle são: valor mínimo de 7,5 m³/s, correspondente ao requisito de água de TG-CC e valor máximo igual a 157 m³/s, sendo esta a vazão máxima encontrada nas 22 UGRHI.

$$\mu = \frac{(\text{Dispon_água}) - (\text{Req_Tec})}{(\text{Vazão_Max}) - (\text{Req_Tec})}$$

$$\text{para: } \begin{cases} \text{Dispon_água} > \text{Vazão_Max} \rightarrow \mu = 1 \\ \text{Dispon_água} < \text{Req_Tec} \rightarrow \mu = 0 \end{cases}$$

onde: Dispon_água: referente à vazão do município segundo sua UGRHI

Vazão_Max: valor máximo de vazão encontrada nas 22 UGRHI

Req_Tec: requisito de água da tecnologia

- *Áreas de preservação ambiental*

Para este critério independe o tipo de tecnologia que está sendo analisada. Consta da base de dados de municípios aqueles que são preservados, aos quais são atribuídos valores iguais a 0,0 (seção 4.1.5). Todos os demais têm valor igual a 1,0. Neste caso, o critério APAS já se encontra normalizado.

- *Níveis de poluição do ar*

➤ Da tecnologia TG-CC: a classificação em um dos cinco níveis de poluição para a TG-CC foi realizada através de análise em um conjunto de 30 tipos diferentes de tecnologias. No caso deste estudo o nível referente é 1 (baixa poluição, Tabela 9), pois o gás natural é um combustível praticamente isento de cinzas, e normalmente com baixos teores de enxofre, uma vez que a remoção do sulfeto de hidrogênio (H_2S) é parte do processamento usual do gás antes de sua comercialização. (PROMON-PSR, 1996).

➤ Dos municípios: o nível de poluição dos municípios foi obtido através do uso de dados indiretos classificados através de RNA-SOM (seção 4.1.6) e apresentados na Figura 15 no mapa classificatório para a área do Estado de São Paulo.

Normalização do critério nível de poluição do ar

A Tabela 9 fornece os valores normalizados de compatibilidade entre o nível 1 de poluição da tecnologia e os municípios já classificados.

Aplicação da técnica WLC (Weighted Linear Combination)

Como apresentado anteriormente, o processo de ordenação de alternativas do SIGTE (Figura 16) contempla os passos de definição de pesos e normalização dos critérios para a aplicação das técnicas de análise multicritério. A definição de pesos foi

apresentada na seção 4.2.1 e a Tabela 10 apresenta o resultado para três métodos, com o método *Rank Sum* escolhido para os testes.

A técnica WLC (Equação 34, pág. 63) é aplicada após a normalização dos critérios exemplificada para a tecnologia TG-CC e com a definição dos pesos para os critérios fatores a fim de se obter a ordenação das alternativas válidas (as inválidas foram excluídas pelos critérios do tipo exclusão: poluição e APAS).

A Tabela 29 apresenta os resultados para alguns dos 645 municípios da área do Estado de São Paulo depois de aplicada a técnica WLC para a instalação da tecnologia TG-CC.

Os locais mais aptos a receber a tecnologia TG-CC possuem valores de *scores* próximos de 1 de acordo com os pesos adotados. Como se pode observar na Tabela 29, a característica da técnica WLC de compensação entre os critérios foi mantida a fim de obter os *scores* e ordená-los em ordem decrescente.

No mapa temático apresentado na Figura 26, os *scores* relativos ao procedimento WLC para a tecnologia TG-CC foram agrupados em 6 classes para identificar os melhores locais para a implantação desta usina. Nesta classificação incluem-se as alternativas não válidas para a instalação de qualquer tecnologia, que são as APAS.

Tabela 29 – Dados representativos: localização da tecnologia TG-CC – WLC

ID	Município	CI (US\$/ MWh)	CO (US\$/ MWh)	CT (US\$/ MWh)	Valores Normalizados Escala 1 → 0 (Alternativa mais apta → menos apta)				Score Final
					Poluição	Custos	Água	APAS	
1	Itapirapuã Pta	10,38	26,93	-0,99	1,00	0,8947	1,0000	1	0,9649
2	Ribeira	10,16	27,25	-1,05	1,00	0,8871	1,0000	1	0,9624
3	Itaoca	10,15	27,33	-1,11	1,00	0,8792	1,0000	1	0,9598
4	Barra do Chapéu	10,48	27,06	-1,09	1,00	0,8556	1,0000	1	0,9519
5	Buri	10,39	26,94	-1,17	1,00	0,9363	0,5117	1	0,8793
6	Taquarivai	10,42	26,93	-1,16	1,00	0,9306	0,5117	1	0,8953
7	Guareí	10,43	26,94	-1,07	1,00	0,8967	0,5117	1	0,8840
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
554	Bebedouro	10,47	28,32	-1,19	0,40	0,5266	0,0903	1	0,1562
555	Barretos	10,46	28,83	-1,18	0,40	0,3797	0,0903	1	0,1366
556	Jumirim	10,40	27,11	-1,14	1,00	0,8780	0,0970	0	0,0000
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
645	Barra do Turvo	10,15	27,80	-0,97	0,90	0,7028	1,000	0	0,0000

Figura 26 – Mapa das alternativas ordenadas para a tecnologia TG-CC - WLC

Nas quatro primeiras linhas da Tabela 29 estão selecionados os municípios com características de poluição, APAS e água com valores iguais a um, considerados ótimos (baixo nível de poluição, não há APAS e grande quantidade de água disponível no município). O que difere para estes municípios são os valores dos custos agrupados e normalizados (custos de investimento + operação + transmissão). Nas 3 linhas subsequentes a compensação entre os critérios é bastante clara, devendo-se ao fato das vazões de água disponíveis nos municípios serem menores, mas os custos possuírem scores altos (custos baixos). Pode-se verificar também que os municípios selecionados na 1ª. classificação do mapa da Figura 26 estão próximos da linha do gasoduto, ressaltando a influência do custo de operação para esta tecnologia.

Um outro teste foi realizado considerando somente os critérios de avaliação econômica do projeto para a instalação da tecnologia TG-CC. Os critérios de avaliação ambiental (poluição, água e APAS) não foram associados, justamente para se observar a seleção dos municípios sem a interferência destes. Também não foi adotado nenhum peso para os custos. Da Equação 35 (pág. 75) tem-se a normalização dos custos para este teste:

$$\mu = \frac{(\text{Custo_Total_Max}) - (\text{Custo_Total})}{(\text{Custo_Total_Max}) - (\text{Custo_Total_Min})}$$

Onde:

Custo_Total_Min = 35,95 US\$/MWh (referente ao município de Cubatão, 1ª linha da Tabela 30).

Custo_Total_Max = 39,43 US\$/MWh (referente ao município de Rifaína, última linha da Tabela 30).

Custo_Total = CI + CO + CT de cada município (coluna Custo Total da Tabela 30).

É possível observar, pelos dados da Tabela 30, a influência da altitude e da temperatura no custo de investimento da tecnologia TG-CC e o distanciamento da linha do gasoduto provocando alterações no custo de operação da usina. O benefício do custo de transmissão também agrega ao custo total sua parcela de contribuição, provocado pela distância do CG à LT de 138 kV.

Tabela 30 – Dados de custos (CI, CO e CT) da tecnologia TG-CC

ID	Município	Alt (m)	Temp (°C)	CI (US\$/MWh)	Dist. Gas. (km)	CO (US\$/MWh)	CT (US\$/MWh)	Custo Total (US\$/MWh)	Custo Normalizado
1	Cubatão	10	22,79	10,1094	9,52	27,0239	-1,1825	35,9508	1,0000
2	São Vicente	10	22,75	10,1074	9,52	27,0228	-1,1764	35,9539	0,9991
3	Praia Grande	5	22,75	10,1039	6,67	27,0228	-1,1644	35,9624	0,9967
4	Santos	10	22,75	10,1075	14,99	27,1798	-1,1990	36,0883	0,9606
5	Mongaguá	10	22,66	10,1039	17,92	27,1798	-1,1767	36,1049	0,9558
6	Laranjal Pta	535	20,33	10,3887	7,90	26,9655	-1,1966	36,1576	0,9407
7	Rafard	520	20,44	10,3820	5,38	26,9681	-1,1901	36,1601	0,9400
8	Capivari	540	20,34	10,3928	4,28	26,9657	-1,1984	36,1601	0,9399
9	Tietê	500	20,49	10,3692	4,99	26,9694	-1,1769	36,1618	0,9395
10	Mombuca	540	20,38	10,3947	4,55	26,9667	-1,1983	36,1631	0,9391
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
643	Pedregulho	1040	19,29	10,7445	199,53	29,5039	-0,9907	39,2577	0,0510
644	Igarapava	570	22,16	10,4931	214,31	29,8606	-0,9834	39,3703	0,0187
645	Rifaína	575	22,10	10,4945	219,85	29,8591	-0,9181	39,4355	0,0000

No mapa da Figura 27 é possível observar a seleção dos municípios mais aptos a receber a tecnologia TG-CC bem próximos à trajetória da linha do gasoduto, afastando-se gradativamente nas 5 classes adotadas. Este comportamento deve-se à parcela referente ao custo de operação na definição do custo total normalizado, o qual é diretamente influenciado pela distância do CG ao gasoduto e seu respectivo custo de construção do ramal.

No mapa da Figura 27 também não foram excluídas as APAS pertencentes ao Estado de São Paulo, justamente para não alterar o resultado da análise de custos proposta para este teste.

Figura 27 – Mapa das alternativas ordenadas pelo custo total: tecnologia TG-CC

Outros testes com alteração dos pesos foram realizados a fim de verificar a consistência do modelo. Os resultados obtidos estão diretamente relacionados com o método de decisão multicritério adotado, o WLC, que provoca a compensação entre os critérios.

6 – Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo principal desenvolver uma metodologia e propor um modelo para apoiar as decisões sobre localização de UTEs, integrando as funcionalidades das ferramentas SIGs e os métodos de análise multicritério. Este modelo, designado por SIGTE, fornece análises globais, para uma determinada área, dos melhores locais para a instalação de uma tecnologia pré-selecionada. No caso estudado, a área determinada é um estado e os locais são caracterizados pelos municípios pertencentes a este estado. A análise de viabilidade realizada dentro de cada município, no entanto, inclui outros tipos de variáveis e não é contemplada no SIGTE.

Uma das características fundamentais deste modelo é a de permitir a aplicação para qualquer área ou região, bastando para isso que se faça a devida substituição e atualização dos bancos de dados utilizados. Também foi relevante a incorporação de ferramentas, formulações e premissas para suprir a indisponibilidade de dados obtidos de forma direta, fazendo uso de dados indiretos e normalmente disponíveis em órgãos administrativos. Este fato proporciona uma flexibilidade de utilização do modelo em diversas áreas e foi comprovado nos estudos de casos propostos para a área do Estado de São Paulo, onde muitos dados eram disponibilizados somente para um pequeno número dos seus 645 municípios, isto apesar do grau de desenvolvimento deste estado relativamente maior do que aquele observado nos demais estados do Brasil.

O SIGTE é composto por duas fases: a de geração e a de ordenação das alternativas (Figura 6, pág 21). A primeira contempla o estabelecimento de critérios e a forma como serão abordados no modelo (Figura 7, pág. 22). Neste processo se definem quais são e como serão abordados os critérios de avaliação econômica e os de avaliação ambiental. Nesta fase é intenso o uso de SIG para o tratamento e análise de variáveis espaciais. A outra fase é a de ordenação das alternativas (Figura 16, pág. 58), na qual dois métodos de análise multicritério são aplicados para selecionar (ordenando) os locais com potencial para a instalação da UTE. Nesta fase incluem-se

os processos de normalização dos critérios e a atribuição dos pesos para a ordenação.

Um ponto importante para o sucesso do modelo aqui proposto foi a escolha do tipo de SIG a ser utilizado, com referência à sua abordagem, e também a escolha de um dos SIGs disponíveis no mercado que se adaptasse ao problema. Quanto à sua abordagem, os SIGs podem ser classificados em raster (ou matricial) e vetorial (diferenciados no capítulo 3). Normalmente estes softwares possuem licenças de alto custo e aqueles que são de distribuição gratuitas não contemplam todas as ferramentas necessárias para o modelo proposto. Em uma das disciplinas ministradas no Departamento de Transportes da EESC-USP, em São Carlos, foi obtido como referência o software Transcad, que é um SIG específico para transportes e adequado ao estudo proposto, por permitir a avaliação de aspectos relativos ao transporte de combustíveis, bem como o da energia elétrica gerada. É do tipo vetorial e permite que as entidades sejam representadas por suas formas características, em um modelo de dados espaciais que se aproxima bastante da realidade. No caso deste estudo foi utilizada uma versão acadêmica do software para o desenvolvimento do modelo.

A componente espacial a ser adotada para a representação geográfica na área teve que passar por um estudo visando a sua determinação, cujo passo inicial deu-se através do LITOM, no qual a área do Estado de São Paulo é dividida em 416 células. Esta representação tinha algumas limitações quanto à representação dos dados e o SIG a ser adotado passaria a ser do tipo raster e não do tipo vetorial, caso do Transcad. Assim, com a disponibilidade de dados geograficamente referenciados contendo os limites administrativos de todos os municípios, esta componente foi incorporada como uma das camadas do SIGTE. No entanto, dentro de cada município tinha que ser escolhido um ponto de referência para cálculo de distâncias e para aplicação de outras ferramentas de cálculo do SIG. Adotou-se, para a solução deste problema, o centro geográfico (CG) de cada município, baseado em informações cedidas pelo IBGE e com dados disponíveis para todos os municípios do Brasil.

Uma importante consideração a ser feita é isto não implica que a UTE será construída no CG do município, já que este se refere a sua área urbana. Neste caso, a definição do local para a UTE teria que ser realizada complementarmente, através de um estudo de viabilidade dentro da área do município que foi selecionado como melhor alternativa pelo SIGTE. Por este motivo, uma distância de análise de 10 km, ou seja, a UTE seria construída num raio de 10 km a partir do CG, foi adotada para alguns cálculos como forma de amenizar o problema acima citado.

O processo de estabelecimento dos critérios que seriam contemplados pelo SIGTE foi caracterizado pela premissa de que só seriam inseridos aqueles que

pudessem ter seus valores representados e atualizados nos bancos de dados para a área utilizada nos testes. A princípio, muitos critérios foram sugeridos e tinham a possibilidade de serem incorporados ao SIGTE. Após uma série de estudos e pesquisas concluiu-se, no entanto, que só seriam incluídos como atributos da base de dados de municípios, mas muitos destes registros permaneceriam em branco. Como esta também é uma das características que se procurou observar no processo de concepção do SIGTE, o fato de terem sido abandonados critérios sem a devida representação não impede que novos critérios sejam futuramente incorporados ao modelo, mediante a disponibilidade de seus dados, ou quando uma forma de caracterizá-los através do uso de dados indiretos seja proposta.

Os critérios adotados inicialmente no SIGTE foram classificados em: critérios de avaliação econômica e ambiental. Do primeiro grupo constam: a tecnologia selecionada, suas características técnicas e o custo de investimento relacionado; o transporte de insumos para a operação da usina, com o custo de transporte, custo de construção de ramais e o próprio custo de operação da usina, além do custo de transmissão da energia elétrica gerada na usina transportada através das LTs, com seus custos de conexão relacionados. Os critérios de avaliação ambiental incluem: o nível de poluição do ar, a disponibilidade de água e as áreas de preservação ambiental. Depois de definidos os critérios a serem adotados, um outro passo foi a classificação dos critérios como fator e exclusão. Alguns, como as APAS, são de fácil interpretação, mas para alguns dos outros foram realizados e analisados muitos testes para se chegar a uma definição. Cada um dos critérios e suas peculiaridades serão abordados na seqüência.

O processo no SIGTE inicia-se pela escolha da tecnologia, e conseqüentemente dos combustíveis que podem ser utilizados. A partir daí define-se o meio de transporte para levar este combustível da origem ao destino escolhendo-se, na seqüência, os demais critérios a serem considerados. Este tipo de procedimento foi adotado porque ainda não foi possível obter uma interface gráfica para o SIGTE, na qual o usuário pudesse escolher a tecnologia e/ou o combustível e/ou o município. Neste sentido, uma das propostas de desenvolvimento futuro é exatamente integrar o modelo SIGTE a uma linguagem de programação para criar outros tipos de procedimentos, para o início do processo, tal como é realizado no LITOM.

A variável tecnologia foi utilizada tomando-se como base o banco de tecnologias do LITOM. Os estudos de casos foram realizados com duas tecnologias, uma operando em ciclo simples e com combustível transportado pelas ferrovias (TC-OCP) e a outra operando em ciclo combinado, com combustível transportado pelo gasoduto (TG-CC). Neste contexto, propôs-se analisar as diferenças do tipo de ciclo

adotado para cada tecnologia, com suas implicações, e também testar a componente relativa aos dois diferentes meios de transporte do combustível.

Selecionada a tecnologia é possível calcular o custo de investimento (CI) para a composição da avaliação econômica do problema e caracterizá-lo como um critério fator na abordagem multicritério, pois este aumentará ou diminuirá a aptidão do local conforme o valor de CI diminui ou aumenta, respectivamente. Em testes realizados com tecnologias que operam em ciclo simples, o CI é calculado e o mesmo valor atribuído para todos os municípios da área sob análise. Para tecnologias que operam em ciclo combinado, o cálculo do CI depende da altitude e temperatura locais, porque nestes casos isto influi em uma característica específica do uso de turbinas a gás, as quais podem perder eficiência em função da variação destes fatores. Neste caso, a dificuldade foi encontrar dados de temperatura média para os 645 municípios do Estado de São Paulo. Para alguns municípios este dado consta do anuário fornecido pelo SEADE, mas não para todos. Para solucionar este problema, uma formulação auxiliar, a partir de dados indiretos, foi utilizada (apresentada na Equação 6, seção 4.1.1), baseada na altitude e latitude destes locais.

No início dos estudos propostos, a variável transporte foi inserida no modelo como um critério de exclusão, devido a ausência de uma formulação para incorporar os custos de construção de ramais ao problema. No decorrer dos estudos verificou-se a importância de tratar esta variável espacial como um critério fator e considerar algumas das peculiaridades de cada um dos setores: ferroviário, rodoviário e de concessão do gasoduto.

Para as ferrovias, o ponto de partida foi uma base de linhas cedida pelo Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, atualizadas com dados provenientes de pesquisas com as empresas do setor, que forneceram mapas em papel. Além da verificação da conectividade da base foram inseridos os pátios referentes aos locais de carga/descarga nas ferrovias. Estes pátios foram utilizados em testes iniciais quando a variável de transporte era classificada como do tipo exclusão. Quando concluiu-se que esta deveria ser do tipo fator, com a inclusão dos custos de construção de ramais, observou-se que não seria mais necessária a criação de pontos representando os pátios, bastando o cálculo da distância do CG dos municípios à ferrovia.

O custo de operação de usinas que têm o transporte do combustível realizado pelas ferrovias (caso de TC-OCP, apresentado no capítulo 5) inclui um custo de transporte em ferrovias existentes mais um custo da construção de ramais, quando necessário. Para efetuar estes cálculos várias ferramentas do SIG tiveram que ser utilizadas, a fim de criar nós virtuais nas linhas para representar e calcular a distância

de transporte em linhas existentes e a distância de construção dos novos ramais. No teste da TC-OCP, que tem como ponto de distribuição do combustível óleo pesado o município de Paulínia, a distância total será dada pela distância percorrida em ferrovias existentes mais a distância de construção de ramais, onde houver necessidade.

Para as rodovias, o ponto de partida também foi uma base de dados cedida pelo Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, atualizada através de mapas em formato digital e em papel obtidos junto ao DER. No entanto, como as rodovias são representadas por uma malha muito densa de arcos e nós, a verificação da sua conectividade não chegou a ser completada para o uso no SIGTE. Por este motivo, o transporte multimodal que poderia ser incluído nas análises entre as ferrovias e rodovias não foi realizado.

No caso do gasoduto o mapa foi atualizado a partir de uma figura em formato digital cedida pela TBG, transposta para o SIG para a obtenção de suas coordenadas geográficas. Em testes iniciais, o custo de operação calculado para a tecnologia TG-CC, na qual o transporte do gás natural é realizado pelo gasoduto, considerava três pontos de distribuição do gás, os chamados *city-gates*, como no LITOM. Tinha-se assim um custo de transporte e CGs que se distanciassem mais de 75 km do gasoduto eram alternativas inválidas no processo de geração. Nos testes finais utilizou-se a premissa de que qualquer ponto do gasoduto pode ser considerado como *city-gate* e a distância de conexão com o gasoduto é considerada no custo de construção do ramal, não excluindo nenhuma alternativa do conjunto de possíveis localizações. No caso do LITOM existe uma tabela de construção de ramais até 200 km de distância do gasoduto, com casos acima desta distância não considerados como alternativas válidas. No SIGTE, a mesma tabela do LITOM foi utilizada, já que esta foi gerada por uma ferramenta que considera a vazão do combustível, o diâmetro da tubulação e a distância a ser construída, fornecendo dados consistentes para a construção de ramais. Pelos cálculos de distância dos CGs ao gasoduto, realizados nas bases de dados georeferenciadas no SIG, constatou-se que apenas 7 municípios distam mais de 200 km. Por este motivo, foram incluídas mais algumas faixas para a tabela fornecida. Assim, todos os municípios foram considerados como alternativas válidas para a tecnologia TG-CC.

No SIGTE os cálculos de roteirização do menor caminho para o transporte são realizados por rotinas próprias do Transcad. No LITOM os cálculos são realizados em um módulo auxiliar de transporte e os resultados são exportados para tabelas do Excel e o software as utiliza.

Outro critério do tipo fator incluído na avaliação econômica do problema pelo SIGTE é referente às linhas de transmissão. Estas possuem praticamente os mesmos procedimentos que os adotados para as bases de linhas relativas aos transportes. As distâncias mínimas do CG às LTs de diferentes tensões são utilizadas para o cálculo do custo de conexão e depois para o custo de transmissão (CT). As bases iniciais foram importadas de mapas elaborados em Autocad, cedidos pela CESP, e as atualizações e verificação de conectividades realizadas posteriormente no SIG.

Um comentário a ser feito é que na formulação do CT foram incluídos os encargos de transmissão, atualização também feita no LITOM para o teste realizado para a Bacia do rio Piracicaba, de acordo com as novas normas do setor elétrico. No SIGTE, para os testes finais, não foram incluídos os valores destes encargos, pois teria que ser rodado um programa nodal para atualização dos dados, ficando como recomendação para um futuro desenvolvimento a ser incluído no SIGTE.

A variável que caracteriza a disponibilidade de água nos municípios foi tratada no SIGTE como um critério do tipo fator. Foi assim considerado porque os métodos de resfriamento das turbinas podem ser substituídos (alterando o custo de instalação) e modificando a quantidade de água utilizada, caso as vazões encontradas nos locais não sejam suficientes. Os dados utilizados no SIGTE referem-se às 22 UGRHI do Estado de São Paulo. Não são os melhores dados que se pode obter, mas isto reflete a ausência de dados para os 645 municípios, fato atestado por empresas do próprio setor. Alguns outros métodos citados no capítulo 4 podem ser utilizados para se ter uma previsão da vazão em cada município, mesmo que sejam utilizados dados indiretos para estimar os valores. Uma sugestão dada recentemente foi a de transformar a variável água em critério do tipo fator e também exclusão (caso da poluição), para não permitir a seleção de municípios com compatibilidade igual a zero. Esta sugestão será estudada e testada para posterior alteração do SIGTE.

As APAS são consideradas no SIGTE como critério do tipo exclusão. Neste estudo as APAs não estão sendo classificadas quanto ao seu tipo ou tamanho, o que poderia levar a identificação de seu grau de importância. Estes dados podem ser incluídos em futuros desenvolvimentos do trabalho, como forma de aprimorar o estudo sobre as APAS.

A variável para a determinação do nível de poluição do ar nos municípios gerou muitas pesquisas e alguns conflitos em sua definição, por se tratar de um tópico bastante polêmico e muito importante na localização de uma UTE. Pela indisponibilidade de dados citada na seção 4.1.6, a ferramenta auxiliar de estimativa do nível de poluição do ar, utilizando dados indiretos de consumo de combustíveis provenientes de fontes móveis e estacionárias com técnicas de RNA, foi uma forma de

resolver o problema e ter um parâmetro de comparação na aplicação do modelo. É fato que muitos outros poluentes podem ser incorporados e também outros algoritmos de redes neurais testados, mas o método apresentado pode ser considerado como um ponto de partida para a obtenção destes dados. No LITOM há atributos específicos para caracterizar o nível de poluição dos municípios, mas não há como alimentar todo o banco de dados, já que o próprio órgão de fiscalização ambiental no Estado de São Paulo não possui os dados para todos os municípios.

A classificação deste critério tem uma distinção a ser feita. É considerado um critério do tipo fator e é incluído com um peso pré-estabelecido na decisão multicritério, mas também é classificado como um critério do tipo exclusão para os casos em que o nível de poluição do ar recebe o valor zero na tabela de normalização, caracterizando um alto nível de poluição. Assim, nestes municípios, a instalação da UTE não deve ser considerada.

Após a fase de geração das alternativas no SIGTE é possível passar para a fase de ordenação. Neste processo, incluem-se os procedimentos de normalização, que foram descritos no capítulo 4 e exemplificados no capítulo 5 para os critérios do SIGTE. Inclui-se aí a definição de pesos dos critérios e os métodos de análise multicritério. Um ponto muito importante e que costuma ser objeto de discussão é a definição dos pesos. Nos estudos realizados foi definido como critério fator de maior relevância, para o processo de localização da UTE, o aspecto ambiental, ou seja, a poluição, a qual foi colocado como primeiro critério no ranking. Este processo, apesar de sua simplicidade, foi utilizado porque a preocupação não era que peso atribuir aos critérios, visto que estes pesos podem ser modificados a cada análise realizada, mas sim a modelagem do método e a possibilidade de se testar alguns métodos de análise multicritério em sua concepção. Outros métodos de definição de pesos podem ser incluídos com mais sofisticação como o método de análise hierárquica, sem prejuízo para o modelo.

Com o maior peso atribuído ao critério nível de poluição, os testes realizados com as duas tecnologias TC-OCP e TG-CC apresentaram algumas respostas semelhantes em sua localização. Para outros testes pode-se modificar estes pesos, priorizando os custos e obter outros resultados.

No teste apresentado para a tecnologia TC-OCP (Figura 19, pág. 80), considerando os critérios de avaliação econômica e os critérios de avaliação ambiental apresentados na Figura 7 (pág. 22), com a técnica WLC e com os pesos adotados e comentados na seção 4.2.1, pode-se observar a compensação entre os critérios. A solução apresentada para os 9 municípios (1ª. classificação utilizada no mapa) possuem nível de poluição baixo (com valores iguais a um e priorizados pelo peso

deste critério, igual a 0,5) e também alta disponibilidade de água para os três primeiros municípios listados na Tabela 17 (pág. 79). Outros testes de análise de risco foram realizados para esta tecnologia para a visualização de diferentes cenários. Porém, como os critérios ambientais possuem maior peso (variável poluição) e o outro, menor peso (variável água), as análises de risco mínimo e máximo ficaram restritas a estes critérios.

Para a tecnologia TG-CC foram utilizados os mesmos parâmetros da técnica WLC com os mesmos pesos. No entanto, o custo de operação teve uma participação muito significativa na normalização do critério custo, selecionando como melhores opções de instalação deste tipo de usina locais próximos ao gasoduto. Neste caso a temperatura e a altitude do local influenciam a potência da usina, provocando variações no custo de investimento. O resultado gráfico foi apresentado no mapa da Figura 26 (pág. 105) e alguns dados relativos ao procedimento apresentados na Tabela 29 (pág. 104). Optou-se, para esta tecnologia, apresentar um teste considerando somente os critérios de avaliação econômica (custo de investimento, custo de operação e custo de transmissão) a fim de avaliar o desempenho do modelo para uma situação conhecida, ou seja, as melhores soluções estão muito próximas ao gasoduto e à medida que os municípios se distanciam deste, aumentam seu custo (Figura 27, pág. 107). Apesar do comportamento do modelo, esta é uma situação irreal porque não considera os critérios de avaliação ambiental.

Coloca-se como consideração final todo o processo de aprendizado obtido durante o desenvolvimento deste trabalho, pela diversificação dos temas abordados em cada critério e estes pertencentes a diferentes setores. Após a abordagem discutida para o modelo SIGTE, um desenvolvimento considerado como consequência deste trabalho seria a interface programada para a integração do usuário com o modelo SIGTE, incluindo todas as análises realizadas no SIG e os métodos de decisão multicritério.

Concluindo este trabalho, pode-se listar suas efetivas contribuições, as quais resumidas abaixo foram detalhadas nos capítulos que compõem esta tese:

- Criar um modelo utilizando SIG para a localização de UTEs
- Abordagem multicritério para o problema
- Área analisada: município
- Inclusão de atributos com a devida representação
- Indisponibilidade de dados: uso de ferramentas, formulações e premissas
- No transporte: inclusão de construção de ramais
- Aplicação em qualquer sistema ou região que tenham dados georeferenciados disponíveis para alimentar os bancos de dados.

7 - Referências

AES-Bariri (2001). *Relatório Ambiental Preliminar – RAP IPôsters/*.

ANEEL (2001). *Informações do Setor Elétrico – Cadastro de Agentes*.
<http://www.aneel.gov.br>. Acesso: nov/2001.

APAS (2004). *Áreas de Proteção Ambiental do Estado de São Paulo*.
<http://www.ambiente.sp.gov.br/apas/aps.htm>. Acesso: jan/2004.

ARNOLD, J. (2002). *Building a power plant? Start with a good map!*

BARCELLOS, C.; BASTOS, F. I. (1996). *Geoprocessamento, Ambiente e Saúde: Uma União Possível?*. Caderno de Saúde Pública - Rio de Janeiro, volume 12, n. 3.

BCDAEE (2000). *Banco de Dados Fluviométricos, Pluviométricos e Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo*. Versão 1.0. Desenvolvido pela FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (convênio DAEE – USP).

BIAS, E. S. (1998). *Técnicas de Geoprocessamento: sua Aplicação como Suporte à Análise, Planejamento e Implantação de Redes Elétricas*. Rio Claro. 161p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.

BIRKIN, M.; CLARKE, G.; CLARKE M.; WILSON, A. (1996). *Intelligent GIS – Location Decisions and Strategic Planning*. New York, John Wiley.

BRAGA, A. P.; LUDERMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. (2000). *Redes Neurais Artificiais – Teoria e Aplicações*. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

CALIPER (1996). *TRANSCAD Transportation GIS Software*. User's Guide. Version 3.0 for Windows. Caliper Corporation, Newton, Massachusetts, EUA.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. (2001). *Geoprocessamento: Teoria e Aplicações*. Livro On-line em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>. Acesso: nov/2001.

CETESB (2001). *Informações Ambientais - Qualidade do Ar*. <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso: jul/2001.

CONSEMA (1999). *Complementação da Resolução SMA 42/94 Sobre Licenciamento Ambiental*. http://www.ambiente.sp.gov.br/licenciamento/procedimento/consema08_99.doc. Acesso: jul/2001.

CORDOVIL, S. A. F. (2001). *Desenvolvimento de um Algoritmo para o Traçado do Divisor de Águas de uma Bacia Hidrográfica em Programas que Utilizam Sistemas de Informações Geográficas*. São Carlos. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

DELANEY, K., LACHAPELLE, A. (2003). *A GIS Approach to Siting a Coal-Fired Power Plant in Franklin County, Illinois*. Geography of Guelph.

EASTMAN, J. R. (1997). *IDRISI for Windows: User's Guide. Version 2.0*. Clark University – Graduate School of Geography, Worcester, MA, USA.

EASTMAN, J. R., JIANG, H., TOLEDANO, J. (1998). *Multi-criteria and Multi-Objective Decision Making for Land Allocation Using GIS*. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands).

EASTON, A. (1973). *Complex Managerial Decision Involving Multiple Objectives*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

ELETROBRÁS (2000). *Plano Decenal de Expansão 2000/2009*. ELETROBRÁS Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Ministério de Minas e Energia.

EPRI (1993). *EPRI TR - 102276 - V1R7 - Technical Assessment Guide - Electricity Supply*. Nonutility/Nonmember Edition. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California. Vol. 1, Rev. 7, June 1993.

EWART, G. M. (1994). *Integrating Geographic Information Systems and Multicriteria Decision Making to Develop a Prototype Decision Support System for Health Professionals*. PhD Dissertation, University of Idaho, Moscow, ID, USA.

FADIGAS, E. A. F. A. (1997). *Identificação de Locais e Opções Tecnológicas para Implantação de Termoelétricas no Sistema Elétrico Brasileiro: Contribuição à Metodologia e Aplicação ao Caso do Gás Natural*. São Paulo. 267p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FORTUNATO, L. A. M.; NETO, T. A. A.; ALBUQUERQUE, J. C. R.; PEREIRA, M. V. F. (1990). *Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*. Niterói, Editora Universidade Federal Fluminense. Cap. 3, p. 91- 98. Cap. 4, p. 103 – 130.

GEIPOT (2003). *Sistema de Informações Técnicas em Transportes - Anuário Estatístico dos Transportes*. <http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.html>. Acesso: jul/200.

GOLDEMBERG, J. (1995), *"Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento"*, EDUSP, 234 p.

JANKOWSKI, P., EWART, G. (1996). *Spatial Decision Support System for Health Practitioners: Selecting a Location for Rural Health Practice*, *Geographical Systems*, 3 (2), pp. 279-299.

JARDINI, J. A. (1997). *Automação da Distribuição de Energia Elétrica Assistida por Sistemas de Informação Cartográfica*. In: IV Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. *Anais*. São Paulo. p. 423- 432.

KAO, J. J.; LIN, H.; CHEN, W. (1997). *Network Geographic System for Landfill Siting, Waste Management and Research*, 15, pp. 239-253.

KILMER, K. A.; ANANDALINGAM, G.; HUBER, J. (2001). *The Efficiency of Political Mechanisms for Siting Nuisance Facilities: Are Opponents More Likely to Participate than Supporters?*, *Journal of Real-Estate Finance and Economics*, 22 (2/3) pp. 141-161.

LIAZI, A.; CONEJO, J. G. L.; PALOS, J. C. F.; CINTRA, P. S. (1988). *Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo*. Assessoria de Recursos Hídricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica. Revista Águas e Energia Elétrica. ano 5. n. 14. p. 4-10.

MALCZEWSKI, J. (1999). *Gis and Multicriteria Decision Analysis*, New York: Wiley.

MARQUES, A. L.; STALCHMIDT, A.; CORRÊA, G. C.; FIGUEIREDO, H., (1996). *Sistema de Mapeamento, Cadastramento e de Geoprocessamento Aplicado à Distribuição da COPEL*. In: GIS BRASIL 96 e II Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento. Anais. Curitiba - PR. p.142-151.

MASCARÓ, J. L. (1977) - coord. *Estudo dos Custos de Infra-estrutura em Cidades de Porte Médio*, São Paulo, FAU, 1977-1979. 5v. [59, 62, 64].

MENDES, J. F. G.; SILVA, J.; RAMETTA, F.; GIORDANO, S. (1999). *Mapping Urban Quality of Life in Portugal: a GIS Approach*. In: Bento, J.; Arantes e Oliveira, E.; Pereira, E. (eds.) *Proceedings of the EPMESC VII: Computational Methods in Enginnering and Science*, vol. 2, p. 1107-1115. Elsevier, Macao.

MOUSSEAU, V. (1997). *Compensatoriness of Preferences in Matching and Choice*. Foundations of Computing and Decision Sciences, v. 22. n.1, pp. 3-19.

MUSSONE, L.; SALA, G.(2001). *A Method to Evaluate Vehicular Accident Probability by Using Self Organizing Maps*. In: CUPUM – 7th International Computers in Urban Planning and Urban Management Conference. Anais em CD-ROM. University of Hawaii at Manoa Honolulu, Hawaii, USA.

NEGRI, J. C. (2001). *Avaliação da Capacidade de Suporte para Implantação de Usinas Termoelétricas (UTE's)*, In: XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Grupo – Estudo de Impactos Ambientais. Anais em CD-ROM. Campinas – SP.

NETO, A. J. S.; NEGRI, J. C.; PEREIRA, M/ V. F.; VIEIRA, S. (1997), *“Modelo de Análise para Seleção de Usinas Termoelétricas – SAEGET”*, Anais em CD-ROM do XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo – Planejamento de Sistemas Elétricos, Belém.

NEURALWARE (1998). *NeuralWorks Professional II/Plus*. Reference Guide. Aspen Technology, Pittsburgh, PA.

ONS (2000). *Relatório Técnico: Dados Relevantes de 1999 – Operação do Sistema Interligado Nacional*. Rio de Janeiro.

OSGOOD, C. E.; SUCI, G. J.; TANNENBAUM, P. H. (1957). *The Measurement of Meaning*. University of Illinois Press, Urbana, IL, USA.

PETROBRAS (2001). *Especificações de Produtos*. <http://www.petrobras.com.br>. Acesso: jul/2001.

PINTO, H. S., ORTOLANI, A. A., ALFONSI, R. R. (1972). *Estimativa das Temperaturas Médias Mensais e Anuais do Estado de São Paulo em Função da Altitude e Latitude*. Caderno de Ciência da Terra 23, Instituto de Geociências - USP, 22 p.

PPT (2000). *Programa Prioritário de Termoeletricidade*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D3371.html. Acesso: set/2001.

PROMON-PSR (1996). *Modelo de Localização Integrada de Térmicas com Objetivos Múltiplos – Descrição Geral e Estudos de Caso*. Manual do Usuário, 90 p.

PÜTTGEN, H. B., MACGREGOR, P. R., LAMBERT, F. C. (2003). *Distributed Generation: Semantic Hype or the Dawn of a New Era?*. IEEE Power & Energy Magazine, Jan/Feb 2003, 1 (1), pp. 22-29.

RAIA, A. A. J.; SILVA, A. N. R. (1998), *Um método expedito para verificação da consistência de redes para uso em um SIG-T*. In: 12º. Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. Anais. Fortaleza. ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. v. II, p. 10-17.

RODRIGUEZ, G. M. (2001). *Panorama do Setor de Energia Elétrica*. <http://www.gasnet.com.br/artigos>. Acesso: dez/2001.

RAMOS, R. A. R. (2000). *Localização Industrial – Um Modelo Espacial para o Noroeste de Portugal*. Braga – Portugal. 299p. Tese (Doutorado), Universidade do Minho.

RHIND, D. W. (1989), *Why GIS?* ARC/News, v. 11, n. 3.

RE-SEB (1996). *Relatórios do Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro*. <http://www.eletrobras.gov.br/planejamento>. Acesso: set/2001.

SAATY, T. L. (1977). *A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures*. Journal of Mathematical Psychology, v. 15, n. 3, p. 234-281.

SANTOS, C. C.; PEREIRA FILHO, A. J. (2000), *An artificial neural network hydrologic model for urban watersheds*. In: Conference on Hydrology. Long Beach, California. – American Meteorological Society.

SEADE (2001). *Relatórios do Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro*. <http://www.seade.gov.br>. Acesso: set/2001.

SIGRH (2001). *Relatórios de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo*. <http://www.sigrh.sp.gov.br/planejamento>. Acesso: nov/2001.

SILVA, A. N. R. (1993). *O Custo do Solo Urbano Ocioso e uma Nova Sistemática de Tributação da Propriedade*. São Carlos. 137p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.

SILVA, A. N. R.; WAERDEN, P. V. D. (1997). *First Steps with a Geographic Information System for Transportation*. Ribeirão Preto, São Francisco Editora.

STAR, J; ESTES, J. (1991). *Geographic Information Systems: An Introduction*. New Jersey, Englewood Cliffs.

STILLWELL, W. G.; SEAVER, D. A.; EDWARDS, W. (1981). *A Comparison of Weight Approximation Techniques in Multiattribute Utility Decision Making*. Organization Behavior and Human Performance, v. 28, n.1, p. 62-77.

VIEIRA FILHO, X.; MELO, A. C. G.; MACEIRA, M. E. P.; MESQUITA, E. N.; PINHEL, A. C. C.; OLIVEIRA, A. M.; GOMES, L. L.; CALDAS, R. P. (2001). *Gas Thermal Plants in Hydro-Dominated Systems: Assessment of the Optimum PPA Contracts Level*. Anais Gas and Electricity Networks: Complementarity or Competition?, Cigré Symposium, Foz do Iguaçu – PR.

VINCKE, P. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. Ed. John Wiley & Sons, Inc.

VON WINTERFELDT, D.; EDWARDS W. (1986). *Decision Analysis and Behavioural Research*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

VOOGD, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. London: Pion Ltd.

WEBER, M. A. A. (1995). *Aspectos da Implementação de Projetos AM/FM Baseados em Sistemas de Informações Geográficas para Redes de Distribuição de Energia*. São Paulo, 123p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

YAGER, R. R. (1988). *On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision Making*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v.8, n.1, p. 183-190.

ZADEH, L. A. (1965). *Fuzzy Sets*. Information and Control, v. 8, p. 338-353.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. (2000), *"Geoprocessamento Aplicado à Análise da Expansão de Geração Termoelétrica"*, Anais em CD-ROM do 4º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – COBRAC, Florianópolis - SC.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. (2001), *"Uma Análise de um SIG-T do Impacto do Transporte na Avaliação de Alternativas de Geração Termoelétrica"*, Anais em CD-ROM do GIS BRASIL 2001, Curitiba - PR.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. (2002), *"Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica para a Localização de Usinas Termoelétricas"*, Anais em CD-ROM do CBA 2002, Natal - RN.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. (2003a), *"Ferramenta de Apoio à Decisão na Localização de Usinas Termoelétricas Utilizando SIG"*, Anais em CD-ROM do XVII SNPTEE, Uberlândia - MG.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C.; OLESKOWSK, M. (2003b), *"Utilização de Redes Neurais para a Estimativa do Nível de Poluição em Processos de Localização de Usinas Termoelétricas"*, Anais em CD-ROM do 6º. SBAI, Bauru - SP.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. (2003c), *"Ferramentas para Localização de Usinas Termoelétricas: uma Análise Comparativa"*, Anais em CD-ROM do V CLAGTEE, São Pedro - SP.