

HERON FONTANA

**Logística Operacional – Alocação de bases operacionais
em distribuição de energia elétrica**

São Paulo

2015

HERON FONTANA

**Logística Operacional – Alocação de bases operacionais
em distribuição de energia elétrica**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:

Sistemas de Potência

Orientador:

Professor Dr. Nelson Kagan

São Paulo

2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 13 de Julho de 2015.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catologação-na-publicação

Fontana, Heron

Logística operacional: alocação de bases operacionais em distribuição de energia elétrica / H. Fontana -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

148 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Distribuição de energia elétrica 2.Sistemas elétricos 3.Energia elétrica (Qualidade) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Dedico este trabalho à minha mãe, Ana Maria Fontana.

Agradecimentos

Agradeço aos amigos da ELEKTRO que colaboraram no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço especialmente à equipe do Projeto Logística Operacional, em ordem alfabética: André Sekiya, Carlos Choqueta, Carlos Henrique Silva, Eduardo Martins, Jorge Sato, Leonardo Pinheiro, Lisiane Barenho, Rodrigo Manfredini, Thiago Andrade, Vinícius Lopes e Vinícius Rossetti.

Agradeço aos gestores da ELEKTRO que acreditaram no desenvolvimento deste projeto, oferecendo as condições necessárias para a pesquisa e, principalmente, a motivação diária para a superação dos desafios. Em ordem alfabética: Álvaro Murakami, André Moreira, Giancarlo Souza, José Resende e Márcio Fernandes.

Agradeço aos professores e amigos do ENERQ por todo apoio e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho, especialmente ao professor Nelson Kagan, por sua orientação e por acreditar que tal trabalho pudesse ser realizado por mim.

Agradeço aos professores Moacyr Andrade e Celso Saraiva do COTUCA que, no curso da minha vida acadêmica, serviram de inspiração e igualmente apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha família, minha namorada Juliana Lapa e amigos por todo o suporte dado em meus estudos e por fazerem minha vida valer a pena. Agradeço à Deus por ter me abençoado com a companhia de pessoas maravilhosas e fundamentais para o meu crescimento.

Resumo

Ser eficiente é um requisito para a sustentabilidade das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica no Brasil. A busca pela eficiência deve estar em harmonia com a melhoria contínua da qualidade, da segurança e da satisfação dos consumidores e das partes envolvidas. O desafio de atender múltiplos objetivos requer que as empresas do setor desenvolvam soluções inovadoras, com a mudança de processos, tecnologia, estrutura e a capacitação das pessoas.

Desenvolver um modelo operacional eficiente e uma gestão rigorosa dos custos são fatores-chave para o sucesso das empresas, considerando o contexto regulatório de revisão tarifária que incentiva a melhoria do desempenho. O modelo operacional é definido a partir da organização logística dos recursos para atendimento da demanda de serviços, que define também os custos fixos e variáveis de pessoal (salário, horas extras, refeições), infraestrutura (manutenção de prédios, ferramentas e equipamentos) e deslocamentos (manutenção de veículos, combustível), por exemplo. A melhor alocação e o melhor dimensionamento de bases operacionais possibilitam a redução dos custos com deslocamento e infraestrutura, favorecendo o aproveitamento da força de trabalho em campo, a melhoria do atendimento dos clientes e da segurança dos colaboradores.

Este trabalho apresenta uma metodologia de otimização de custos através da alocação de bases e equipes operacionais, com o modelamento matemático dos objetivos e restrições do negócio e a aplicação de algoritmo evolutivo para busca das melhores soluções, sendo uma aplicação de Pesquisa Operacional, no campo da Localização de Instalações, em distribuição de energia elétrica. O modelo de otimização desenvolvido possibilita a busca pelo ponto de equilíbrio ótimo que minimiza o custo total formado pelos custos de infraestrutura, frota (veículos e deslocamentos) e pessoal. O algoritmo evolutivo aplicado no modelo oferece soluções otimizadas pelo melhoramento de conjuntos de variáveis binárias com base em conceitos da evolução genética.

O modelo de otimização fornece o detalhamento de toda a estrutura operacional e de custos para uma determinada solução do problema, utilizando premissas de produtividade e deslocamentos (velocidades e distâncias) para definir as

abrangências de atuação das bases operacionais, recursos (equipes, pessoas, veículos) necessários para atendimento da demanda de serviços, e projetar todos os custos fixos e variáveis associados. A metodologia desenvolvida neste trabalho considera também a projeção de demanda futura para a aplicação no estudo de caso, que evidenciou a efetividade da metodologia como ferramenta para a melhoria da eficiência operacional em empresas de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Distribuição de Energia Elétrica, Operação de Sistemas Elétricos, Eficiência Operacional, Pesquisa Operacional, Localização de Instalações, Algoritmos Evolutivos.

Abstract

Being efficient is a requirement for the sustainability of electricity distribution companies in Brazil. The quest for efficiency must be in harmony with the continuous improvement of quality, safety and satisfaction of customers and all stakeholders involved. The challenge of attending multi-objectives requires companies in the sector to develop innovative solutions with the change of processes, technology, structure and enabling their professionals to drive this.

Developing an efficient operational model and a strict cost management are keys for companies to achieve success, considering the regulatory context of tariff reviewing that encourages performance improvement. The operational model is defined from the logistics organization of resources to meet the demand of services, which also defines fixed and variable costs with people/teams (payments, overtime, meals), infrastructure (maintenance of building, tools and equipment's) and fleet (maintenance of vehicles and fuel costs), for example. The best allocation and the best design of operational facilities (or operational bases) will reduce infrastructure costs and truck rolls, releasing workforce to attend customers and reducing displacements risks.

This work presents a cost optimization methodology through the allocation of operational bases and teams, with the mathematical modelling of business objectives, constraints and using Evolutionary Algorithm to find the best solution, as an application of Operations Research in the field of Facility Location in electricity distribution. The optimization model enables the search for the optimal balance point that minimizes the total cost formed by infrastructure, fleet and people. The Evolutionary Algorithm applied in the model offers optimized solutions through the improvement of sets of binary variables based on genetic evolution concepts.

The optimization model also gives detailed information about the operational structure and costs for a given allocation solution, using productivity and displacements (speed, distances) information to define the service regions for each operational base and resources (people, vehicles) needed to attend the demand of services, defining all fixed and variable costs for this. The methodology presented in this paper also considers the future demand of services (forecast), used in a case

study that showed the effectiveness of this methodology as a tool for the improvement of operational efficiency in electricity distribution companies.

Keywords: Electricity Distribution, Power Distribution, Electric Power Systems Operations, Operational Efficiency, Operational Research, Operations Research, Facility Location, Location Analysis, Evolutionary Algorithms.

Sumário

1. APRESENTAÇÃO	15
1.1. Motivação	15
1.2. Conteúdo.....	16
2. CONTEXTUALIZAÇÃO	18
2.1. O Setor Elétrico Brasileiro	18
2.1.1. Agentes do Setor.....	20
2.2. Distribuição de Energia Elétrica	21
2.2.1. Remuneração do Serviço de Distribuição	23
2.2.2. Custos Operacionais	26
2.2.3. Qualidade do Fornecimento na Distribuição.....	28
2.3. Aspectos Operacionais em Distribuição de Energia Elétrica	29
2.3.1. Demanda de Serviços	29
2.3.2. Recursos	34
2.3.3. Escalas de Trabalho.....	37
2.3.4. Veículos.....	39
2.3.5. Infraestrutura	40
2.3.6. Abrangências	41
2.3.7. Deslocamentos.....	42
3. PESQUISA OPERACIONAL PARA LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES ..	44
3.1. Introdução a Pesquisa Operacional.....	44
3.2. Técnicas de Resolução	47
3.3. Localização de Instalações	54
3.4. Estado da Arte em Localização de Instalações.....	58
4. METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE BASES E EQUIPES OPERACIONAIS	62
4.1. Visão Geral.....	62
4.2. Descrição do Problema	63
4.3. Levantamento de Dados	66
4.4. Premissas Operacionais.....	67
4.4.1. Tempos de Execução.....	67

4.4.2. Horário de Trabalho.....	68
4.4.3. Redutores de Homem-Hora	68
4.4.4. Aumentadores de Homem-Hora.....	69
4.4.5. Velocidades, Tempos e Distâncias.....	69
4.4.6. Custos por Quilômetro.....	69
4.5. Descrição do Modelo de Otimização	70
4.5.1. Etapa 1 – Entrada de Demanda e Escolha de Bases.....	71
4.5.2. Etapa 2 – Escolha de abrangência e dimensionamento de equipes	72
4.5.3. Etapa 3 – Composição de custos.....	73
4.6. Formulação do Modelo.....	74
5. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	106
5.1. Etapa 1 – Entrada de Demanda e Escolha de Bases.....	106
5.2. Etapa 2 – Escolha de abrangência e dimensionamento de equipes	112
5.3. Etapa 3 – Composição de custos.....	117
5.4. Busca de Soluções.....	119
5.4.1. Busca Empírica	119
5.4.2. Busca Heurística	120
6. ESTUDO DE CASO	122
6.1. Apresentação da Empresa	122
6.2. Engenharia, Planejamento e Operação.....	124
6.3. Projeto Logística Operacional	128
6.4. Demanda de Serviços	131
6.5. Escopo e Resultados.....	136
7. CONCLUSÃO	142
7.1. Considerações Finais	142
7.2. Contribuições	143
7.3. Prosseguimento dos Estudos.....	144
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

Lista de Figuras

Figura 1 – Estruturação da Pesquisa	16
Figura 2 – Organização do Setor Elétrico Brasileiro [2].....	21
Figura 3 – Equipe de linha morta com cesta aérea [12]	36
Figura 4 – Eletricista de Linha Viva [12]	36
Figura 5 – <i>Digger derrick</i> implantando poste [12].....	37
Figura 6 – Níveis de Abrangência – Exemplo	42
Figura 7 – Modelamento de Problemas [13]	44
Figura 8 – Algoritmo <i>Simplex</i> e vértices do poliedro [17]	48
Figura 9 – <i>Branch and Bound</i> aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante [18]	49
Figura 10 – Função objetivo e restrição não linear [19].....	50
Figura 11 – Representação do método <i>Cutting Planes</i> [20].....	51
Figura 12 – Algoritmo evolutivo [23]	53
Figura 13 – Fronteira de Pareto [26]	54
Figura 14 – Modelo de Círculos Concêntricos de Von Thünen [27]	56
Figura 15 – Triângulo Locacional de Weber [28].....	56
Figura 16 – Cone de Demanda de Lösch [29].....	57
Figura 17 – Meta-heurísticas aplicadas a <i>P-median Problems</i> [31]	60
Figura 18 – Visão Geral da Metodologia	62
Figura 19 – Modelo de Otimização – Etapas	71
Figura 20 – Mapa da Área de Concessão [12].....	122
Figura 21 – ELEKTRO em números [38].....	124
Figura 22 – Situação de abrangências nível 1 em 2013	126
Figura 23 – Situação de abrangências nível 2 em 2013	126
Figura 24 – Mapa de calor da demanda.....	132
Figura 25 – Detalhe do mapa de calor da demanda	132
Figura 26 – Fluxograma da projeção de demanda de expansão e preservação.....	135
Figura 27 – Fluxograma da projeção de demanda operacional	135
Figura 28 – Fluxograma da projeção de demanda comercial	136
Figura 29 – Região Centro (Limeira e Rio Claro) – Abrangências nível 2	137
Figura 30 – Escopo de mudanças do estudo de caso.....	138

Lista de Tabelas

Tabela 01 – Dados do Setor de Distribuição [2]	22
Tabela 02 – Demanda de expansão e preservação	107
Tabela 03 – Demanda operacional e de STC	107
Tabela 04 – Premissas de dias e horas úteis.....	108
Tabela 05 – Premissas de produtividade de Expansão e Preservação	108
Tabela 06 – Tempo médio de atendimento da demanda operacional.....	108
Tabela 07 – Tempo médio de atendimento da demanda de STC	109
Tabela 08 – Coeficiente de demanda de expansão e preservação.....	109
Tabela 09 – Coeficiente de demanda operacional média	109
Tabela 10 – Coeficiente de demanda de STC média.....	109
Tabela 11 – Taxa de visita de expansão e preservação	111
Tabela 12 – Taxa de visita da demanda operacional leve	111
Tabela 13 – Taxa de visita de STC leve.....	111
Tabela 14 – Escolha de bases – Entrada de dados	111
Tabela 15 – Distâncias interlocalidades	112
Tabela 16 – Custo de pedágio interlocalidades.....	112
Tabela 17 – Velocidade de deslocamento interlocalidades.....	112
Tabela 18 – Velocidade de deslocamento intralocalidades.....	113
Tabela 19 – Custos por quilômetro	113
Tabela 20 – Custo por quilômetro	113
Tabela 21 – Tempos de deslocamento unitário interlocalidades.....	114
Tabela 22 – Restrições de tempo de deslocamento	114
Tabela 23 – Dimensionamento de equipes na base origem	115
Tabela 24 – Dimensionamento de equipes na abrangência	116
Tabela 25 – Premissas de arredondamento	116
Tabela 26 – Premissas de custo individuais de infraestrutura e equipes	117
Tabela 27 – Premissas de custo individuais de veículos	117
Tabela 28 – Custos de infraestrutura	118
Tabela 29 – Custos de veículos	118
Tabela 30 – Custos de equipes.....	118
Tabela 31 – Custos de deslocamentos	119

Tabela 32 – Custo total por localidade	119
Tabela 33 – Custos total das bases operacionais de nível 2, 2013.....	139
Tabela 34 – Custos total das bases operacionais de nível 2, otimizado	139

1. APRESENTAÇÃO

1.1. Motivação

A regulação do setor de distribuição de energia elétrica no Brasil estabelece como meta para as empresas a melhoria contínua do fornecimento de energia e a obtenção de ganhos de eficiência (ou produtividade) a cada ciclo de avaliação do negócio, em anos. A melhoria nos resultados operacionais é incentivada por bonificação financeira, através da tarifa paga pelos consumidores, e os ganhos de eficiência são capturados no ciclo seguinte de avaliação.

Nesse contexto, as empresas devem sempre buscar a inovação do negócio para melhorar o desempenho operacional e financeiro. A otimização logística dos recursos alocados é uma oportunidade a ser avaliada periodicamente para a superação dos resultados, considerando o caráter dinâmico e crescente da demanda de serviços de operação, expansão, preservação do sistema elétrico e de atendimento dos clientes.

Este documento apresenta uma contribuição metodológica para a melhoria do desempenho operacional e financeiro das empresas, com foco na otimização da alocação de bases e equipes operacionais, tendo como suporte para a pesquisa:

- O modelo atual do setor elétrico brasileiro em que estão inseridas as concessionárias de distribuição;
- O modelo operacional (estrutura, processos e tecnologia) das empresas de distribuição de energia elétrica;
- Fundamentos e técnicas de Pesquisa Operacional no campo da Localização de Instalações.

A nova metodologia define um modelo de otimização adequado para a resolução através de algoritmo evolutivo, definindo a alocação ótima das bases e equipes, as abrangências de atuação e toda a estrutura de custos operacionais fixos e variáveis.

A metodologia foi validada através de estudo de caso aplicado na empresa ELEKTRO, concessionária que atende parte do interior do Estado de São Paulo e do Estado do Mato Grosso do Sul.

1.2. Conteúdo

Os capítulos deste documento estão organizados e desenvolvidos de forma que este trabalho possa ser estudado e compreendido com utilização dos conhecimentos básicos em Engenharia Elétrica e Pesquisa Operacional. Os capítulos iniciais fornecem uma introdução aos temas relevantes da pesquisa e os demais apresentam a metodologia, o desenvolvimento e o estudo de caso. A estrutura da pesquisa é representada na Figura 1.

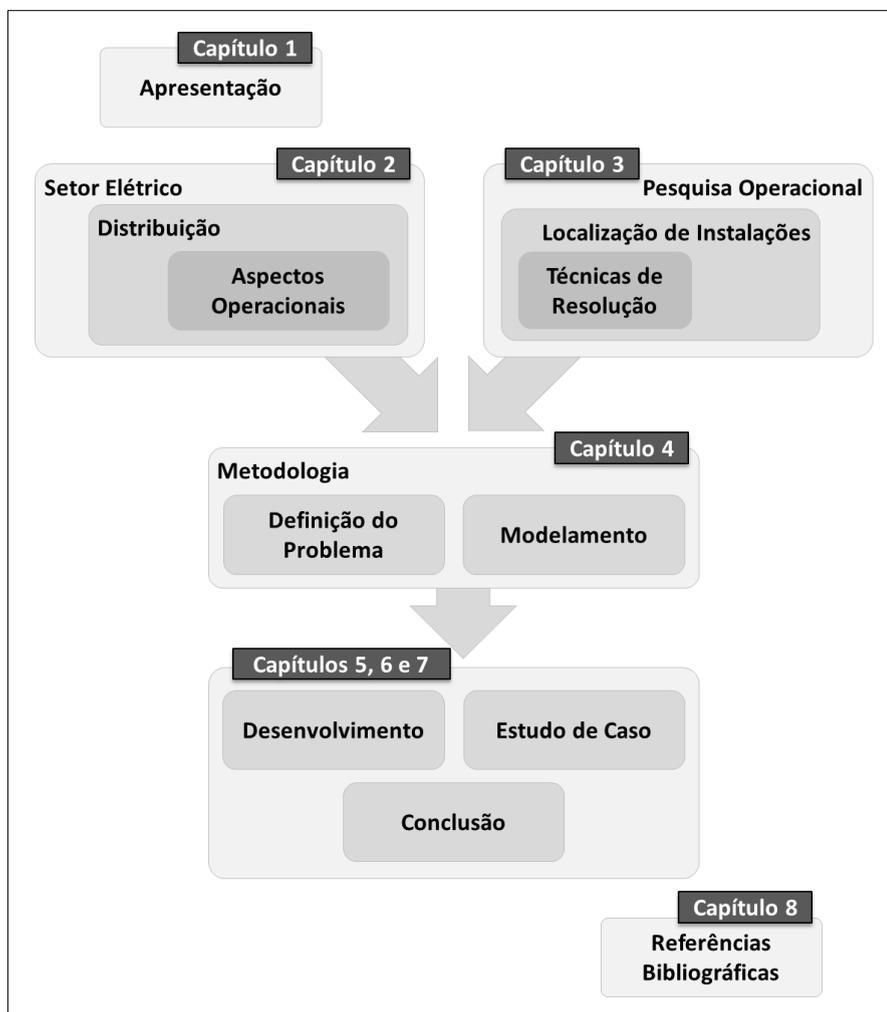


Figura 1 – Estruturação da Pesquisa

O capítulo 1 apresenta a motivação da pesquisa, seu objetivo e o conteúdo que será detalhado nos capítulos seguintes.

O capítulo 2 fornece uma introdução ao setor elétrico brasileiro, descrevendo resumidamente a organização do setor e o segmento de distribuição de energia elétrica. Descreve também a organização operacional das concessionárias de

distribuição, detalhando os processos, procedimentos e recursos dedicados à operação do sistema elétrico, que são explorados no desenvolvimento da metodologia. Os aspectos operacionais são resumidos para basear a compreensão do trabalho e as premissas que alimentam o modelo de otimização apresentado na metodologia.

O capítulo 3 apresenta os conceitos de Pesquisa Operacional relevantes ao tema, bases e referências científicas para o estudo de problemas de Localização de Instalações, suas aplicações e técnicas de resolução, aplicáveis ao objeto de estudo deste trabalho.

Após a introdução aos temas relevantes, o capítulo 4 apresenta o problema de otimização que envolve a alocação de bases e equipes operacionais em distribuição de energia elétrica e a metodologia proposta, detalhando os dados e premissas de entrada, a formulação matemática do modelo e a técnica de resolução com algoritmo evolutivo.

O capítulo 5 descreve o desenvolvimento da metodologia em etapas, apoiado em *software* de análise (formatação, tratamento e relacionamento de dados), para a aplicação prática da metodologia e resolução do problema de otimização. O desenvolvimento resume a forma de aplicação da metodologia.

O capítulo 6 apresenta estudo de caso da aplicação da metodologia baseado em projeto desenvolvido na empresa ELEKTRO. Os resultados obtidos são apresentados em cenários “antes” e “depois” da mudança realizada conforme a metodologia deste trabalho.

O capítulo 7 conclui com a análise do resultado geral da pesquisa, com o resumo das contribuições para a Universidade e para o Setor Elétrico, e apresenta oportunidades para o prosseguimento dos estudos e aprofundamento da pesquisa.

O capítulo 8 fornece as diversas referências bibliográficas que fundamentaram o desenvolvimento da tese e serviram como fonte de conhecimento para a construção deste trabalho.

Os documentos em anexo oferecem detalhes adicionais sobre o estudo de caso e evidenciam os resultados obtidos.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1. O Setor Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro foi consolidado no modelo atual na década de 1990, a partir do projeto Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RESEB) [1], que definiu as condições institucionais e operacionais do novo modelo, em que o Estado passou a desempenhar o papel de “regulador”, definindo as regras e direcionando o desenvolvimento do setor. A maioria das empresas do setor foram privatizadas e autarquias de caráter público e independente foram criadas, como é o caso da própria agência reguladora, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Em 2001 ocorreu uma grande crise de racionamento de energia elétrica, motivada pela escassez de recursos hídricos e aliada às deficiências no planejamento do setor, que motivou nova reestruturação. Novos agentes e mecanismos foram criados para assegurar a sustentabilidade do setor, considerando como princípios a segurança energética, a modicidade tarifária e a universalização do atendimento.

De forma resumida, segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), o setor elétrico brasileiro é caracterizado da seguinte forma [2]:

- Desverticalização da indústria de energia elétrica, com segregação das atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização;
- Coexistência de empresas públicas e privadas;
- Planejamento e operação centralizados;
- Regulação das atividades de transmissão e distribuição pelo regime de incentivos, ao invés do “custo do serviço”;
- Regulação da atividade de geração para empreendimentos antigos;
- Concorrência na atividade de geração para empreendimentos novos;
- Coexistência de consumidores cativos e livres;
- Leilões regulados para contratação de energia para as distribuidoras, que fornecem energia aos consumidores cativos;
- Preços da energia elétrica separados dos preços de transporte (uso do fio);
- Preços distintos para cada área de concessão, em substituição à equalização tarifária;

- Livre comercialização de energia elétrica entre geradores, comercializadores e os consumidores livres especiais.

A seguir uma breve descrição dos segmentos do setor elétrico brasileiro.

Geração

Em 2013, o Brasil atingiu a capacidade instalada de geração de 126,7 GW e consumiu 570 TWh [3]. Da capacidade instalada total, 70,6% correspondem à geração hidroelétrica, e o restante está dividido entre geração térmica, biomassa, nuclear, e eólica, respectivamente, em ordem de participação percentual. A maior parte do atual parque de geração de energia elétrica no Brasil está concentrada na Região Sudeste, apesar dos empreendimentos recentes em usinas de grande porte na Região Norte e de usinas eólicas na Região Nordeste. As usinas térmicas têm sido importante componente do sistema, considerando seu carregamento geral, em função das atuais condições de precipitação de chuvas e das restrições ambientais à implantação de reservatórios (anuais e plurianuais) das usinas hidroelétricas em construção, o que ocasiona a necessidade de acionamento das térmicas fora da ordem de mérito para suprir a demanda, provocando assim o aumento do preço da energia elétrica.

Transmissão

As linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), também chamado de Rede Básica, interligam as regiões brasileiras em uma rede de alta tensão (230 kV e acima), permitindo a transferência de energia entre as regiões e equilibrando a demanda e oferta, considerando os regimes de chuva complementares entre as bacias do Sul e Sudeste, Centro Oeste e Nordeste (que também contribui com o maior parque de usinas de geração eólica do Brasil) e, futuramente, com a inserção das bacias da Região Norte. O SIN possui hoje 101.237 km [4] de extensão e sua operação é centralizada.

Distribuição

A distribuição de energia abrange basicamente os conjuntos elétricos formados pelas linhas de transmissão, subestações e redes de distribuição de alta (igual ou inferior a 138 KV), média e baixa tensão, que transporta a energia do SIN até as os consumidores finais (indústrias, comércio, residências, etc.). As redes de distribuição

têm grande extensão e ampla capilaridade no ambiente das cidades, em áreas urbanas e rurais. A proximidade com o consumidor final aumenta a exposição das distribuidoras à pressão pela melhoria da qualidade dos serviços e redução dos custos da energia, além dos aspectos ambientais relacionados.

Comercialização

Os agentes de comercialização promovem a compra e venda de energia diretamente entre os geradores e os grandes consumidores, realizando um importante papel para o desenvolvimento do mercado livre de energia, estimulando a competição e preços menores de geração de energia elétrica, e compartilhando o risco do sistema entre os principais agentes.

2.1.1. Agentes do Setor

A ANEEL é o principal agente responsável pela administração do setor elétrico, através da definição das regras que estabelecem as relações entre todos os agentes e os consumidores, objetivando a sustentabilidade do setor a preços módicos de energia elétrica.

O Operador Nacional do Sistema (ONS) é o agente responsável pela operação do SIN e pelo despacho das fontes de geração, através de uma gestão integrada do sistema hidrotérmico, garantindo a segurança e o menor custo de operação da geração e da transmissão através do equilíbrio do sistema.

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) é o agente responsável pela gestão dos contratos de compra e venda firmados entre os agentes de comercialização, distribuidoras e grandes consumidores. A CCEE realiza a liquidação financeira determinando o preço final da energia no mercado livre.

Há também os órgãos governamentais do setor, que definem as diretrizes e estratégia de médio e longo prazo, entre eles: o Ministério de Minas e Energia (MME), o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sendo este o responsável por prover o planejamento de setor de médio prazo (Plano Decenal), longo prazo (cenários em torno de 25 anos) e as condições operativas do sistema existente.

Os agentes de geração, transmissão, distribuição e comercialização são as empresas públicas ou privadas que investem, administram e exploram os ativos de concessão, buscando a melhoria contínua dos serviços com o cumprimento das regras do setor e maximizando o retorno do capital investido.

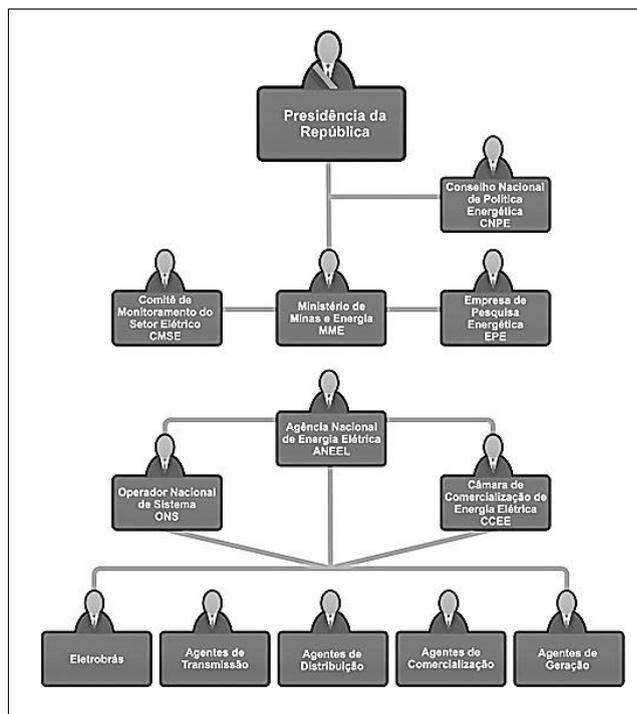


Figura 2 – Organização do Setor Elétrico Brasileiro [2]

2.2. Distribuição de Energia Elétrica

Atualmente 64 empresas [2] realizam a distribuição no Brasil. Muitas delas compõem grupos empresariais (*holdings*) que operam em diversos estados/regiões e buscam obter vantagem competitiva pela eficiência em processos.

As empresas de distribuição operam através de contratos de concessão, limitados a uma região geográfica (área de atuação concedida), em que os ativos (subestações, redes de média e baixa tensão, postes, etc.) são administrados pelas empresas responsáveis pela operação, manutenção, expansão do sistema elétrico e atendimento dos níveis de serviços conforme determinações da ANEEL.

A distribuição de energia elétrica envolve a operação e manutenção de subestações, de ramais alimentadores que formam a rede primária (média tensão), de instalações transformadoras de média e baixa tensão, da rede secundária de baixa tensão, ramais de serviço e equipamentos de medição em aproximadamente 70 milhões de

unidades consumidoras e alcançando 99,2% da população brasileira, conforme a Tabela 01.

Cabe às distribuidoras realizarem os investimentos necessários para a expansão do sistema em decorrência do crescimento da demanda e planos de universalização do fornecimento de energia elétrica, na ordem de grandeza de 11 bilhões de reais por ano (Tabela 01), seguindo a regra de “investimento prudente” da ANEEL, cujo objetivo é assegurar que as empresas realizem investimentos condizentes com a modicidade tarifária, com viabilidade econômica e retorno em prazos razoáveis.

Tabela 01 – Dados do Setor de Distribuição [2]

Consumidores	69,6 milhões
Quantidade novas ligações/ano	2 milhões
Receita bruta	R\$ 140 bilhões
Encargos e tributos	R\$ 52 bilhões
Participação no PIB	2,2%
Investimentos anuais	R\$ 11 bilhões
Índice de satisfação	78,2%
Taxa de atendimento	99,2% dos domicílios

Para distribuir energia elétrica e atender a demanda de serviços relacionada, as empresas concessionárias possuem uma estrutura operacional distribuída geograficamente em toda a área da concessão, e uma ou mais estruturas administrativas que centralizam serviços corporativos.

A estrutura operacional abrange as diversas equipes de campo (eletricistas, técnicos), a infraestrutura predial que suporta as bases operacionais (escritórios remotos), veículos, equipamentos e ferramentas necessárias à execução dos serviços. Abrange também a estrutura de gestão de processos e de pessoal (engenheiros, planejadores, almoxarifes, encarregados, supervisores), que realizam o apoio direto às equipes de campo. Fazem parte da estrutura operacional as empresas terceirizadas que prestam serviços para as concessionárias, sejam serviços técnicos ou de apoio (segurança, logística, limpeza).

A estrutura administrativa envolve áreas que suportam processos comuns para a operação de campo, tais como finanças, tecnologia da informação, engenharia, recursos humanos, centros de operação, cadeia de suprimentos, atendimento ao

cliente e comercial. Essa estrutura abrange os altos executivos das empresas, que estão ligados às suas empresas controladoras ou *holdings*.

2.2.1. Remuneração do Serviço de Distribuição

O serviço público de distribuição de energia, assim como todo o setor elétrico brasileiro, teve seu arranjo regulatório revisto por reformas definidas pelo RESEB, ao final dos anos 90, bem como em anos posteriores (mais recentemente em 2014). No modelo atual, as distribuidoras de energia elétrica são remuneradas através de uma tarifa paga pelos consumidores, previamente definida pela ANEEL.

Após definidas, essas tarifas são alteradas apenas nas seguintes condições, especificadas no módulo 2 do Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET) [5]:

- 1) Reajuste tarifário anual, cuja fórmula de atualização está definida nos contratos de concessão e que, na prática, serve para compensar a inflação do período;
- 2) Revisão tarifária periódica, feita em intervalos que variam de três a cinco anos, dependendo da concessão, e cujos critérios e metodologias são estabelecidos em resoluções da ANEEL;
- 3) Revisão tarifária extraordinária, que é feita quando ocorre algum evento extraordinário não coberto pelos dois mecanismos anteriores que provoca desequilíbrio econômico-financeiro significativo na concessão.

Composição da Tarifa

A tarifa designada a uma distribuidora é conceitualmente dividida em dois componentes, chamados de parcela A e B.

A parcela A da receita corresponde ao repasse dos chamados custos não gerenciáveis, ou seja, aqueles cujos valores não estão sob o controle da concessionária, tais como os custos relacionados à compra de energia elétrica (descontadas as perdas regulatórias admitidas) e à conexão aos sistemas de transmissão, além dos encargos setoriais, que são definidos em legislação específica e cujos montantes e preços independem da vontade ou gestão da distribuidora.

A parcela B, abrange os custos operacionais reconhecidos pela ANEEL, que são referentes aos custos de pessoal, de material e de outras atividades vinculadas diretamente à operação e manutenção dos serviços de distribuição. A parcela B também abrange a remuneração sobre os investimentos em ativos prudentemente realizados pela companhia, assim como custos com a depreciação dos mesmos.

Estes ativos são divididos em dois conjuntos que formam a Base de Remuneração Regulatória (BRR) e a Base de Ativos Regulatória (BAR), que correspondem ao valor do capital investido na manutenção e expansão do sistema (BRR) e na infraestrutura necessária (BAR). Sobre as bases de remuneração é aplicada a depreciação dos ativos e a taxa de remuneração, que é o Custo Médio Ponderado do Capital (CMPC) formado a partir da estrutura de capital da empresa, conforme regras definidas pela ANEEL.

Todos os custos que compreendem a parcela B são considerados gerenciáveis, uma vez que a distribuidora tem capacidade de administrá-los diretamente.

Abaixo os itens que compõem a parcela A da tarifa, conforme módulo 2 do PRORET:

- a) Custo de compra da energia elétrica – Custo da energia elétrica comprada pela concessionária para garantir o atendimento à totalidade de seu mercado consumidor, levando em conta as perdas elétricas decorrentes do transporte da energia, de erros de medição e de furto de energia até o limite definido pela ANEEL;
- b) Custo de conexão e uso dos sistemas de distribuição e transmissão (TUSD e TUST) – Valor pago pela distribuidora referente ao transporte da energia elétrica nas redes de transmissão e de outras concessionárias de distribuição, desde as usinas geradoras até a sua própria rede;
- c) Encargos Setoriais – Definidos por legislação, os encargos setoriais têm destinação específica, não representando, portanto, receita para a concessionária, que deve apenas recolher os respectivos montantes cobrados dos consumidores via tarifa de energia elétrica. São eles:
 - Reserva Global de Reversão (RGR);
 - Conta de Consumo de Combustíveis (CCC);

- Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE);
- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA);
- Conta de Desenvolvimento Energético (CDE);
- Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos (CFURH);
- Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e Eficiência Energética;
- Custos do Operador Nacional do Sistema;
- Encargo de Energia de Reserva (EER);
- Encargos da CCEE.

Da mesma forma, são definidos os componentes da parcela B conforme o PRORET:

- a) Custos Operacionais – Referem-se aos custos para execução dos processos comerciais, atividades de operação e manutenção das instalações elétricas, além de direção e administração da companhia;
- b) Receitas Irrecuperáveis – Parcela esperada da receita total faturada pela empresa que possivelmente não será arrecadada em função de inadimplência;
- c) Custo Anual das Instalações Móveis e Imóveis (CAIMI) – Refere-se aos investimentos de curto e médio período de recuperação (BAR), tais como os realizados em *hardware*, *software*, veículos (curto), e em toda a infraestrutura de edifícios de uso administrativo (médio);
- d) Remuneração do Capital – Parcela correspondente à remuneração dos investimentos realizados pela concessionária (BRR), que depende fundamentalmente da Base de Remuneração Líquida e do Custo de Capital;
- e) Quota de Reintegração – Parcela referente à depreciação e amortização dos investimentos realizados. Depende essencialmente da Base de Remuneração Bruta e da taxa média de depreciação das instalações.

Para a parcela A, a distribuidora tem o papel de repassar os custos citados aos consumidores, não havendo nenhum ganho efetivo para a empresa resultante desse processo.

Na parcela B, onde a concessionária tem gestão total sobre os desembolsos, os custos operacionais correspondem ao *OPEX (Operational Expenditure)* das distribuidoras, enquanto que os investimentos em BRR e BAR correspondem ao *CAPEX (Capital Expenditure)*. A gestão financeira das empresas inclui a gestão do *OPEX* e *CAPEX* alinhados com o planejamento operacional, técnico e de mercado. Os custos operacionais (*OPEX*) correspondem assim, em grande parte, aos custos da estrutura operacional descrita anteriormente (equipes de campo, infraestrutura predial, veículos). A composição e o detalhamento do *OPEX* são abordados nos capítulos seguintes.

Para a composição final da tarifa, a parcela B é ainda modificada pelo “fator X”, que é o artifício através do qual a ANEEL impõe sua avaliação comparativa entre empresas, aumentando ou diminuindo o valor da tarifa, dado o desempenho num determinado período, tendo por base uma empresa similar à avaliada como referência. O fator X por sua vez é definido em função dos ganhos de produtividade, da satisfação dos consumidores e da qualidade do fornecimento de energia elétrica avaliadas no período. Quanto maior a eficiência (produtividade), a satisfação dos consumidores e a qualidade, maior será o retorno financeiro para a empresa via tarifa.

Em qualquer serviço público, a competição (no mercado, pelo mercado ou por comparação) deve existir promovendo a melhoria contínua a preços módicos para a população. No caso das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica, por sua característica de monopólio natural [6], a competição é por comparação e a chave para a sustentabilidade (rentabilidade) do negócio é ser cada vez mais eficiente (reduzir custos operacionais), melhorar a qualidade dos serviços e a satisfação dos consumidores.

2.2.2. Custos Operacionais

No momento da revisão tarifária, são feitos dois tipos de cálculo. O primeiro consiste em apurar o valor do reposicionamento tarifário, com o objetivo de determinar um nível de tarifa que permita à concessionária cobrir os custos não gerenciáveis e os custos operacionais, além de proporcionar a adequada remuneração dos investimentos prudentes realizados. O segundo cálculo consiste na definição do fator X, já mencionado.

Os custos operacionais que serão considerados no reposicionamento tarifário serão os valores já estabelecidos no ciclo de revisão anterior, atualizados considerando-se os ganhos de produtividade alcançados pelas distribuidoras entre os ciclos. O ganho de produtividade consiste simplesmente em medir a relação entre a evolução dos custos operacionais reais e a evolução das unidades consumidoras e das redes. Em geral, como os custos operacionais crescem menos do que consumidores e redes num determinado período de análise, as distribuidoras ganham produtividade, que é revertida para a modicidade tarifária no ciclo seguinte.

Após a etapa acima, é feita uma segunda avaliação que consiste em comparar a eficiência das distribuidoras por meio de métodos de *benchmarking*, o que pode gerar resultados diferentes dos encontrados anteriormente. O intuito desta segunda avaliação é definir um intervalo de valores de custos operacionais eficientes de acordo com a metodologia adotada. Havendo diferença entre os resultados encontrados entre as avaliações, esta será considerada no cálculo do fator X. Em outras palavras, o resultado encontrado na segunda avaliação pode ser interpretado como uma meta de custos a ser atingida no final do ciclo.

Para se chegar ao final desta última etapa, para se definir o nível de eficiência das distribuidoras, são seguidos três passos:

- 1) O nível dos custos operacionais é avaliado considerando a quantidade de consumidores, redes e mercado atendido, a fim de determinar uma primeira nota de eficiência – desta forma, esses são fatores mandatórios no cálculo dos custos operacionais que serão considerados como meta no final do ciclo;
- 2) Com o intuito de refinar a nota de eficiência definida no primeiro passo, são introduzidas variáveis que não são gerenciáveis pela distribuidora, mas afetam seus custos. Trata-se de variáveis ambientais, como nível salarial, densidade de carga e nível de chuvas;
- 3) Por fim, a eficiência final da distribuidora é definida considerando-se o desempenho real da mesma quanto à qualidade do serviço prestado e combate às perdas não técnicas. Nesse ponto, concessionárias com bom desempenho melhoram suas notas, em sentido contrário das empresas com mau desempenho.

Pelo modelo adotado pela regulação brasileira, entende-se que a utilização da energia distribuída, do número de unidades consumidoras e da extensão de rede como variáveis fornece um resultado muito consistente para a definição da produtividade estimada das distribuidoras, com base nos custos operacionais. Esse modelo também é utilizado por agências europeias, como na Alemanha, Bélgica, Dinamarca, Países Baixos, entre outros países [7].

2.2.3. Qualidade do Fornecimento na Distribuição

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é avaliada através de indicadores e metas estabelecidas pela ANEEL por meio dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [8]. O módulo 8 do PRODIST define os indicadores técnicos de qualidade do fornecimento de energia elétrica. O módulo 7 define a forma de cálculo das perdas globais do sistema, composta pelas perdas técnicas e não técnicas.

Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) são os principais indicadores de qualidade. Em 2014, o Brasil teve DEC médio de 18,27 horas e FEC médio de 10,49 interrupções [2], ambos apurados em período anual. Há grande variação da qualidade entre empresas e regiões. Alguns conjuntos elétricos possuem DEC superior a 60 horas, enquanto outros possuem DEC inferior à 1 hora, dependendo do padrão e topologia de rede empregados, condições climáticas e disponibilidade de fontes supridoras ou contingência.

O indicador de perdas global do sistema é composto pelas perdas técnicas e não técnicas. A perda técnica pode ser calculada e ocorre devido à passagem da corrente elétrica pelos condutores e equipamentos, dissipando calor por *efeito Joule*, e também devido às perdas no núcleo ferromagnético de transformadores. A perda não técnica é a diferença entre energia comprada e vendida pela distribuidora, subtraída da perda técnica. A perda não técnica ocorre basicamente por erros de medição (falhas nos sistemas de medição), erros de leitura ou por furto de energia elétrica. O índice de perdas globais no Brasil é de aproximadamente 13,99%, sendo o índice de perdas não técnicas (componente da perda global) de aproximadamente 5,60% [2].

A seguir são apresentados outros indicadores de qualidade regulados pela ANEEL:

Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): Intervalo de tempo total de descontinuidade da distribuição de energia elétrica, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC): Número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (DMIC): Tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão.

Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico (DICRI): Corresponde à duração de cada interrupção ocorrida em dia crítico, para cada unidade consumidora ou ponto de conexão. Dia crítico é considerado quando o volume de ocorrências num conjunto elétrico, em termos da quantidade de clientes afetados, ultrapassa um determinado limiar baseado no histórico do conjunto.

2.3. Aspectos Operacionais em Distribuição de Energia Elétrica

A seguir são apresentados os componentes da estrutura operacional e variáveis do contexto das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica que baseiam a metodologia desta pesquisa.

2.3.1. Demanda de Serviços

O sistema de distribuição de energia elétrica pode ser dimensionado em quantidade de subestações, quilômetros de linhas de transmissão (alta tensão), quilômetros de redes de distribuição (média e baixa tensão), quantidade de clientes (unidades consumidores), energia consumida e também em termos da demanda de serviços que são executados na área de concessão para a operação, preservação (ou manutenção), expansão do sistema e o atendimento das solicitações dos clientes.

Neste trabalho são abordados os serviços executados na rede de distribuição, excluindo assim a demanda de serviços realizados em subestações e linhas de transmissão. Os serviços executados na rede abrangem as atividades realizadas nos alimentadores primários (redes de média tensão), que partem das subestações e normalmente percorrem vias urbanas e rurais, em redes tipicamente radiais, até a proximidade das residências, estabelecimentos comerciais, indústrias e demais

unidades consumidoras, onde a eletricidade transmitida é rebaixada para tensões menores (redes de baixa tensão).

Este trabalho não contempla a demanda de serviços relacionada à instalação e manutenção dos automatismos da rede elétrica, que abrangem um conjunto de equipamentos como chaves automatizadas, religadores, reguladores de tensão, bancos de capacitores e sensores de falta de tensão. Esses equipamentos requerem mão de obra especializada para a execução de atividades nos mesmos.

Demanda Operacional de Rede

A demanda operacional refere-se aos serviços de atendimento de ocorrências técnicas acidentais no sistema elétrico, que normalmente provocam a interrupção do fornecimento. Tais ocorrências demandam a mobilização de equipes de campo para a execução de atividades para o restabelecimento do fornecimento. Os eventos de interrupção do fornecimento de energia elétrica podem envolver desde um único cliente até cidades ou grandes regiões atendidas por um conjunto elétrico (linhas de transmissão, subestações e rede de distribuição).

As ocorrências acidentais são apuradas com a ajuda de sistemas de informações que contabilizam a quantidade e duração dos eventos, bem como a quantidade de clientes afetados em cada evento. Informações adicionais sobre a causa, ações e atividades realizadas para o restabelecimento, materiais utilizados e equipes envolvidas, tempos de acionamento e deslocamento, ajudam na análise do desempenho operacional e no desenvolvimento de ações preventivas, preditivas ou de melhoria no sistema.

A demanda de serviços operacionais de campo pode ser dimensionada em valores de homem-hora (HH), que são as horas de trabalho dos eletricitas (equipes) aplicadas na execução das atividades de restabelecimento, incluindo as atividades técnicas e os tempos de deslocamento entre os eventos.

O volume de eventos acidentais pode variar com sazonalidade anual (períodos chuvosos e secos) e diária (picos de demanda na manhã e final da tarde). O planejamento da disponibilidade de equipes (homem-hora disponível) para execução de serviços deve considerar esses fatores na configuração das escalas de trabalho das equipes e seus perfis (qualificações).

São exemplos de demanda operacional serviços de restabelecimento com reparo de fiações (rede primária ou secundária), troca de transformadores queimados em postes, troca de postes danificados por abalroamento de veículos, poda de árvores em contato com a rede elétrica, etc. Há pouco ou nenhum planejamento para a execução destes serviços, que são acidentais em sua maioria, e podem demandar uma ou mais equipes de eletricitas com diferentes recursos e equipamentos.

Os recursos de mão de obra (eletricistas) utilizados para o atendimento da demanda operacional são majoritariamente atribuídos ao *OPEX* das empresas, ou seja, são tratados como custos operacionais e não compõem a BRR. Os materiais utilizados são inseridos na base de remuneração conforme o apontamento das atividades, com exceção de alguns componentes menores que são considerados *OPEX*.

Serviços Técnicos Comerciais

Os serviços técnicos comerciais (STC) são aqueles que envolvem diretamente os clientes (unidades consumidoras) por razão de relacionamento comercial. São normalmente realizados nas redes secundárias de baixa tensão, nos ramais de serviço, nos padrões de entrada e nos sistemas de medição. Abrangem também serviços diversos solicitados pelos clientes, como a realização de poda de árvores e verificação de consumo.

São exemplos da demanda de STC: vistoria e ligação de unidade consumidora, desligamento, troca de padrão, corte e religação, inspeção e substituição de medidor, sendo o corte e a inspeção realizados pela escolha da distribuidora, para gestão da inadimplência e de perdas não técnicas.

A demanda de STC possui menor complexidade para a execução das atividades, seguindo procedimentos bem definidos e com variedade conhecida de serviços (pode ser bem estimada/projetada). A demanda pode ser dimensionada em quantidade (por tipo de serviço) ou em homem-hora. Os serviços são normalmente executados por uma única equipe de eletricitas e não requerem recursos ou equipamentos especializados.

Na maioria das empresas distribuidoras a demanda de STC é executada por empresas terceirizadas. Pode ser segregada (entre a mão de obra própria ou terceira) conforme a estratégia adotada pela empresa para a melhoria dos

resultados (satisfação dos clientes, recuperação de energia, inadimplência.). Ou seja, os serviços de STC podem ser parcialmente terceirizados, sendo que uma empresa terceira pode realizar apenas determinados tipos de serviços de STC, numa determinada região.

A demanda de serviços técnicos comerciais em geral possui um comportamento conhecido considerando a quantidade de clientes e o perfil de consumo numa determinada localidade. A sazonalidade é verificada em regiões de veraneio ou com grande movimentação de pessoas em períodos específicos do ano.

Os serviços podem ser classificados como “regulados” ou “não regulados”. Os serviços regulados são aqueles que possuem prazo de atendimento determinado pela regulação e, em função das solicitações dos clientes, devem ser executados dentro do prazo, caso contrário a distribuidora é penalizada com o pagamento de multa (exemplos: ligação nova, troca de padrão, religação). Os serviços não regulados não possuem prazo para execução, sendo executados conforme estratégia e necessidade da empresa para o cumprimento de metas, obedecendo às regras definidas pela ANEEL (exemplos: inspeção de unidade consumidora, corte do fornecimento). De fato, todos os serviços são regulados no sentido de que seguem a regulação vigente, porém para alguns tipos a decisão sobre o prazo de execução cabe à distribuidora.

A Resolução nº 414/2010 da ANEEL [9] e suas atualizações definem as regras para a execução de serviços comerciais, estabelecendo a forma de relação entre clientes e distribuidoras, os procedimentos e processos comerciais que devem ser seguidos pelas partes.

Expansão e Preservação de Rede

A demanda de expansão e preservação de redes (ou construção e manutenção) é o conjunto de atividades executadas que visam o aumento da capacidade do sistema (de carga ou quantidade de clientes), a universalização do fornecimento de energia elétrica e prevenção de falhas (manutenção) no sistema elétrico.

Assim como a demanda operacional, a demanda de expansão e preservação pode ser dimensionada em quantidade de homem-hora (HH) de alocação de equipes. As atividades são normalmente agrupadas em projetos ou ordens de manutenção e são

executadas de forma planejada, com envolvimento de uma ou mais equipes, considerando o tamanho das obras. As atividades podem ser executadas com o sistema elétrico energizado (regime de linha viva, LV) ou não energizado (regime de linha morta, LM).

As atividades (projetos ou ordens de manutenção) são normalmente planejadas com antecedência (prazo regulatório) para que seja enviada notificação aos clientes (nos casos que envolvem o desligamento do sistema elétrico).

Na maioria das empresas distribuidoras de energia elétrica, a demanda de expansão e preservação de rede é executada por empresas terceirizadas. O modelo praticado pelas empresas terceirizadas explora a mão de obra intensiva de trabalhadores na execução das atividades. Conforme será apresentado no estudo de caso, este trabalho está baseado em um novo modelo que explora a tecnologia para a execução das atividades com maior nível de automação e sofisticação técnica e de processos, proporcionando ganhos de qualidade, produtividade e segurança com a valorização da mão de obra própria (ou comumente referida como mão de obra “primarizada”, em oposição ao termo “terceirizada”).

Os recursos de mão de obra (eletricistas) aplicados para a expansão e preservação da rede elétrica são majoritariamente atribuídos ao *CAPEX*, e compõem assim a BRR como investimentos aplicados no sistema elétrico. Assim como para as demais demandas, os materiais são majoritariamente considerados na BRR.

A demanda de expansão e preservação pode ser dividida da seguinte forma:

- Obras específicas;
- Obras de varejo;
- Manutenção estrutural;
- Obras de universalização;
- Programa Luz para Todos.

Para todos os casos de atendimento de demanda, os recursos utilizados (pessoas e materiais) que compõem a BRR devem ser devidamente apontados (registrados) contabilmente, e são passíveis de auditoria pela agência reguladora. Em 2009, a ANEEL publicou o Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (MCPSE) [10], que define as regras para a gestão dos ativos das concessões bem como a natureza

dos recursos aplicados no atendimento das demandas: *CAPEX* (BRR ou BAR) ou *OPEX*.

2.3.2. Recursos

As equipes operacionais são basicamente formadas por eletricitistas que, por motivo de segurança no trabalho, conforme a Norma Regulamentadora nº 10 (NR10) [11], não desenvolvem sozinhos as atividades no sistema elétrico (único eletricitista na realização de atividades no sistema elétrico de potência).

As equipes de eletricitistas (normalmente duplas) são configuradas em escalas de trabalho predefinidas, ajustadas para o tipo e perfil de demanda, considerando a qualificação dos eletricitistas (especialidade) e recursos de trabalho (veículos, equipamentos e ferramentas).

Os eletricitistas são qualificados (treinados) de acordo com os tipos de serviços para os quais serão designados, além dos treinamentos básicos comuns a todos os trabalhadores. Por exemplo, atividades realizadas em regime de linha viva exigem maior qualificação dos eletricitistas, dada a complexidade e riscos envolvidos nas atividades executadas com o sistema elétrico energizado. Essas atividades são realizadas no método “à distância”, “ao potencial” ou “ao contato”, definidas pela NR10, e exigem treinamento especial.

Na execução das atividades no sistema elétrico de potência em uma ou mais equipes, um dos eletricitistas é designado como responsável pela segurança da pessoas envolvidas, sendo chamado de “guardião da vida”, conforme exige a NR10. A Avaliação Preliminar de Riscos (APR) é também outro instrumento que visa eliminar ou mitigar os riscos envolvidos nas atividades. Tais medidas visam assegurar melhores condições de trabalho para os eletricitistas. Ainda, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) ou Coletiva (EPCs), também sob as condições estabelecidas pela NR10, reduzem o risco de acidentes com trabalhadores no setor elétrico.

As empresas distribuidoras trabalham normalmente num modelo misto que envolve eletricitistas de quadro próprio (primarizados) e de outras empresas (terceirizados), buscando otimizar os custos operacionais. Atualmente, muitas empresas estão mudando o modelo de trabalho, de maioria terceirizada para primarizada, motivadas

por ações judiciais trabalhistas e, principalmente, pelo aumento da segurança e eficiência apoiadas em novas formas de trabalho, redesenho de processos e procedimentos, e maior uso de tecnologia. A opção pela composição das equipes em quadro próprio (primarizadas) oferece maior flexibilidade para mobilização de equipes frente às demandas. Tal condição requer processo de planejamento aprimorado, com gestão integrada da carteira de serviços, capaz assim de balancear a capacidade e recursos disponíveis, explorando a multifuncionalidade das equipes para aumentar a produtividade.

Neste trabalho são abordados os recursos de pessoal no nível de equipes (duplas de eletricitistas), trabalhando em escalas de trabalho conhecidas. A seguir são listados os tipos considerados de equipes. A denominação de cada tipo está basicamente associada ao tipo de veículo e de demanda normalmente atendida.

Equipe Leve

Utiliza veículos populares ou de carga leve (*pick-ups*) com os implementos necessários para acomodação de ferramental e materiais. Realiza trabalhos principalmente na abrangência da rede secundária e das instalações dos clientes (ramal de serviço, padrão de entrada e sistemas de medição). Realiza trabalho em altura com utilização de escada. São normalmente designadas para o atendimento da demanda de STC. Caso seja veículo de carga leve com escada central (maior alcance), pode realizar trabalhos também na abrangência da rede primária (demanda operacional).

Equipe Média – Linha Morta com Cesta Aérea

Utiliza caminhões menores com implementos para ferramental e cesta de elevação para trabalho em altura (cesta aérea). Realiza todo tipo de trabalho na abrangência das redes de distribuição (rede primária e secundária) em regime de linha morta (sistema não energizado). São normalmente designadas para o atendimento de ocorrências acidentais (restabelecimento) e manutenção preventiva “leve” (que pode ser executada por uma única equipe). Exemplo na Figura 3.



Figura 3 – Equipe de linha morta com cesta aérea [12]

Equipe Média – Linha Viva com Cesta Aérea

Além de possuir os mesmos equipamentos da linha morta, contam com ferramental e implementos específicos para o trabalho em regime de linha viva (rede energizada) e com maior grau de isolamento. Os eletricitistas possuem treinamento adicional necessário para a execução das tarefas que possuem maior complexidade e risco. É designada para os serviços de restabelecimento e, principalmente, para suportar as atividades de manutenção preventiva realizadas sem desligamentos do sistema elétrico. Exemplo na Figura 4.



Figura 4 – Eletricista de Linha Viva [12]

Equipe Pesada – *Digger Derrick*

O *digger derrick* é um caminhão maior com implementos especializados para implantação de postes. Oferece ganho de produtividade em relação ao processo tradicional de implantação, que envolve maior número de trabalhadores e tempo de execução. O *digger* possui também uma cesta aérea para trabalho em altura (linha

morta). É utilizado principalmente para atendimento da demanda de expansão e preservação, auxiliando o restabelecimento em atividades emergenciais com implantação de postes. Exemplo na Figura 5.



Figura 5 – *Digger derrick* implantando poste [12]

Equipe Pesada – Guindauto

O guindauto usa caminhão maior com implementos para transporte e manuseio de postes. Pode suportar também a implantação de postes com menor nível de automação da tarefa. Em geral, consegue realizar as mesmas atividades do *digger derrick* (instalação de postes) com produtividade menor. Não possui cesta aérea para trabalho em altura. Assim como o *digger*, é utilizado principalmente para atendimento da demanda de expansão e preservação, auxiliando o restabelecimento em atividades emergenciais com implantação de postes.

Neste trabalho, conforme será abordado em capítulos seguintes, para efeito de atribuição de demanda, não é feita distinção entre *digger* e guindauto, considerando que os mesmos podem realizar as mesmas tarefas com produtividade distintas, o que será compensado na modelagem das premissas com a utilização da produtividade média entre ambos os tipos de equipes.

2.3.3. Escalas de Trabalho

As equipes trabalham em escalas (turnos) predefinidas que seguem regras da legislação trabalhista e acordos com sindicatos. Há certa flexibilidade para composição das escalas e para ajuste do horário de início da jornada de trabalho, o que possibilita às empresas ajustarem a configuração das equipes para o melhor atendimento da demanda, maximizando o homem-hora disponível nos momentos de

maior ocorrência de eventos acidentais, considerando a sazonalidade (diária ou anual) dos tipos de demanda.

Equipe em escala 5x2

Formada por uma dupla de eletricitistas que trabalha 5 dias consecutivos e tem 2 dias de descanso. A equipe em escala 5x2 normalmente trabalha de segunda a sexta-feira em horário comercial. Essa é a escala normalmente praticada para as equipes leves que tem foco na demanda de STC, em que ocorre maior interação com os clientes durante horário comercial.

Também na escala 5x2 geralmente trabalham as equipes pesadas (*digger derrick* e guindauto). As bases com maior demanda de serviços possuem equipes pesadas em escala 6x3, que suportam a demanda de expansão e preservação ao longo de todos os dias da semana. A escala 5x2 tem o maior benefício em termos de homem-hora disponibilizado por eletricitista.

Equipe em escala 6x3

Formada por 3 eletricitistas que se revezam em duplas. Cada eletricitista trabalha 6 dias consecutivos e tem 3 dias de descanso. A equipe trabalha continuamente 7 dias na semana. O horário de trabalho pode ser deslocado, com equipes em escala 6x3 que iniciam a jornada de trabalho no período da tarde ou da noite, dependendo da demanda de serviços.

As equipes com foco na demanda operacional normalmente trabalham em escala 6x3, considerando que tal demanda ocorre em todos os dias da semana, exigindo a disponibilidade da força de trabalho, em horário comercial ou deslocado (tarde, noite ou madrugada). A escala 6x3 tem maior benefício em termos da disponibilidade do veículo (em relação à escala 5x2).

Equipe em escala 6x4

Formada por 10 eletricitistas que se revezam em duplas formando uma equipe que trabalha continuamente 24 horas por dia e 7 dias por semana (3 turnos diários). Cada eletricitista trabalha 6 dias e descansa por 4 dias, seguidos. É adequada para bases com grande demanda operacional, evitando a necessidade de acionamento de eletricitistas de plantão e reduzindo o tempo de atendimento de emergências. Tem o maior benefício em termos da disponibilidade do veículo.

2.3.4. Veículos

Conforme já descrito, na composição das equipes são utilizados diferentes tipos de veículos, de acordo com o tipo de atividade/demanda. Ainda, pode-se considerar um *mix* de diferentes tipos de veículos usados na composição de um grupo semelhante de equipes, para embasar o estabelecimento de premissas (velocidades e custos/km médios). A produtividade das equipes no desenvolvimento das atividades em campo também está relacionada com o tipo de veículo utilizado.

Veículos leves podem trafegar mais facilmente em áreas urbanas, porém limitam a abrangência das atividades. Em áreas rurais, veículos leves têm maiores riscos em situações de terreno irregular, desenvolvendo o trajeto em maior tempo. Em geral, são adequados para um conjunto de atividades agrupadas no ambiente urbano, realizando maior quantidade de deslocamentos e percorrendo distâncias menores.

Veículos pesados são normalmente utilizados nas atividades de expansão e preservação, que podem ser mais bem planejadas, considerando as dificuldades de deslocamento e acesso. Em geral, realizam quantidade menor de deslocamentos, percorrendo distâncias maiores.

Veículos médios por sua vez se deslocam com facilidade, seja no ambiente urbano ou rural. Por utilizarem implemento mais caro (cesta aérea), são preferencialmente designados para atividades em altura, onde possibilitam ganho de eficiência (maior produtividade). Os veículos médios são usados pelas equipes de linha viva e linha morta para o atendimento de todo tipo de demanda, restringindo as atividades de STC àquelas realizadas em altura (ligação nova e troca de padrão).

A logística de utilização dos veículos, atrelada ao planejamento das atividades, aos tipos de demanda e à localização das bases origem (de onde partem as equipes diariamente), é fator fundamental para a redução do custo operacional, considerando os custos dos deslocamentos das equipes, composto pelo custo de manutenção do veículo, custo do combustível, pedágios e pelo custo do homem-hora consumido em deslocamento, basicamente. As velocidades, distâncias (e, por conseguinte, os tempos) e quantidade dos deslocamentos influem no tempo total de homem-hora disponibilizado para execução das tarefas.

Os custos variáveis relacionados à utilização dos veículos são explanados no capítulo 4 (Metodologia para Alocação de Bases e Equipes Operacionais). Os custos fixos pagos anualmente para a manutenção dos veículos são devidos à documentação legal (licenciamento, IPVA, DPVAT) e ao seguro contra roubo ou acidentes.

2.3.5. Infraestrutura

A infraestrutura de bases operacionais para a alocação das equipes abrange os prédios (escritórios), pátios e estruturas acessórias (almoxarifados, caixas de contenção, depósito de materiais para descarte), geralmente posicionadas em localidades da área de concessão da empresa, mas não necessariamente. O tamanho da infraestrutura é proporcional à quantidade de pessoas, equipes ou veículos que são alocadas numa determinada base.

Nos escritórios são alocados o pessoal administrativo e de apoio operacional, bem como técnicos ou supervisores. A estrutura de “retaguarda” em geral é bem simples, destinada para o apoio das equipes de campo. Bases maiores são escolhidas para abrigar técnicos e engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento de projetos e gestão da manutenção de rede (projetistas, planejadores, técnicos de qualidade e segurança). A gestão dos processos mais complexos de engenharia, planejamento e operação do sistema é normalmente realizada numa área centralizada na sede corporativa da empresa.

O pátio abriga os veículos estacionados que não estão em serviço de campo. Serve também como área de preparação das equipes para a realização das atividades (separação e carregamento de materiais, montagem e desmontagem de estruturas). As bases também possuem um pátio (estoque) de postes e de transformadores para execução de obras e manutenção. O volume e variedade de itens do estoque variam de acordo com o volume e o tipo de demanda de serviços na abrangência da base. A infraestrutura pode ser própria ou alugada. A infraestrutura predial pode compartilhar a área (terreno) das subestações do sistema elétrico, sendo, nesses casos, infraestrutura própria.

Os custos associados à manutenção da infraestrutura podem ser separados em fixos e variáveis.

Os custos fixos, que se repetem a cada mês ou ano, garantem as condições e serviços mínimos para o funcionamento da base. Exemplos de custos fixos são serviços de tecnologia da informação (telefonia, manutenção de computadores e acessórios) que independem do tamanho da base ou da quantidade de pessoas.

A maioria das linhas de custos pode ser modelada como função da quantidade de pessoas alocadas na base operacional, compondo assim os custos variáveis. São exemplos de custo variável o aluguel, serviços de conservação predial (limpeza, manutenção), segurança patrimonial, IPTU, consumo de água e energia e outros serviços de tecnologia da informação (links de dados). Alguns custos variam de acordo com a área (m²) livre ou edificada do imóvel.

2.3.6. Abrangências

Uma base operacional tem abrangência geográfica limitada, atendendo a uma região predefinida. Essa região é normalmente composta por um conjunto de localidades, sendo normalmente a base posicionada na localidade de maior demanda ou naquela que proporciona o melhor acesso às demais localidades. Bases em grandes regiões urbanas ou áreas metropolitanas podem ter sua abrangência definida por bairros ou sub-regiões (poligonais de atendimento).

A metodologia proposta nesse trabalho, além da abrangência geográfica, define a abrangência por tipo de demanda de serviços. Uma localidade pode assim ser atendida por uma base capacitada para determinado tipo de demanda (nível 1), e ser atendida por outra base para outro tipo de demanda (nível 2).

O nível 1 de abrangência adotado nesse trabalho corresponde a demanda operacional e de STC. O nível 2 corresponde a demanda de expansão e preservação de rede. Uma base do nível 2 normalmente possui uma abrangência geográfica maior (em relação ao nível 1) e contém um conjunto de bases do nível 1 e suas abrangências geográficas (localidades atendidas).

O conceito de abrangências é assim definido para o melhor modelamento (alocação e aproveitamento) das equipes conforme a demanda de serviços nas localidades. As bases menores em geral não possuem demanda suficiente para utilização integral de equipes de linha viva, *digger derrick* ou guindauto. Logo, essas equipes, voltadas para a expansão e preservação da rede, são agrupadas em abrangências de nível 2.

Assim, uma localidade pode ser atendida por uma base origem nível 1 e nível 2 em diferentes localidades, compondo a abrangência de ambas, sendo que a abrangência nível 2 normalmente inclui a de nível 1.

A Figura 6 exemplifica uma configuração de bases e abrangências:

ABRANGÊNCIAS DE NÍVEL 1							ABRANGÊNCIAS DE NÍVEL 2						
LOC22, LOC35 E LOC53 SÃO BASES ORIGEM							LOC35 E LOC53 SÃO BASES ORIGEM						
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
1	LOC11	LOC21	LOC31	LOC41	LOC51	LOC61	1	LOC11	LOC21	LOC31	LOC41	LOC51	LOC61
2	LOC12	LOC22	LOC32	LOC42	LOC52	LOC62	2	LOC12	LOC22	LOC32	LOC42	LOC52	LOC62
3	LOC13	LOC23	LOC33	LOC43	LOC53	LOC63	3	LOC13	LOC23	LOC33	LOC43	LOC53	LOC63
4	LOC14	LOC24	LOC34	LOC44	LOC54	LOC64	4	LOC14	LOC24	LOC34	LOC44	LOC54	LOC64
5	LOC15	LOC25	LOC35	LOC45	LOC55	LOC65	5	LOC15	LOC25	LOC35	LOC45	LOC55	LOC65
6	LOC16	LOC26	LOC36	LOC46	LOC56	LOC66	6	LOC16	LOC26	LOC36	LOC46	LOC56	LOC66

RESUMO
LOC22 É BASE APENAS NÍVEL 1
LOC35 E **LOC53** SÃO BASES NÍVEL 1 E 2
LOC35 ATENDE **LOC22** (NÍVEL 2)

Figura 6 – Níveis de Abrangência – Exemplo

A partir do exemplo da Figura 6, a localidade LOC11 será atendida pela localidade LOC22 para demanda operacional e de STC, e será atendida pela LOC35 para demanda de expansão e preservação. Como será demonstrado nos capítulos seguintes, a configuração de abrangências é influenciada pela malha rodoviária que atende as localidades da área de concessão, considerando as particularidades que influem nos tempos e custos de deslocamento (estradas rurais e pedágios, por exemplo).

2.3.7. Deslocamentos

Os veículos realizam deslocamentos quando em viagens entre localidades (interlocalidades) ou dentro de uma mesma localidade (intralocalidade), no ambiente urbano e rural, deslocando-se entre os pontos de execução de atividades.

A quantidade de deslocamentos interlocalidades a ser realizada por equipes de uma determinada base origem é função da quantidade de demanda existente na abrangência. Conhecendo a demanda, a produtividade das equipes (quantidade de demanda atendida por deslocamento) e a abrangência (distâncias), é possível estimar a quantidade de deslocamentos a serem realizados entre uma base origem e as localidades atendidas, assumindo também premissas de velocidade/tempo.

Para os deslocamentos intralocalidade, semelhantemente, conhecendo o volume da demanda urbana e rural, e a produtividade das equipes, usando premissas de distâncias médias, velocidades e tempos, também é possível estimar uma quantidade de deslocamentos diários por equipe.

Em uma dada configuração de abrangências, a quantidade de deslocamentos (por tipo de equipe/veículo) pode ser dimensionada em volume de horas, reduzindo ou aumentando a quantidade de total de horas disponibilizadas para a realização dos serviços. Os deslocamentos podem ser interpretados como “redutores de homem-hora”. No capítulo 4 (Metodologia para Alocação de Bases e Equipes Operacionais) são detalhados outros redutores.

3. PESQUISA OPERACIONAL PARA LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

3.1. Introdução a Pesquisa Operacional

Pesquisa Operacional é uma disciplina que trata da aplicação de métodos matemáticos para a resolução de problemas e tomada de decisões através de modelamento dos problemas na forma de funções objetivo, suas variáveis e restrições. Também é conhecida em Inglês por *Operations Research*, *Operational Research* ou *Management Sciences* (em caso de problemas no campo dos negócios) [13].

A função objetivo busca normalmente encontrar a solução que estabelece um ponto ótimo definido pelo conjunto de variáveis, sendo em geral um ponto de mínimo ou máximo da função. As restrições estabelecem as condições de contorno da função objetivo. Exemplo:

Maximizar ou Minimizar: **Função Objetivo** $f = x_1 + 3.x_2 - x_3$

Sujeito a: **Restrições** $x_1 + 2.x_2 + x_3 = 4$

$$2.x_1 + x_2 \leq 5$$

Os problemas modelados são uma representação simplificada do problema no mundo real, cujas soluções são passíveis de serem aplicadas no caso real e orientar a tomada de decisão, conforme exemplo na Figura 7.

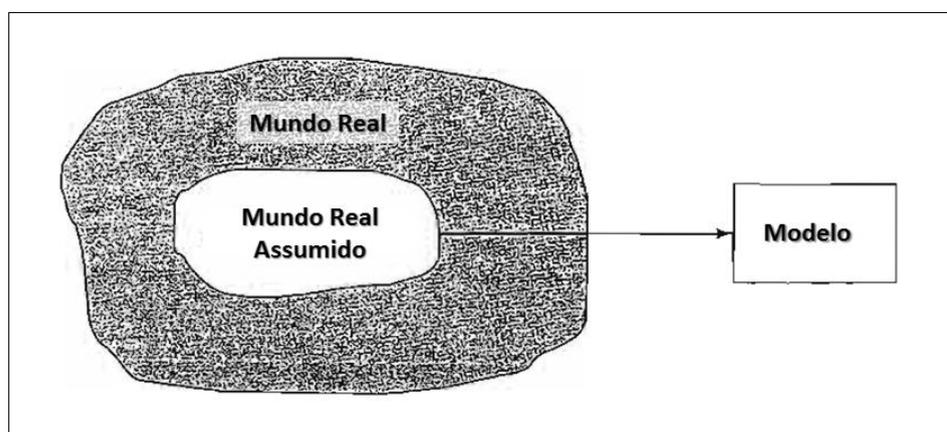


Figura 7 – Modelamento de Problemas [13]

No aspecto prático, a Pesquisa Operacional é normalmente aplicada na resolução de problemas de otimização em engenharia, economia ou finanças, sem qualquer

restrição à sua utilização em outras áreas, nas quais podem também ser encontradas importantes contribuições da Pesquisa Operacional.

Como disciplina, a Pesquisa Operacional passou a ser desenvolvida após a Segunda Guerra Mundial, quando um grupo de cientistas passou a trabalhar com o exército britânico desenvolvendo modelos para a otimização logística das tropas e seus materiais [13]. Após a guerra, as ideias desenvolvidas para as operações militares foram adaptadas para melhorar a eficiência e produtividade no setor civil.

A busca pela otimização de custos através da aplicação de métodos e modelos matemáticos tem outros precedentes [14]. Na Inglaterra, no Século XVIII, Von Thünen desenvolveu trabalhos que definiam custo de produção agrícola em função de variáveis espaciais ou regionais. Há também outros cientistas que analisaram problemas semelhantes, que tratavam da redução de custos pela otimização logística da produção, criando assim uma classe de problemas chamada de Localização de Instalações (em Inglês, *Facility Location* ou *Location Analysis*), que será explorada a seguir neste capítulo. A Localização de Instalações pode ser considerada como um campo de pesquisa em Pesquisa Operacional.

Historicamente, a Pesquisa Operacional também está apoiada no desenvolvimento de problemas clássicos como o Problema do Caixeiro Viajante ou Problema *Milk Run*. Esses são problemas de logística em que a busca pelo melhor planejamento e roteiro reduz o custo total dos serviços. No primeiro caso, o problema é definido por um vendedor (caixeiro viajante) que deve percorrer diversas cidades e retornar à origem, sendo o objetivo do problema encontrar a rota de menor custo que satisfaz todas as cidades [15]. No segundo caso, *Milk Run* pode ser definido como uma técnica de planejamento e roteirização em que um operador de serviços de transporte realiza coletas e entregas, entre fornecedores e clientes, de forma a reduzir a necessidade de estoques de ambos. A otimização é centrada também na redução dos deslocamentos [16].

Muitas áreas ou campos de pesquisa podem ser associados à Pesquisa Operacional. A seguir um resumo das principais áreas e exemplos de aplicações.

Transportes e logística – Abrange muitas aplicações de Pesquisa Operacional, relacionadas à gestão de frotas aéreas, marítimas, ferroviárias, rodoviárias em operações logísticas diversas, para a otimização de custos relacionados aos

deslocamentos, manutenção, aproveitamento de capacidade e redução de tempo ocioso. A resolução dos problemas em transportes envolve normalmente a busca por soluções de roteirização e escolha dos pontos e formas de armazenagem em operações intermodais.

Energia e utilidades – Envolve as aplicações para otimizar a exploração ou utilização dos recursos e fontes de energia naturais, como água, petróleo ou derivados, energia solar ou eólica, com o objetivo de minimizar o custo da exploração/operação ou maximizar o benefício proporcionado pelo recurso (maximizar a geração de energia).

Agricultura e pecuária – Busca otimizar o manejo, plantio ou colheita observando as condições climáticas, disponibilidade de recursos (hídricos) e custos na agricultura, incluindo a distribuição dos produtos até os centros de consumo. Na pecuária, busca maximizar o retorno (lucro) através do melhor aproveitamento de terras (manejo de rebanhos em territórios limitados) e redução dos custos operacionais na produção.

Indústrias em geral – Envolve a eficiência de máquinas e processos produtivos, com a redução de tempos de produção de bens de consumo ou otimização de recursos (caldeiras, fornos, operários) envolvidos na fabricação. A Pesquisa Operacional pode também ser aplicada na otimização da cadeia de distribuição envolvendo redes atacadistas e varejistas.

Economia e finanças – Abrange os problemas relacionados à avaliação de cenários financeiros macro ou microeconômicos, para melhoria de resultados em empresas ou organizações com a comparação de opções de investimento, financiamento, alternativas monetárias, fiscais ou cambiais para maximizar o retorno financeiro ou reduzir riscos.

Serviços públicos – Otimização logística de unidades fixas ou móveis de prestação de serviços públicos para redução dos tempos de atendimento e dos custos operacionais em segurança (polícia), saúde pública (hospitais e ambulâncias), serviços essenciais (eletricidade, gás, água, telefonia). Visam maximizar o benefício proporcionado pela prestação do serviço a uma comunidade.

Estas são apenas algumas áreas em que a Pesquisa Operacional pode ser aplicada para a resolução de problemas, que podem também ser classificados quanto ao

escopo de otimização (roteirização, planejamento, agendamento, estocagem). No trabalho apresentado nesta dissertação, é tratado o problema de Localização de Instalações na área de Serviços Públicos, especificamente, a alocação bases e equipes operacionais em Distribuição de Energia Elétrica, detalhado a seguir neste capítulo e no próximo.

3.2. Técnicas de Resolução

A diversidade de problemas e possibilidades de aplicação de técnicas matemáticas para a resolução dos problemas sob a forma de funções objetivo e restrições define o universo de estudo da Pesquisa Operacional. Nesse contexto, dado o conhecimento científico existente, o desafio da aplicação da Pesquisa Operacional está em:

- 1) Realizar o modelamento adequado do problema, de forma que o modelo possa representar o mundo real satisfatoriamente pela escolha das variáveis, definição da função objetivo (maximizar ou minimizar o custo, lucro, qualidade, etc.) e restrições (físicas, financeiras).
- 2) Escolher a técnica adequada para resolução do problema (que interfere no modelamento), de forma que a solução a ser encontrada atenda satisfatoriamente às condições do problema no mundo real e forneça um resultado melhor.

O tipo de problema muitas vezes define um conjunto de possíveis soluções e técnicas já desenvolvidas podem ser aplicadas para a busca de soluções. Em geral, deseja-se uma solução ótima para uma determinada função objetivo. Alguns problemas apresentam complexidade elevada e a procura pela solução ótima tem um custo alto (esforço computacional, tempo de processamento de máquina). Nesses casos, buscam-se soluções que sejam “ótimos locais”, considerando um universo finito de soluções por restrições do domínio das variáveis ou outras restrições intrínsecas ao algoritmo aplicado na resolução (tempo máximo de processamento, por exemplo).

As técnicas de resolução dos problemas estão associadas ao modelamento matemático. Um determinado problema pode ser modelado de forma que possa ser resolvido por técnicas diferentes, considerando as vantagens e desvantagens de

cada abordagem, como a complexidade ou custo de desenvolvimento do modelo, o custo de aplicação da técnica e a precisão do resultado (ótimo global ou local).

Algumas técnicas são amplamente utilizadas em pesquisa básica ou em ambientes de negócios. Outras são utilizadas em pesquisa avançada e resolução de problemas científicos complexos. A aplicação dessas técnicas é normalmente apoiada em recursos computacionais para processamento de equações e exploração de resultados, envolvendo algoritmos e ferramentas de análise de dados.

A seguir algumas técnicas mais comuns para resolução de problemas em Pesquisa Operacional.

Programação Linear

Aplicada em problemas cuja função objetivo e restrições são todas lineares. Nestes casos, geometricamente, as restrições lineares definem um poliedro convexo, que é chamado de conjunto dos pontos viáveis. Uma vez que a função objetivo é também linear, todo ótimo local é automaticamente um ótimo global. A função objetivo ser linear também implica que uma solução ótima pode apenas ocorrer em um ponto da fronteira do conjunto de pontos viáveis.

O algoritmo *Simplex* (exemplificado na Figura 8) resolve problemas de programação linear construindo uma solução admissível no vértice do poliedro, e então percorre os vértices do poliedro que sucessivamente possuem valores mais altos da função objetivo até encontrar o máximo.

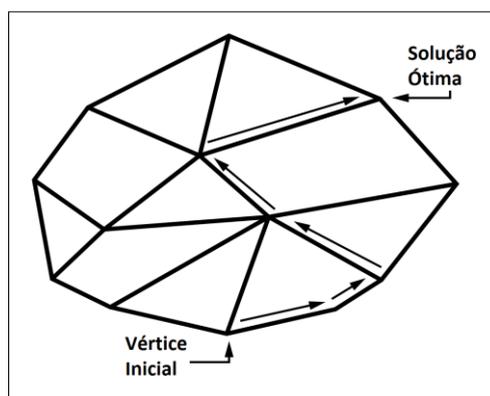


Figura 8 – Algoritmo *Simplex* e vértices do poliedro [17]

Programação Linear Inteira

Semelhante ao caso anterior, porém os valores admissíveis por algumas ou todas variáveis são restritos aos números inteiros. A forma simples de resolução é através da relaxação do problema com admissão de números reais e posterior arredondamento da solução. Tal procedimento não garante a solução ótima.

Como exemplo, dentre os algoritmos de programação linear inteira, o método *Branch and Bound* consiste na enumeração sistemática de todos os candidatos à solução em forma de árvore de possibilidades, considerando as combinações das variáveis. O algoritmo explora as ramificações que representam subconjuntos do universo de soluções, comparando os resultados obtidos com os limites inferiores e superiores estimados para a solução ótima, e descartando a ramificação se ela não pode produzir uma solução melhor que a já encontrada.

O algoritmo *Branch and Bound* (exemplificado na Figura 9) pode ser aplicado para a resolução do Problema do Caixeiro Viajante, desde que a quantidade de localidades a serem visitadas não seja elevada. Para problemas que apresentam “explosão” combinatória, outros métodos podem ser utilizados, conforme descrito a seguir.

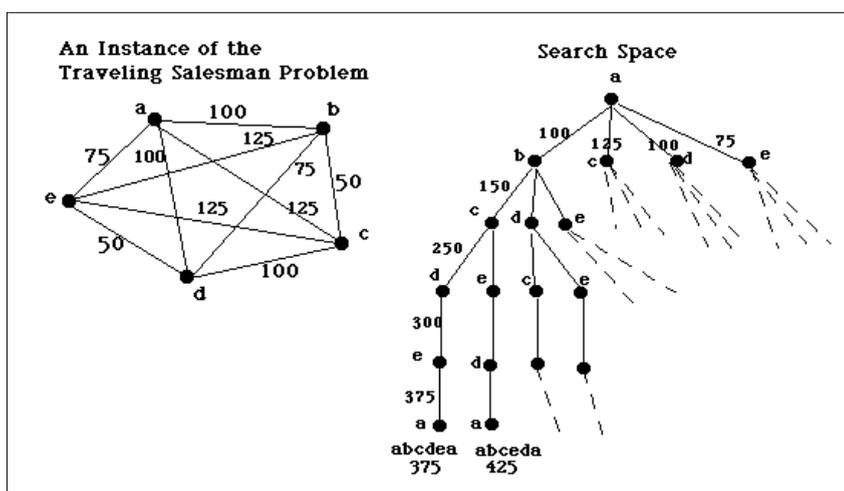


Figura 9 – *Branch and Bound* aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante [18]

Programação Não Linear

Aplicada à resolução de problemas em que a função objetivo ou as restrições do problema são equações não lineares. Em muitos casos, a função é não convexa e exige outras abordagens para resolução, como a adaptação da programação linear, uso de *Branch and Bound* em subclasses do problema original (minimização), sem

garantir a solução ótima global (exemplo de função objetivo e restrições na Figura 10).

As *Condições de Karush-Kuhn-Tucker* são as condições necessárias para que uma solução em problemas de programação não linear seja ótima, dado que ela satisfaz determinadas condições de regularidade, e são uma generalização do método de *Multiplicadores de Lagrange*.

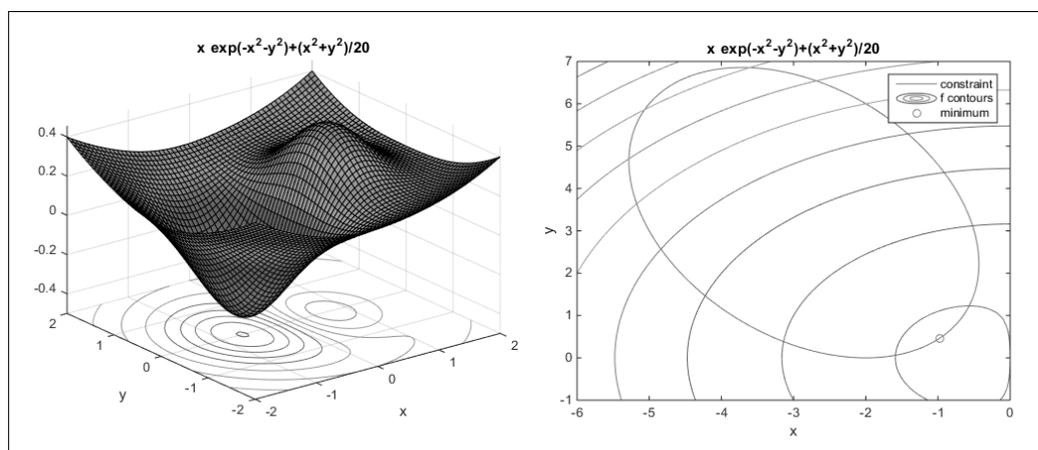


Figura 10 – Função objetivo e restrição não linear [19]

Programação Inteira Mista

Envolve os problemas que possuem funções (objetivo ou restrições) lineares ou não lineares com variáveis inteiras. As técnicas e algoritmos de solução normalmente aplicam-se a problemas de decisão binária condicionadas às variáveis do mundo real. A programação inteira mista considera a variação/adaptação de outros algoritmos da programação linear, inteira e não linear para a solução de problemas, como a relaxação e fracionamento das funções e uso do algoritmo *Branch and Bound*.

Nos anos recentes, um grande avanço nas técnicas de resolução de problemas com programação inteira mista foi dado com o desenvolvimento do método *Cutting Planes* (Planos de Corte) apoiado na grande capacidade de processamento dos computadores modernos (exemplificado na Figura 11). O método busca iterativamente encontrar soluções viáveis por meio de inequações lineares, chamadas cortes. A cada iteração, o algoritmo adiciona uma restrição linear que é satisfeita por uma solução inteira do problema original, eliminando partes

fracionárias da solução não inteira. O algoritmo chega ao fim quando uma solução inteira é obtida.

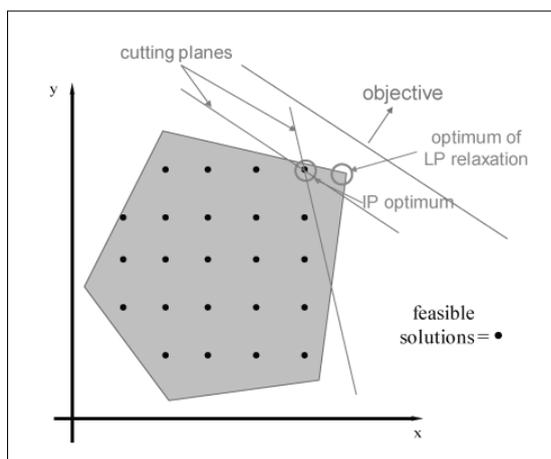


Figura 11 – Representação do método *Cutting Planes* [20]

Busca Heurística

Algoritmos de busca heurística foram motivados pela grande complexidade computacional na resolução dos problemas que envolvem programação inteira, por exemplo. Tal complexidade é expressa pela medida de tempo de processamento na *Máquina de Turing* [21], que é um dispositivo teórico que se restringe apenas aos aspectos lógicos de um computador e que, ao longo dos anos, tem sido utilizado para modelar sistemas computacionais.

Um problema que pode ser resolvido num período de tempo polinomial numa *Máquina de Turing* determinística é chamado de problema tipo P (denota “tempo polinomial determinístico”). De outra forma, problemas cujo tempo de resolução são determinados com uso da *Máquina de Turing* não determinística são chamados de NP (“tempo polinomial não determinístico”). Algoritmos para resolução de problemas tipo P oferecem uma resposta em tempo polinomial. Problemas NP não podem ser resolvidos rapidamente, porém, dada uma resposta, esta pode ser verificada por um algoritmo em tempo polinomial. A pergunta se problemas P formam um subconjunto de NP é uma das grandes questões da matemática ainda não resolvidas [22].

Os problemas NP envolvem problemas de otimização combinatória (inclusos os problemas de programação inteira, como o Problema do Caixeiro Viajante) que, em certos casos, devido ao imenso conjunto de soluções proporcionado pela “explosão” combinatória, a solução ótima não pode ser encontrada rapidamente pela

enumeração/inspeção das alternativas (como no algoritmo *Branch and Bound*). Tais problemas são designados como *NP-Completo*.

Outras técnicas, como os algoritmos meta-heurísticos (método heurístico genérico), foram também desenvolvidas para a resolução de problemas *NP-Completo*. A Busca Tabu e os Algoritmos Evolutivos são meta-heurísticas que propõem a resolução dos problemas embora não ofereçam garantia da solução ótima.

Busca Tabu – Aplica Busca Local (método de busca num espaço de soluções) para encontrar soluções e então verifica soluções vizinhas para encontrar soluções melhores. O desempenho do algoritmo é melhorado com a utilização de recursos de estruturas de memória e regras do usuário, que facilita o processo de eliminação e escolha de soluções candidatas.

Algoritmos Evolutivos – Abrangem uma grande classe de algoritmos que se baseiam nos conceitos da evolução biológica para o melhoramento de soluções em problemas de otimização. Uma subclasse de algoritmos evolutivos são os algoritmos genéticos que exploram a ideia do aprimoramento genético para encontrar soluções para problemas de variáveis binárias, em lugar do uso da programação inteira. Basicamente, dada uma população de soluções candidatas, que são combinações de “zeros” e “uns”, o algoritmo realiza a seleção dos melhores resultados (1), o cruzamento destes resultados (troca de “genes”) (2), e promove a mutação dos genes (3) como tentativa de encontrar soluções ótimas. Exemplo na Figura 12.

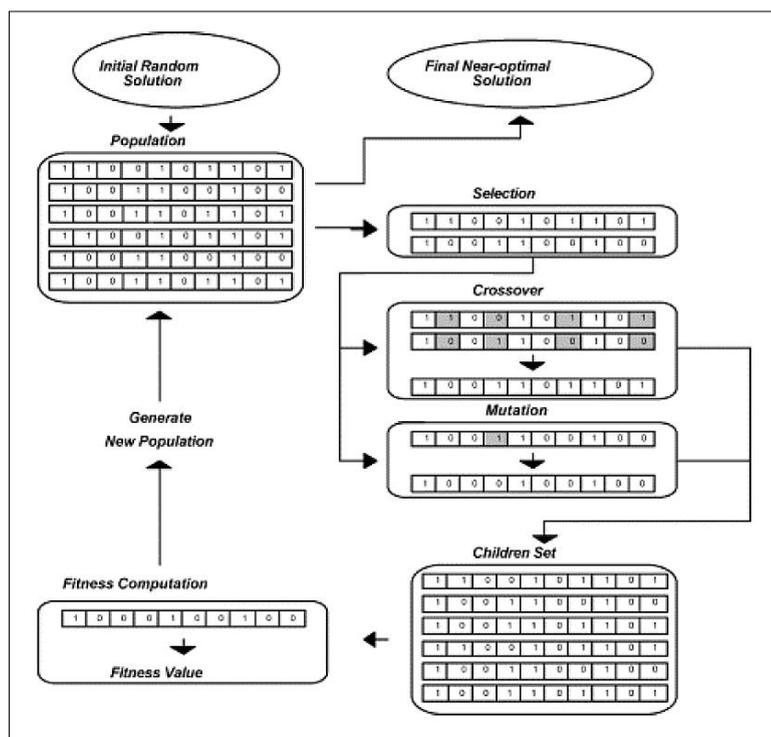


Figura 12 – Algoritmo evolutivo [23]

Cabe notar que na aplicação de algoritmos evolutivos a função objetivo é denominada *fitness function*. O sucesso da resolução dos problemas é altamente dependente do modelamento adequado dos mesmos, caso contrário, não será possível convergir para uma solução ótima.

A utilização de restrições torna o algoritmo evolutivo intrinsecamente inadequado para a resolução de problemas [24], dado que uma única condição de restrição pode anular uma família inteira de conjuntos binários, pois um valor de resultado nulo impede que o algoritmo prossiga evoluindo uma determinada geração. Assim, as restrições em algoritmos evolutivos são implicitamente inseridas no modelo de otimização, de forma a garantir que uma determinada combinação indesejável produza um resultado ruim e seja descartada pela evolução das famílias/gerações.

Algoritmos Busca Tabu e Evolutivos são eficientes em encontrar soluções ótimas locais à um custo relativamente baixo de processamento de máquina. A execução do algoritmo é normalmente limitada no tempo ou em quantidade de iterações.

Otimização de Múltiplos Objetivos

Muitos problemas envolvem a otimização de dois ou mais objetivos. A busca pela solução ótima envolve a escolha baseada em vantagens e desvantagens de cada solução frente aos objetivos, geralmente conflitantes.

O conceito de *Pareto Efficiency* [25] pode ser aplicado nestes casos em que uma solução ótima sempre irá privilegiar um objetivo em detrimento de outro (exemplo na Figura 13). A Fronteira de Pareto delimita as melhores soluções em diferentes espaços de estados, chamados áreas de dominância, que contêm as melhores soluções. Em seguida, o problema é adequado mantendo a função objetivo desejada, convertendo as demais em restrições de desigualdade, e o problema pode ser resolvido com uma das técnicas de programação.

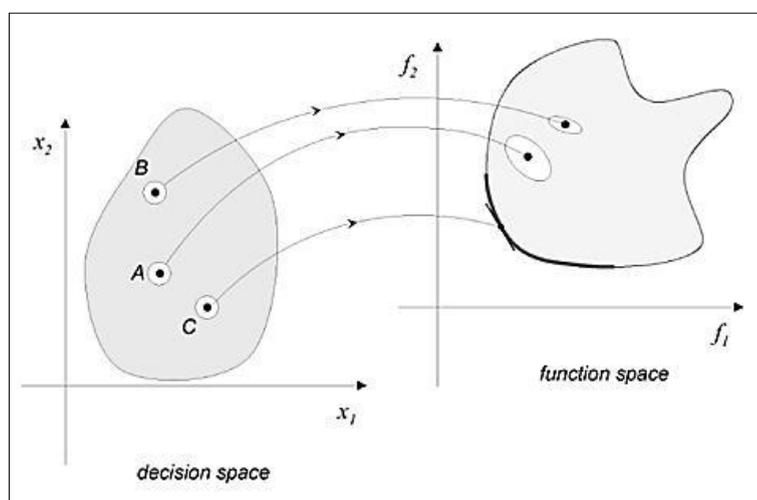


Figura 13 – Fronteira de Pareto [26]

As técnicas de resolução apresentadas são apenas alguns exemplos básicos de abordagens na resolução de problemas em Pesquisa Operacional. No trabalho apresentado nesta dissertação, o problema de alocação de bases e equipes operacionais em distribuição de energia elétrica é modelado para resolução através da aplicação de Busca Heurística, com utilização de algoritmo evolutivo, detalhado nos capítulos 4 (Metodologia para Alocação de Bases e Equipes Operacionais) e 5 (Desenvolvimento da Metodologia).

3.3. Localização de Instalações

É a classe de problemas que trata do atendimento de n destinos por um número de origens p . A análise de Localização de Instalações pode ser aplicada a vários

problemas, como a localização de aeroportos, armazéns, hospitais, fábricas, unidades de atendimento de serviços públicos, entre outros.

O objetivo do problema é determinar a quantidade e a localização ideal das instalações de modo a satisfazer o custo mínimo ou lucro máximo, pela análise dos custos fixos e variáveis relacionados à produção, aos serviços de atendimento, transporte e toda infraestrutura necessária. As restrições normalmente aplicadas são o aproveitamento mínimo da capacidade de transporte e os tempos máximos de atendimento.

Desde meados do século XVIII, alguns modelos de análise da Localização de Instalações foram estudados, desenvolvidos e aprimorados e passaram assim a compor o universo de problemas da disciplina Pesquisa Operacional. Dentre os modelos primordiais e os mais recentes, destacam-se os trabalhos de Richard Cantillon, Von Thünen, Alfred Weber, Walter Cristaller e August Lösch, entre outros [14]. Estes modelos aprofundam o estudo da chamada Teoria de Localização e foram desenvolvidos principalmente para propor a melhor localização de centros produtivos agrícolas e de indústrias com base nos custos de produção e de transporte.

Como exemplo, pode-se destacar o modelo de Von Thünen que, em 1926 [14], representou o problema de localização através de círculos concêntricos (Figura 14), indicando a importância do custo do transporte dos produtos agrícolas na composição dos preços finais e, através do seu modelo, demonstrava a influência da localização.

Thünen considerou o custo do transporte como o único fator a diferenciar o custo de produção, sem considerar a influência de variáveis locais no preço como, por exemplo, as condições climáticas ou do solo. Por outro lado, o modelo de Thünen considera a tipificação dos produtos, perecíveis ou mais resistentes, para determinar a localização mais adequada dos centros produtivos. Como ilustração do uso do modelo de Thünen, tal se aplica para a determinação de cinturões (*belts*) de produção agrícola, indicando o melhor produto para uma determinada faixa de distância em relação a um centro de consumo.

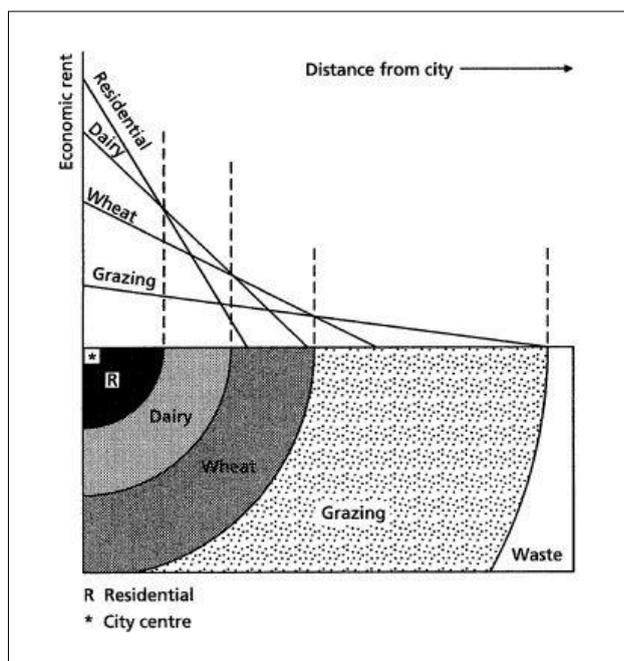


Figura 14 – Modelo de Círculos Concêntricos de Von Thünen [27]

Weber, em 1909 [14], desenvolveu um modelo que tratava o fator locacional como variável do custo de localização. Weber estudou os custos de transporte de insumos e de produtos acabados, associados aos custos de produção e vantagens associadas à aglomeração de indústrias de um mesmo tipo numa mesma região, compondo assim um triângulo locacional (Figura 15).

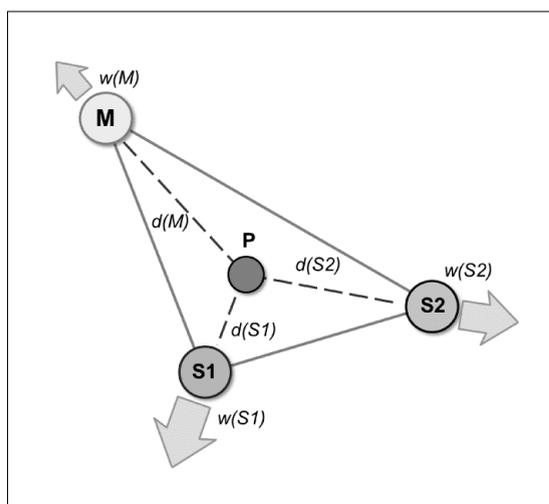


Figura 15 – Triângulo Locacional de Weber [28]

M , $S1$ e $S2$ representam o mercado e a origem dos insumos. P representa o custo total.

O custo ótimo estará localizado dentro do triângulo locacional.

Em 1940 [14] Lössch propôs um novo modelo para o planejamento eficiente equilibrando as variáveis espaciais para maximizar o lucro (e não reduzir custos), desenvolvendo o que chamou de Cone de Demanda (Figura 16). O modelo de Lössch não incorpora o estudo da localização de concorrentes e como premissa assume que a produção é capaz de atender a demanda.

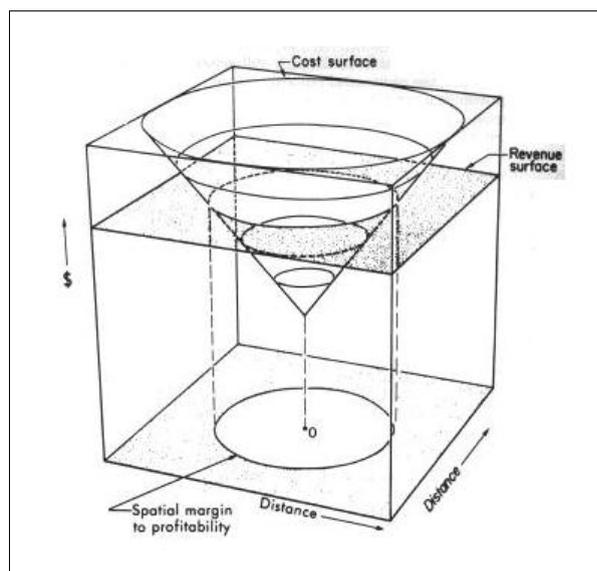


Figura 16 – Cone de Demanda de Lössch [29]

Lössch também realizou estudos em que a escolha de localização também deveria considerar o fator comportamental do consumidor, e não somente variáveis objetivas [30]. O consumidor e fatores correlatos ao comportamento do mercado, e até mesmo políticos, podem ter maior influência no lucro ou custos das empresas e modelos mais sofisticados devem ponderar cenários comparativos dadas as alternativas da situação.

Os modelos descritos e outros ainda que aprofundaram o estudo da Localização de Instalações oferecem uma grande base de conhecimento para a construção de modelos complexos que, após o advento da computação na segunda metade do Século XX, puderam ser mais bem explorados com as técnicas matemáticas e algoritmos computacionais em plataformas com grande capacidade de processamento, por exemplo, com utilização de algoritmos evolutivos. Mais recentemente, o avanço dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem potencializado os resultados dos métodos e modelos de Pesquisa Operacional voltados para a otimização de rotas e alocação espacial de recursos.

Em relação ao tema Localização de Instalações, o objetivo deste trabalho é expor as origens do tema, identificando as bases científicas e definindo o campo de estudos que envolve a alocação de bases e equipes operacionais. A seguir são apresentados alguns aspectos sobre o estado da arte na utilização de algoritmos evolutivos para resolução de problemas em Localização de Instalações.

3.4. Estado da Arte em Localização de Instalações

A pesquisa científica voltada para a resolução dos problemas de Localização de Instalações com a utilização de algoritmos evolutivos é relativamente recente. Os avanços em pesquisas no tema basicamente ocorreram nas últimas décadas [23], apoiados na melhoria da capacidade de processamento dos computadores atuais.

A Localização de Instalações abrange uma classe extensa de problemas em Pesquisa Operacional [31]. Especificamente, neste trabalho, é abordado um problema do tipo *Uncapacited Facility Location Problem* [32], que envolve a localização de um número indeterminado de instalações para atender uma demanda de mercado, e não há limitação de capacidade nas instalações, ou seja, as instalações são dimensionadas de forma a atender toda a demanda. Os pontos que podem suportar a localização das instalações são predeterminados numa área de abrangência de uma rede de rodovias, bem como os mercados a serem atendidos têm sua demanda discretamente representada na abrangência. Por outro lado, *Capacited Facility Location Problems* possuem uma restrição adicional, pois todo o conjunto de instalações não é suficiente para o atendimento da demanda. No primeiro caso, entretanto, a distinção entre os modelos atuais para a solução dos problemas está justamente na sofisticação aplicada para o dimensionamento das instalações sem restrições orçamentárias, tecnológicas ou físicas [32].

Alternativamente, os problemas de *Uncapacited/Capacited Facility Location Problems* são genericamente classificados como *P-mediam Problems* [32], que trata simplificadaamente o problema de localização de P instalações para atendimento de um conjunto de consumidores, de forma a minimizar a somatória das distâncias entre as instalações e consumidores. A notação matemática para a quantidade de soluções possíveis para *P-Mediam Problems* mostra o desafio para a resolução dessa classe de problemas, classificados como *NP-Completo*. Para um conjunto de

N consumidores a serem atendidos por P instalações, a quantidade de possibilidades (configurações possíveis das instalações) é dada por:

$$\binom{N}{P} = \frac{N!}{P!(N-P)!}$$

Se tomarmos como exemplo $N=20$ e $P=5$, teremos 15.504 possibilidades. Se tomarmos $N=50$ e $P=10$, teremos aproximadamente 10^{10} possibilidades e assim ocorre a “explosão” combinatória que dificulta a utilização de métodos de programação inteira para a resolução dessa classe de problemas. Dessa forma, algoritmos evolutivos têm sido cada vez mais desenvolvidos e aplicados para a resolução de problemas em Localização de Instalações.

No trabalho detalhado nos capítulos seguintes, a utilização de algoritmo evolutivo é um artifício fundamental para a resolução do problema de alocação de bases e equipes operacionais em distribuição de energia elétrica. O desenvolvimento do modelo de otimização que, além de permitir a escolha das melhores localizações que minimizam o custo total dos deslocamentos, dimensiona a quantidade de equipes necessárias para o atendimento da demanda, de forma eficiente, é um importante aspecto deste trabalho e uma contribuição relevante para a área de distribuição de energia elétrica, baseado em extenso trabalho de levantamento de dados e definição de premissas.

Uma grande variedade de algoritmos evolutivos têm sido desenvolvida para a resolução de problemas *NP-Completo*s. Alguns, no entanto, podem ser mais apropriados para *P-mediam Problems* em Localização de Instalações. A principal vantagem que um algoritmo pode oferecer, e que está diretamente associada com o tempo de processamento de máquina, é a capacidade do algoritmo de evitar “estacionar” em soluções ótimas locais, proporcionando a evolução do resultado para que a solução final obtida seja de fato a solução ótima global, ou esteja muito próxima disso.

A heurística associada aos algoritmos evolutivos pode também ser classificada em dois grupos: heurística que parte de um conjunto vazio de alternativas (exemplo, heurística *Greedy*), ou que requer uma solução inicial factível e busca soluções em torno dessa solução (heurística *Interchange*). Uma combinação entre as duas heurísticas exemplificadas têm sido frequentemente utilizada para a resolução de *P-*

mediam Problems e também para avaliar a eficiência de técnicas meta-heurísticas. Outros algoritmos desenvolvidos e utilizados são: Heurística Lagrangiana, Busca Tabu, *Variable Neighborhood Search*, Busca Genética, *Scatter Search*, *GRASP com Path Relinking*, *Simulated Annealing*, *Heuristic Concentration*, *Ant Colony Optimization* e Redes Neurais, conforme mostra a Figura 17 [31].

Type	Heuristic	References
CH	Greedy	Kuehn & Hamburger (1963), Whitaker (1983).
	Stingy	Feldman <i>et al.</i> (1966), Moreno-Pérez <i>et al.</i> (1991).
	Dual ascent	Galvão (1977, 1980).
	Hybrids	Moreno-Pérez <i>et al.</i> (1991), Captivo (1991), Pizzolato (1994).
LS	Alternate	Maranzana (1964).
	Interchange	Teitz & Bart (1968), Whitaker (1983), Hansen & Mladenović (1997), Resende & Warneck (2003), Kochetov & Alkseeva (2003).
MP	Dynamic programming	Hribara and Daskin (1997).
	Lagrangian relaxation	Cornuejols <i>et al.</i> (1977), Mulvey & Crowder (1979), Galvão (1980), Beasley (1993), Daskin (1995), Senne & Lorena (2000), Barahona & Anbil (2000), Beltran <i>et al.</i> (2004).
MH	Tabu search	Mladenovic <i>et al.</i> (1995, 1996), Voss (1996), Rolland <i>et al.</i> (1996), Ohlemüller (1997) Salhi (2002), Goncharov & Kochetov (2002).
	Variable neighborhood search	Hansen & Mladenović (1997), Hansen <i>et al.</i> (2001), García-López <i>et al.</i> (2002), Crainic <i>et al.</i> (2004).
	Genetic search	Hosage & Goodchild (1986), Dibbie & Densham (1993), Moreno-Perez <i>et al.</i> (1994), Erkut <i>et al.</i> (2001), Alp <i>et al.</i> (2003).
	Scatter search	García-López <i>et al.</i> (2003).
	Simulated Annealing	Murray & Church (1996), Chiyoshi & Galvão (2000), Levanova & Loresh (2004).
	Heuristic concentration	Rosing <i>et al.</i> (1996), Rosing & ReVelle (1997), Rosing <i>et al.</i> , (1999).
	Ant colony	Levanova & Loresh (2004).
	Neural Networks	Domínguez Merino and Muñoz Pérez (2002), Domínguez Merino <i>et al.</i> (2003).
	Hybrids	Resende & Warneck (2004).
	Other	Dai & Cheung (1997), Taillard (2003), Kochetov <i>et al.</i> (2004).

Figura 17 – Heurísticas aplicadas a *P-mediam Problems* [31]

Tipos na figura: CH – *Constructive Heuristics*, LS – *Local Search*, MP – *Mathematical Programming*, MH – *Meta-heuristics*.

Neste trabalho, será utilizado o algoritmo *Scatter Search*, que se baseia num conjunto de referência de boas soluções de tamanho moderado, que é selecionado dentre uma população maior de soluções. Esse conjunto é então iterativamente gerado e atualizado na tentativa de intensificar e diversificar a busca. Um

espaçamento de controle entre as soluções é utilizado para evitar o “estacionamento” do algoritmo num ótimo local [33]. Outras propriedades do algoritmo *Scatter Search* são detalhadas no capítulo 5 (Desenvolvimento da Metodologia).

4. METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE BASES E EQUIPES OPERACIONAIS

4.1. Visão Geral

A metodologia para alocação de bases e equipes operacionais baseia-se em modelo de otimização e na definição das premissas operacionais que alimentam o modelo, basicamente (Figura 18): informações de demanda de serviços e recursos operacionais (pessoas e equipes), infraestrutura predial e de tecnologia da informação, veículos (frota) e deslocamentos.

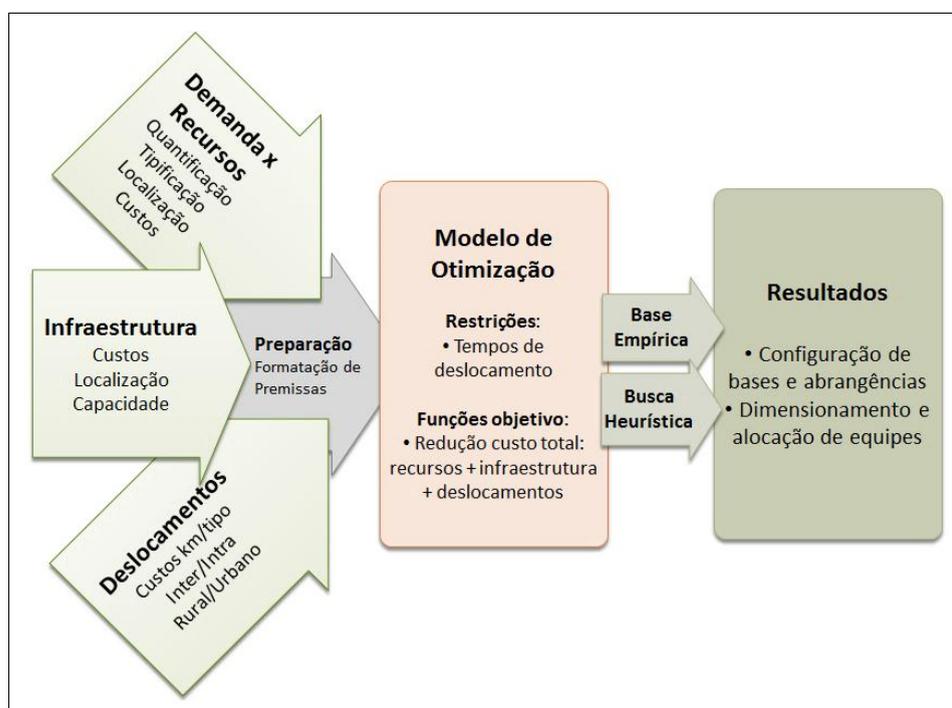


Figura 18 – Visão Geral da Metodologia

O modelo é formulado para a resolução do problema real de alocação de bases e equipes operacionais sob a abordagem da Localização de Instalações, sendo considerados os modelos tradicionais e as técnicas de resolução aplicáveis. O modelo proposto neste trabalho pode ser entendido como uma adaptação dos modelos estudados, com utilização de técnicas de resolução existentes, para que seja aplicado no âmbito das empresas de distribuição de energia elétrica que buscam maior eficiência operacional.

O levantamento de dados de demanda e recursos é componente da metodologia e requer precisão para garantir a efetividade dos resultados. O desenvolvimento deste

trabalho detalha o modo de preparação e formatação dos dados. Os dados de demanda e recurso são utilizados não somente para alimentar diretamente o modelo, como também são utilizados para a definição de premissas operacionais como tempos de execução de atividades e taxas de absenteísmo.

As informações de infraestrutura e deslocamentos requerem um extenso trabalho de coleta, tratamento e análise de dados, com utilização de técnicas de regressão linear e clusterização, cujas informações alimentam o modelo e igualmente suportam a definição de premissas e equações de custo.

A técnica de resolução aplicável é definida conforme o modelamento do problema e será mais explorada no capítulo 5 (Desenvolvimento da Metodologia). Além do algoritmo computacional, a metodologia considera a resolução do problema com base no conhecimento empírico do processo de distribuição de energia elétrica. Os resultados proporcionados pela aplicação da metodologia são analisados no capítulo 6 (Estudo de Caso).

4.2. Descrição do Problema

As empresas distribuidoras de energia elétrica buscam melhorar seu desempenho operacional e financeiro. Esse desafio reside em grande parte na gestão dos recursos operacionais que, bem alocados e aproveitados, proporcionam maior eficiência para as empresas.

A alocação de bases e equipes operacionais é uma decisão estratégica do negócio das empresas e é influenciada por uma série de fatores diretos e indiretos, qualitativos e quantitativos. A alocação de bases e equipes está voltada para o atendimento da demanda de serviços, a expansão, preservação e operação do sistema elétrico, e exige uma infraestrutura predial e de veículos adequada para o desempenho das atividades, bem como ferramentas e equipamentos apropriados.

Como descrito no capítulo 2 (Contextualização), bases operacionais são posicionadas em localidades (centros urbanos) e possuem uma determinada área de abrangência, atendendo outras localidades. Podem existir níveis de abrangência se considerada a segregação de frentes de trabalho por tipo de demanda, por exemplo. Numa área metropolitana, a definição de localidade pode ser alterada para sub-regiões que concentram uma determinada demanda e possuem corredores de

acesso bem definidos. Assim, a escolha sobre a alocação de uma base numa localidade (ou sub-região) pode ser binária:

0, não tem base operacional;

1, tem base operacional.

Como consequência da escolha, dadas as premissas e restrições aplicáveis no contexto da distribuidora, a quantidade de equipes e a abrangência da base devem ser determinadas. Nesse ponto, o problema admite maior complexidade, pois a escolha de uma base é em geral condicionada à escolha de outras bases para o atendimento da demanda de serviços em uma região geográfica maior (área de concessão). Uma empresa que distribui energia elétrica para N localidades (ou a totalidade de localidades somadas às sub-regiões), em situações extremas, pode escolher atender a demanda de serviços da área de concessão com uma única base operacional ou com N bases (o universo de N poderá ser ainda maior se considerada localidades próximas, porém fora da área de concessão).

Cada escolha de configuração das bases requer também uma configuração de abrangências, dimensionamento adequado de equipes e toda infraestrutura necessária, implicando assim em custos operacionais correspondentes. A somatória dos custos (pessoal, infraestrutura, veículos/deslocamentos) atribuídos a cada base resultará no custo operacional total. Também como descrito no capítulo 2 (Contextualização), os custos operacionais podem ser fixos ou variáveis, sendo dados como função direta dos deslocamentos necessários para o atendimento da demanda de serviços, entre outros fatores, detalhados a seguir.

A solução para o problema de alocação de bases operacionais aqui proposto resume-se à escolha dos valores binários de um conjunto de 1 a N variáveis, tal que o resultado proporcionado pelo conjunto é ótimo e oferece o menor custo operacional total. A solução escolhida respeita as restrições de tempo de deslocamento máximo entre as localidades (implícitas no modelo), usa as premissas que definem as condições operacionais (infraestrutura preexistente, custos fixos, tipos de demanda) e garante o atendimento de toda a demanda de serviços.

Um aspecto importante é que os custos relacionados aos deslocamentos têm papel fundamental na escolha das bases e abrangências. Dada uma demanda de serviços e uma configuração de bases candidata, para cada localidade, o modelo calcula a

quantidade de deslocamentos necessários (e os custos associados) para que a demanda seja atendida, e então escolhe a base de menor custo e constrói as abrangências.

A quantidade de deslocamentos implica no dimensionamento de equipes (pessoal) na base a partir da qual se originam os atendimentos. A somatória dos custos de deslocamentos, pessoal e infraestrutura para atendimento de uma abrangência (incluindo a localidade onde está localizada a base) oferece o custo total da base. A somatória dos custos das bases oferece o custo total. O modelo assim busca o ponto de equilíbrio entre os custos segregados (deslocamentos, pessoal e infraestrutura) que minimiza o custo total pela escolha das bases (quantidade e localização), definindo as melhores áreas de abrangência.

A função objetivo do problema minimiza o custo total como função dos custos de infraestrutura, deslocamentos e pessoal, restrito à condição do tempo mínimo de deslocamento. As variáveis de decisão compõem um vetor binário de N elementos, cujos valores produzem a solução otimizada, encontrada com a utilização de algoritmo evolutivo.

O problema é assim caracterizado como um caso de Localização de Instalações, sendo limitado o espaço da solução à quantidade de localidades da área de concessão de uma distribuidora. Cabe observar que o problema pode ser modelado de forma simplificada somente para a determinação da localização ótima das bases sob o aspecto da redução dos custos de deslocamentos. Neste trabalho, no entanto, busca-se minimizar o custo total e através do modelo definir toda estrutura operacional, em termos de bases, abrangências, quantidade de diferentes tipos de equipes, infraestrutura e recursos necessários. O problema dessa forma pode ser entendido como um caso derivado dos modelos de Localização de Instalações, estudados no capítulo anterior.

O problema descrito configura-se também como um caso de otimização combinatória do tipo *NP-Completo* [31], em que uma solução candidata pode ser verificada rapidamente em tempo polinomial, porém não há um algoritmo eficiente para encontrar a solução ótima global (programação Inteira não é aplicável em casos em que ocorre “explosão” combinatória). O modelo do problema é desenvolvido para resolução através de algoritmo evolutivo que, embora não ofereça a solução ótima

global, pode oferecer soluções otimizadas de custo e satisfazem as condições num tempo de processamento razoável ou até atingir um limite preestabelecido de quantidade de iterações.

4.3. Levantamento de Dados

A demanda de serviços e atividades executadas em campo pode ser considerada a principal variável de entrada do modelo. A forte regulamentação do setor exige que os registros dos serviços e atividades sejam periodicamente informados para a ANEEL. Assim, é possível assumir que todas as empresas do setor possuem as informações de demanda. A dificuldade reside no acesso e extração dos dados em diferentes plataformas de sistemas de informação (bases de dados), com diferentes modelos de dados.

Todos os dados devem ser obtidos no nível das localidades, separados entre ambiente urbano e rural. A quantidade de eventos (atividades ou serviços) e os tempos de execução são variáveis de entrada do modelo, embora os tempos possam ser definidos pelas premissas.

Os dados de demanda operacional são aqueles usados para a apuração dos indicadores DEC e FEC. As quantidades dos eventos por tipo de defeito e por localidade são requisitos, bem como o tempo médio de atendimento, classificados em urbano e rural. Da mesma forma, os dados da demanda de serviços técnicos comerciais (STC) são apurados para consolidação de indicadores de atendimento ao cliente, exigidos pela ANEEL.

Os recursos aplicados no atendimento da demanda de expansão e preservação (obras e manutenção) são aqueles investimentos (*CAPEX*) que compõem a Base de Remuneração Regulatória (BRR) das empresas. Logo, considerando o modelo de dados previsto pelo Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (MCPSE), os dados podem ser obtidos e formatados para entrada no modelo. A diferenciação entre urbano e rural não foi considerada, pois, em se tratando de veículos maiores para o atendimento da demanda, a velocidade de deslocamento não sofre grande alteração.

A confiabilidade dos dados obtidos está relacionada com o correto apontamento dos serviços e atividades executados em campo. O procedimento de apontamento é

realizado pelas equipes de campo e sua qualidade deve ser gerenciada para evitar distorções na apuração de indicadores e em dados da BRR, entre outros motivos operacionais e financeiros.

O apontamento em campo pode acontecer de forma manual (feito em papel e posteriormente inserido em sistemas de informação) ou através do uso de dispositivos móveis com sistemas embarcados que, ao final das atividades, transmitem os dados diretamente para os sistemas de informação centralizados das empresas. O nível de automação de todo o processo que envolve o apontamento é fundamental para a confiabilidade das informações, bem como o uso das melhores práticas em gestão da qualidade.

4.4. Premissas Operacionais

4.4.1. Tempos de Execução

No contexto deste trabalho, a produtividade é a relação entre a produção de uma equipe (serviços e atividades) e o tempo necessário para sua execução, ou seja, uma medida do quanto é produzido por hora ou dia, dependendo da variável analisada. O tempo de execução não considera os tempos de deslocamento de ida ou volta para a realização do atendimento.

A quantidade de serviços executados por localidade (produção) pode ser obtida com boa confiabilidade. Os tempos de execução não são requisitos do apontamento para todos os tipos de atividades. Os tempos registrados nas atividades de atendimento da demanda operacional em geral possuem boa qualidade, pois servem para a composição de indicadores (DEC), mas o mesmo não se aplica à demanda de STC e de expansão e preservação.

Para a demanda operacional, a grande variação nos tempos das ocorrências sugere a adoção de tempos médios de execução. Para a composição das médias, os dados da empresa do estudo de caso são agrupados num 3º nível de abrangência, que é o de gestão administrativa (supervisões), a fim de reduzir a distorção ocasionada por grandes eventos ou particularidades do atendimento.

Para os serviços de STC, são considerados os tempos definidos nas normas operacionais da empresa [34] [35]. Adicionalmente, utilizou-se um tempo de interação com o cliente para informação e orientação, que ocorre a cada atividade.

Para os serviços de expansão e preservação são adotados os tempos de laboratório da empresa do estudo de caso para as diversas atividades e tipos de equipes.

4.4.2. Horário de Trabalho

O horário de trabalho regular considerado é de 8 horas diárias para as equipes em escala 5x2, e de 7,5 horas diárias para as equipes em escala 6x3.

O horário de início e fim da jornada de trabalho não foi considerado neste trabalho por motivo de simplificação do modelo. O modelo ótimo para maximização da utilização da força de trabalho deve considerar o estudo da sazonalidade diária dos eventos (principalmente os eventos acidentais), considerando sua aleatoriedade e probabilidade estatística de ocorrência ao longo das horas do dia. O horário de início das escalas das equipes deve ser programado de forma que a maior parte da força de trabalho esteja disponível nos períodos de maior probabilidade de ocorrência de demanda operacional (acidental ou programada), considerando que as demandas de STC e de expansão e preservação podem ser planejadas para a execução diária.

4.4.3. Redutores de Homem-Hora

Redutores de homem-hora são os fatores que reduzem a disponibilidade de mão de obra (homem-hora de equipes) para execução das atividades. Neste trabalho, são considerados, além do tempo despendido em deslocamentos ao longo do dia de trabalho, o absenteísmo, férias e o tempo de preparação na base (que ocorre no início ou fim da jornada).

Absenteísmo e Férias

Absenteísmo é a taxa de ausência de pessoas para o trabalho. São consideradas as faltas no trabalho ocasionadas por decisão dos empregados, por necessidades particulares dos mesmos. Férias trabalhistas correspondem ao período regulamentar de 30 dias de descanso no ano.

O absenteísmo e férias, como mostrado no capítulo 5 (Desenvolvimento da Metodologia), são aplicados sobre a quantidade final de pessoas dimensionada pelo modelo, minimizando o problema de arredondamentos e causando o aumento da necessidade de pessoas.

Tempo de Preparação na Base

Antes do início das atividades diárias de campo ocorre a preparação, que envolve a reunião com os supervisores e planejadores para o detalhamento dos serviços e instruções gerais, e também a preparação e carregamento dos veículos com os materiais a serem utilizados. O tempo de preparação (30 minutos) foi diretamente descontado do horário de trabalho das equipes (premissa de entrada).

4.4.4. Aumentadores de Homem-Hora

São os fatores que aumentam a disponibilidade da força de trabalho para execução de atividades. No caso, são considerados volumes de horas extras abatidos da quantidade (em horas) de demanda operacional.

4.4.5. Velocidades, Tempos e Distâncias

Para cálculo dos custos e tempos associados aos deslocamentos, são definidas premissas de velocidade e distâncias.

Deslocamento Interlocalidades

São consideradas as distâncias entre cidades fornecidas pela *API Google Maps*. As velocidades médias (por tipo de veículo) são definidas considerando base de dados histórica do sistema de gestão de frota da empresa.

Deslocamento Intralocalidade

São consideradas as distâncias médias dos deslocamentos nos ambientes rural e urbano, bem como as velocidades médias verificadas através do sistema de gestão de frota.

4.4.6. Custos por Quilômetro

O custo por quilômetro por tipo de veículo também está baseado em dados históricos do sistema de gestão da empresa do estudo de caso, considerando as médias por tipo de veículo no 3º nível de abrangência (gestão).

Cabe destacar que os custos de combustível e de manutenção têm variação significativa conforme a localidade (ou região) onde o custo é atribuído. Localidades menores, em geral, possuem custo maior para esses itens de consumo, o que motiva a obtenção das médias de custo em abrangência superior.

4.5. Descrição do Modelo de Otimização

O modelo de otimização foi constituído por formulação matemática no padrão de função objetivo (*fitness function*) do custo total com restrições implícitas. A função do custo total é composta pelas premissas operacionais e funções secundárias de custo. Dada a extensão da formulação matemática, consequência da representação em detalhes do problema real, e que é apresentada a seguir neste trabalho, o modelo de otimização pode ser mais facilmente compreendido em etapas, que demonstram como as premissas operacionais e dados de entrada são utilizados para a composição dos custos a partir da escolha de bases.

A Figura 19 apresenta as etapas e passos que compõem o modelo. Na sequência, a descrição dos componentes com foco no relacionamento entre as variáveis e equações. A formulação matemática, o Desenvolvimento da Metodologia (capítulo 5) e o Estudo de Caso (capítulo 6) ajudarão na compreensão dos aspectos do modelo.

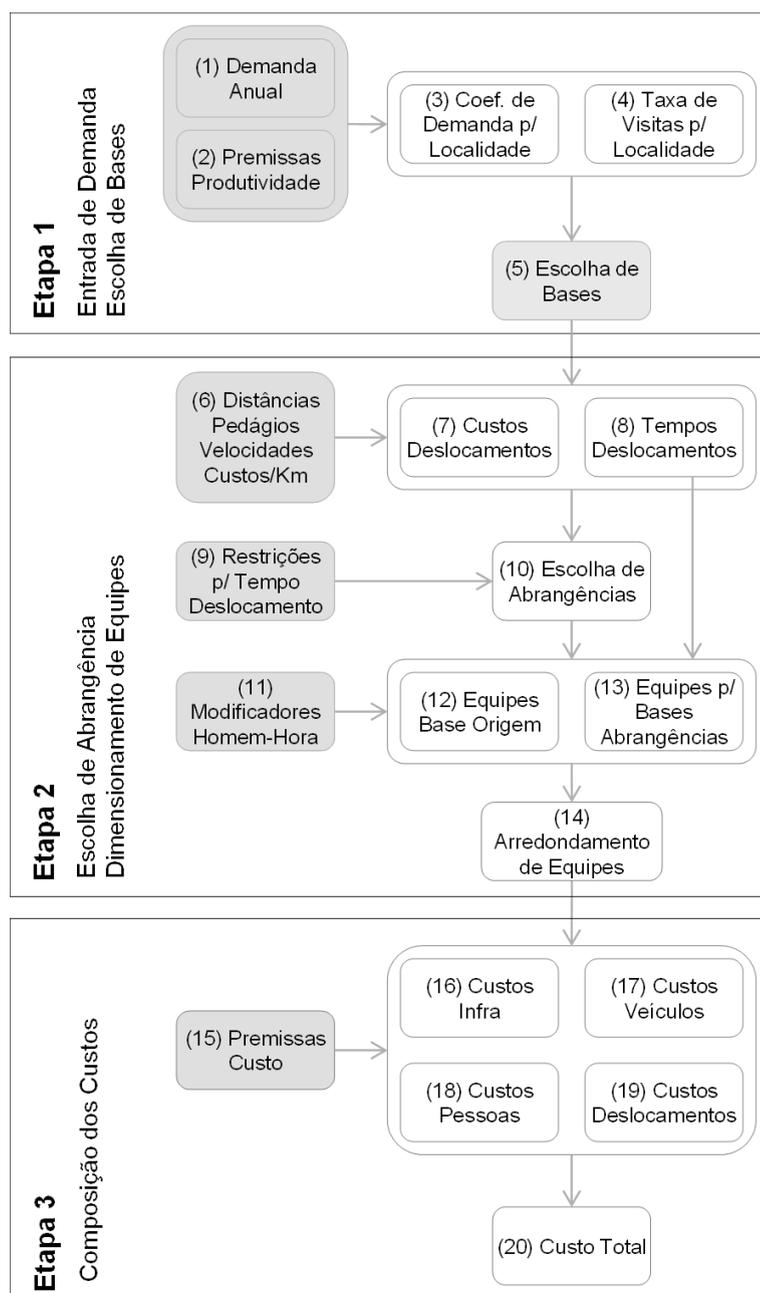


Figura 19 – Modelo de Otimização – Etapas e Passos

4.5.1. Etapa 1 – Entrada de Demanda e Escolha de Bases

Passo 1) Demanda anual (por localidade) – É a principal variável e base para o cálculo dos coeficientes de demanda e taxas de visita por localidade. A demanda anual é representada em horas ou unidades de serviço (US) e segregada por tipo (operacional, STC, expansão e preservação).

Passo 2) Premissas de produtividade – Originadas a partir de dados históricos, normas operacionais ou de medições em campo, definem a

quantidade de serviços (demanda) que é executada por um determinado tipo de equipe por dia para atendimento de uma demanda correspondente.

Passo 3) Coeficiente de demanda por localidade – Para cada tipo de demanda, com base na produtividade das equipes, são definidas as quantidades anuais de demanda por tipo e por localidade. O coeficiente é uma medida relativa da demanda em relação à produção esperada para cada tipo de equipe, por localidade.

Passo 4) Taxa de visitas por localidade – São calculadas as quantidades de deslocamentos interlocalidades necessários para o atendimento da demanda numa localidade por ano, por tipo de veículo. As taxas de visita são utilizadas para dimensionar custos de deslocamentos entre as localidades.

Passo 5) Escolha de bases – É aplicado no modelo uma proposta de solução (vetor binário) pelo algoritmo evolutivo, que serve de base para o cálculo dos deslocamentos e definição de abrangências.

4.5.2. Etapa 2 – Escolha de abrangência e dimensionamento de equipes

Passo 6) Distâncias, pedágios, velocidades e custos/km– As premissas de deslocamentos e veículos alimentam o modelo para cálculo dos custos de deslocamentos e tempo consumido em viagem. As distâncias e custos de pedágios compõem uma matriz entre todas as localidades. As velocidades e custos/km são fornecidos por tipo de veículo. As velocidades são diferenciadas para os ambientes urbano e rural.

Passo 7) Custos de deslocamentos – São calculados os custos de deslocamentos entre uma base escolhida e todas as demais, considerando as taxas de visita, distâncias e custos/km por localidade e por tipo de veículo.

Passo 8) Tempos de deslocamentos – São calculados os tempos de deslocamentos entre uma base escolhida e todas as demais, considerando as taxas de visita, distâncias e velocidades por localidade e por tipo de veículo.

Passo 9) Restrições para tempo de deslocamento – Restringe a escolha de bases em cujas abrangências o tempo de deslocamento entre as localidades (base origem e localidades atendidas) supera um valor limite, comum a todas as localidades. Tal restrição é utilizada para garantir a qualidade do

fornecimento, evitando que grandes deslocamentos resultem em grandes períodos de desligamento do sistema elétrico ocasionados por eventos acidentais, e foi inserida implicitamente no modelo através da penalização do custo.

Passo 10) Escolha de abrangências – Para cada localidade, o modelo seleciona a base origem que apresenta menor custo de deslocamentos. As localidades que possuem a mesma base origem formam uma abrangência.

Passo 11) Modificadores de homem-hora – São premissas que aumentam ou reduzem a capacidade em homem-hora disponível para realização das atividades (horas extras, absenteísmo). São aplicadas diretamente sobre a demanda de serviços em homem-hora, no cálculo de equipes necessárias, ou após o dimensionamento de equipes das bases.

Passo 12) Equipes para a base origem – O modelo calcula a quantidade de equipes na base origem para atendimento da demanda de serviços na base origem, apenas considerando as premissas de tempo de deslocamento intralocalidade que acrescentam a necessidade no homem-hora total (o tempo consumido em deslocamento aumenta a necessidade de equipes).

Passo 13) Equipes para as bases da abrangência – O modelo calcula a quantidade de equipes necessárias na base origem para atendimento da demanda das demais localidades na abrangência, considerando os tempos de deslocamento inter e intralocalidade para aumento da quantidade de equipes necessária.

Passo 14) Arredondamento de equipes – O modelo realiza o ajuste da necessidade de equipes considerando que a quantidade de equipes calculada nos passos anteriores é fracionada. O ajuste é feito considerando a multifuncionalidade e tipos de equipes adequados para cada atividade, com aproveitamento das sobras de capacidade de um tipo de equipe para atendimento da demanda primariamente atendida por outro tipo de equipe.

4.5.3. Etapa 3 – Composição de custos

Passo 15) Premissas de custo – Correspondem aos valores básicos de custo necessários para a composição do custo total, como o custo de alugueis,

ferramental e custos fixos unitários por base, equipe ou veículos. As premissas são estabelecidas a partir de análise de dados históricos e são também dados de entrada do modelo.

Passo 16) Custos de infraestrutura – São calculados os custos de infraestrutura em função da escolha de bases e do dimensionamento de equipes. O modelo aplica o custo mínimo por base e a componente variável é calculada conforme quantidade de pessoas (equipes).

Passo 17) Custos de veículos – São calculados os custos relacionados à manutenção dos veículos (documentação, seguro, manutenção preventiva). Os custos de deslocamentos são calculados separadamente.

Passo 18) Custos de pessoas/equipes – Referem-se aos custos com pessoal (eletricistas) que compõem as equipes operacionais, incluindo salário, benefícios, periculosidade, além de outros custos legais. Também inclusos os custos de ferramental próprio da equipe e equipamentos de proteção individual ou coletiva.

Passo 19) Custos de deslocamentos – São consolidados os custos de deslocamentos inter e intralocalidade, agrupados por base operacional.

Passo 20) Custo total – É a somatória dos custos segregados e detalhados anteriormente. Minimizar o custo total é o objetivo do modelo que, após realizar o processamento interno apresenta o resultado conforme variáveis de entrada (premissas e escolha de bases). O resultado obtido é avaliado pelo algoritmo evolutivo que então propõe novas soluções ou conclui sua execução com um resultado otimizado, ou com melhor solução obtida até alcançar o limite de execução (tempo de processamento ou quantidade de iterações).

4.6. Formulação do Modelo

A formulação tem início pela determinação do custo total de atendimento da demanda numa localidade e sua abrangência, e se desdobra nas demais componentes, variáveis e constantes (premissas).

A restrição foi imposta ao modelo através da penalização do custo dos deslocamentos quando tais excederem o nível de serviço requerido: tempo de

deslocamento ida e volta para uma determinada localidade superior a um dado limite. Nesse caso, como será demonstrado nas equações 15, 17 e 19, o custo do deslocamento sofre um aumento exponencial a partir do valor limite, possibilitando que o algoritmo elimine mais facilmente a combinação de bases que proporciona o resultado de custo elevado e favoreça a seleção de bases ótimas.

Abaixo a função objetivo (*fitness function*) e o desdobramento dos seus componentes.

Função objetivo:

$$\min f(xb) = \sum_{i=1}^N Ctl(xb_i) = \sum_{i=1}^N (Ctdl(xb_i) + Ctib(xb_i)) \quad (1)$$

$$0 \leq xb_i \leq 1 \in \mathbf{Z} \quad i = 1, \dots, N$$

Onde:

xb	Variável de escolha binária (<i>booleana</i>) indicativa da presença de bases naquela localidade
N	Quantidade total de localidades analisada no modelo
Ctl	Custo de atendimento da demanda da localidade e abrangências
$Ctdl$	Custo total de deslocamentos da base
$Ctib$	Custo total de infraestrutura da base

$$Ctdl = CdInterL * xb + CdIntraL \quad (2)$$

Onde:

$Ctdl$	Custo total de deslocamentos da base
$CdInterL$	Custo do deslocamento interlocalidades para atender a demanda total daquela localidade
xb	Variável de escolha binária (<i>booleana</i>) indicativa da presença de bases naquela localidade
$CdIntraL$	Custo do deslocamento intralocalidade para atender a demanda total daquela localidade

$$\begin{aligned}
Ctib = & xb(CfInfraBase + HC(CCTmargInfHC + CCTadHC) \\
& + ROUND(0,1HC)(CCTmargInfBlocoHC) + Caluguel \\
& + NveicPesados(CCTdocPes + CCTmanutPes) \\
& + NveicLV(CCTdocLV + CCTmanutLV) \\
& + NveicLM(CCTdocLM + CCTmanutLM) \\
& + NveicLeve(CCTdocLeve + CCTmanutLeve) + Cequipes)
\end{aligned} \tag{3}$$

Onde:

<i>Ctib</i>	Custo total de infraestrutura da base
<i>xb</i>	Variável de escolha binária (<i>booleana</i>) indicativa da presença de bases naquela localidade
<i>CfInfraBase</i>	Custo fixo mínimo inicial de uma base, mesmo que não tenha equipes/colaboradores
<i>HC</i>	Quantidade de eletricitas alocados na base
<i>CCTmargInfHC</i>	Constante que representa o custo fixo anual marginal que cada colaborador adiciona ao <i>CfInfraBase</i> (consumo de água, energia, insumos de limpeza)
<i>CCTadHC</i>	Constante que representa o custo anual adicional por colaborador que seja parte da base (licenças de <i>software</i>)
<i>ROUND</i>	Função arredondar para cima (inteiro, blocos de 10 <i>HC</i>)
<i>CCTmargInfBlocoHC</i>	Constante que representa o custo anual marginal de cada bloco de 10 (dez) funcionários que trabalhem na base (banheiros, bebedouros, marmiteiros – instalações de uso coletivo)
<i>Caluguel</i>	Custo anual do aluguel do prédio caso esse não seja próprio
<i>NveicPesados</i>	Quantidade total de veículos pesados alocados na base
<i>NveicLV</i>	Quantidade total de veículos de linha viva (cestas aéreas) alocados na base
<i>NveicLM</i>	Quantidade total de veículos de linha morta (cestas aéreas) alocados na base
<i>NveicLeve</i>	Quantidade total de veículos leves (pick-ups ou carros de passeio) alocados na base

<i>CCTdocPes</i>	Constante que representa o custo marginal anual de documentação e taxas de cada veículo Pesado (<i>digger</i> ou guindauto)
<i>CCTdocLV</i>	Constante que representa o custo marginal anual de documentação e taxas de cada cesta linha viva
<i>CCTdocLM</i>	Constante que representa o custo marginal anual de documentação e taxas de cada cesta linha morta
<i>CCTdocLeve</i>	Constante que representa o custo marginal anual de documentação e taxas de cada veículo leve
<i>CCTmanutPes</i>	Constante que representa o custo anual marginal de manutenção e ensaios técnicos de veículos pesados
<i>CCTmanutLV</i>	Constante que representa o custo anual marginal de manutenção e ensaios técnicos de cestas de linha viva
<i>CCTmanutLM</i>	Constante que representa o custo anual marginal de manutenção e ensaios técnicos de cestas de linha morta
<i>CCTmanutLeve</i>	Constante que representa o custo anual marginal de manutenção e ensaios técnicos de veículos leves em reais
<i>Cequipes</i>	Somatória dos custos das equipes das respectivas bases

$$CdInterL = DiasNorm \times (CdeslocInterUnitPes \times NdeslocDiaPes + CdeslocInterUnitMed \times NdeslocDiaMed + CdeslocInterUnitLev \times NdeslocDiaLev) \quad (4)$$

Onde:

<i>CdInterL</i>	Custo do deslocamento interlocalidades para atender a demanda total daquela localidade
<i>DiasNorm</i>	Quantidade de dias em que as equipes 5x2 trabalham no ano
<i>CdeslocInterUnitPes</i>	Custo individual de cada deslocamento ida e volta efetuado por veículo pesado, da base de origem até a localidade

NdeslocDiasPes

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos pesados para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

CdeslocInterUnitMed

Custo individual de cada deslocamento ida e volta efetuado por veículo médio, da base de origem até a localidade.

NdeslocDiasMed

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos médios para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

CdeslocInterUnitLeve

Custo individual de cada deslocamento ida e volta efetuado por veículo leve, da base de origem até a localidade

NdeslocDiasLeve

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos leves para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

$$\begin{aligned}
 CdIntraL = & DiasNorm(NdeslocIntraDiaPes * CdeslocIntraUnitPes \\
 & + NdeslocIntraDiaMed * CdeslocIntraUnitMed \\
 & + NdeslocIntraDiaLeve * CdeslocIntraUnitLeve)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Onde:

CdIntraL Custo do deslocamento intralocalidade para atender a demanda total daquela localidade

DiasNorm Quantidade de dias em que as equipes 5x2 trabalham no ano

NdeslocIntraDiaPes

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade em cada localidade que as equipes com veículos pesados devem efetuar para atender toda a demanda

CdeslocIntraUnitPes

Custo de cada deslocamento intralocalidade com veículo pesado na localidade

NdeslocIntraDiaMed

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade que em cada localidade que as equipes com veículos médios devem efetuar para atender toda a demanda

CdeslocIntraUnitMed

Custo de cada deslocamento intralocalidade com veículo médio na localidade

NdeslocIntraDiaLeve

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade que em cada localidade que as equipes com veículos leves devem efetuar para atender toda a demanda

CdeslocIntraUnitLeve

Custo de cada deslocamento intralocalidade com veículo leve na localidade

$$CfInfraBase = xb(CCTfixoBase + (yb \times CCTfixoObras)) \quad (6)$$

Onde:

CfInfraBase

Custo fixo mínimo inicial de uma base, mesmo que não tenha equipes/colaboradores

xb

Variável de escolha binária (*booleana*) indicativa da presença de bases naquela localidade

CCTfixoBase

Constante que representa custo anual fixo de uma base qualquer mesmo que essa não tenha nenhuma equipe/colaborador

yb

Variável binária (*booleana*) que indica se nessa base tem também equipes de expansão e preservação (valor 1) ou somente equipes para atendimento da demanda operacional e de STC (valor 0)

CCTfixoObras

Constante que representa custo anual marginal adicional por uma base abrigar também equipes de expansão e preservação

$$\begin{aligned}
HC = & (CCTpessExpLV \times NeqExpLV + CCTpessExpLM \times NeqExpLM \\
& + CCTpessDig \times NeqDig + CCTpessGui \times NeqGui \\
& + CCTpessLeve \times NeqLeve + CCTpessMed6x3 * NeqMed6x3 \\
& + CCTpessMed5x2 * NeqMed5x2) + CCThcFereAbs
\end{aligned}
\tag{7}$$

Onde:

<i>HC</i>	Quantidade de eletricitas alocados na base
<i>CCTpessExpLV</i>	Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe linha viva de expansão e preservação
<i>NeqExpLV</i>	Quantidade de equipes linha viva de expansão e preservação necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e abrangência, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
<i>CCTpessExpLM</i>	Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe linha morta de expansão e preservação
<i>NeqExpLM</i>	Quantidade de equipes linha morta de expansão e preservação necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
<i>CCTpessDig</i>	Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe <i>digger</i>
<i>NeqDig</i>	Quantidade de equipes de <i>digger</i> necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
<i>CCTpessGui</i>	Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe de guindauto
<i>NeqGui</i>	Quantidade de equipes guindauto necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos

CCTpessLeve

Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe leve

NeqLeve

Quantidade de equipes leves necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos

CCTpessMed6x3

Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe de veículo médio (cesta aérea ou de carga leve) em escala 6x3

NeqMed6x3

Quantidade de equipes médias em escala 6x3 necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos

CCTpessMed5x2

Constante que representa a quantidade de indivíduos que compõe uma equipe de veículo médio (cesta aérea ou de carga leve) em escala 5x2

NeqMed5x2

Quantidade de equipes médias de restabelecimento e comercial, em escala 5x2 necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos

CCThcFereAbs

Constante que representa a quantidade de pessoas por base necessária para cobertura de férias e/ou absenteísmo

$$\begin{aligned}
 Cequipes = & (NveicPesados \times CCTcustAnualPes) \\
 & + (NveicLV \times CCTcustAnualLV) \\
 & + (NveicLM \times CCTcustAnualLM) + (NveicLeve \\
 & \times CCTCustoAnualLeve)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Onde:

Cequipes Somatória dos custos das equipes das respectivas bases

NveicPesados

Quantidade total de veículos pesados alocados na base

CCTcustAnualPes

Constante que representa o custo anual de uma equipe pesada, considerando os salários, tributos e impostos, benefícios e outros custos envolvidos

NveicLV

Quantidade total de veículos de linha viva (cestas aéreas) alocados na base

CCTcustAnualLV

Constante que representa o custo anual de uma equipe linha viva, considerando os salários, tributos e impostos, benefícios e outros custos envolvidos

NveicLM

Quantidade total de veículos de linha morta (cestas aéreas) alocados na base

CCTcustAnualLM

Constante que representa o custo anual de uma equipe linha morta, considerando os salários, tributos e impostos, benefícios e outros custos envolvidos

NveicLeve

Quantidade total de veículos leves (pick-ups ou carros de passeio) alocados na base

CCTCustoAnualLeve

Constante que representa o custo anual de uma equipe leve, considerando os salários, tributos e impostos, benefícios e outros custos envolvidos.

$$Caluguel = xb \times zb(HC \times CCTcustoMedAlugHC) \quad (9)$$

Onde:

<i>Caluguel</i>	Custo anual do aluguel do prédio caso esse não seja próprio
<i>xb</i>	Variável de escolha binária (<i>booleana</i>) indicativa da presença de bases naquela localidade
<i>zb</i>	Variável binária (<i>booleana</i>) que indica a inexistência de um prédio próprio na localidade que atenda as demandas da respectiva base (valor 1, sim; valor 0, não)
<i>HC</i>	Quantidade de eletricitistas alocados na base

CCTcustoMedAlugHC

Constante que representa o valor médio pago de aluguel referente a cada colaborador que trabalhar numa base alugada

$$N_{veicPesados} = \sum_{i=1}^N \frac{DemPesadosLocAtendidaBase_i}{(EficienciaInter_i * EficienciaIntra_i)} \quad (10)$$

$i = 1, \dots, N$

Onde:

NveicPesados

Número total de veículos pesados alocados na base

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemPesadosLocAtendidaBase

Quantidade de veículos Pesados necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

EficienciaInter

Eficiência das equipes descontados os tempos de deslocamento interlocalidade necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

EficienciaIntra

Eficiência das equipes descontados os tempos de deslocamento intralocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

$$N_{veicLV} = \sum_{i=1}^N \frac{DemLVLocAtendidaBase_i}{(EficienciaInter_i * EficienciaIntra_i)} \quad (11)$$

$i = 1, \dots, N$

Onde:

NveicLV

Número total de veículos de linha viva (cestas aéreas) alocados na base

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemLVLocAtendidaBase

Quantidade de veículos linha viva necessários para atendimento

da demanda de cada localidade considerando-se a configuração bases candidata

EficienciaInter

Eficiência das equipes descontados os tempos de deslocamento interlocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

EficienciaIntra

Eficiência das equipes descontados os tempos de deslocamento intralocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

$$N_{veicLM} = \sum_{i=1}^N \frac{DemLMLocAtendidaBase_i}{(EficienciaInter_i * EficienciaIntra_i)} \quad (12)$$

$i = 1, \dots, N$

Onde:

N_{veicLM} Número total de veículos de linha morta (cestas aéreas) alocados na base

N Quantidade total de localidades analisada no modelo

$DemLMLocAtendidaBase$

Quantidade de veículos linha morta necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

EficienciaInter

Eficiência das equipes descontados os tempos de deslocamento interlocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

EficienciaIntra

Eficiência das equipes descontando-se os tempos de deslocamento intralocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

$$N_{veicLeve} = \sum_{i=1}^N \frac{DemLeveLocAtendidaBase_i}{(EficienciaInter_i * EficienciaIntra_i)} \quad (13)$$

$i = 1, \dots, N$

Onde:

NveicLeve Número total de veículos leves (pick-ups ou carros de passeio) alocados na base

N Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemLeveLocAtendidaBase

Quantidade de veículos leves necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

EficienciaInter

Eficiência das equipes descontado os tempos de deslocamento interlocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

EficienciaIntra

Eficiência das equipes descontado os tempos de deslocamento intralocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata

$$N_{deslocDiaPes} = \left(\sum_{i=1}^N \text{ROUNDUP} \left(\frac{DemandaObraIndivPes_i}{CapDiariaExecPes} \right) \right) \times ProjCrescimentoLoc \quad (14)$$

$i = 1, \dots, N$

Onde:

NdeslocDiasPes

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos pesados para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

N Quantidade total de localidades analisada no modelo

ROUNDUP Função arredondar para cima (inteiro)

DemandaObraIndivPes

Análise histórica de cada uma das obras que as respectivas bases atenderam e que demandaram veículos pesados

CapDiariaExecPes

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes em veículos pesados, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

ProjCrescimentoLoc

Projeção de crescimento ou variação das respectivas localidades, em relação aos dados históricos inseridos no modelo

$$\begin{aligned}
 & CdeslocInterUnitPes \\
 & = 2 \times DistRod \times CCTkmPes \\
 & \times \left(SE \left(2 \times \left(\frac{DistRod}{VelMedPond} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. > CCTRestrTemp; \left(CCTBaseRestr \frac{DistRod}{(VelMedPond \times CCTRestrTemp)} \right); 1 \right) \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

Onde:

CdeslocInterUnitPes

Custo individual de cada deslocamento ida e volta efetuado por veículo pesado, da base de origem até a localidade

DistRod

Distância rodoviária a ser percorrida a partir da base até a respectiva localidade

CCTkmPes

Constante que representa o custo por quilômetro de cada veículo pesado

VelMedPond

Velocidade média ponderada por respectivos tipos de veículo e suas velocidades médias de deslocamento, oriundas de observação

SE

Função de verificação condicional. Retorna um valor se Verdadeiro e outro valor se Falso

CCTRestrTemp

Constante de restrição de tempo máximo de deslocamento (ida e volta)

CCTBaseRestr

Constante base de aceleração exponencial do custo do deslocamento

$$\begin{aligned}
 & NdeslocDiaMed \\
 = & \left(\sum_{i=1}^N \text{ROUNDUP} \left(\frac{DemandaObraIndivMed_i}{CapDiariaExecMed} \right) \right) \times ProjCrescimentoLoc \\
 & + \left(\text{ROUND}(0.5/0.5Max4) \left(\frac{\sum_{l=1}^N NumAtivMedComerDiario_l \times (TempoPondDeslocIntraMed_l + TempoMixCom_l)}{CapacidadeDiariaEqComMed} \right) \right) \\
 & + \left(\sum_{l=1}^N \text{MIN}(NumAtivRestMedDia_l; 4) \right) \\
 & \qquad \qquad \qquad i = 1, \dots, N \quad l = 1, \dots, N \qquad \qquad \qquad (16)
 \end{aligned}$$

Onde:

NdeslocDiasMed

Número total de deslocamentos diários de veículos médios para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

N Quantidade total de localidades analisada no modelo

ROUNDUP Função arredondar para cima (inteiro)

DemandaObraIndivMed

Análise histórica de cada uma das obras que as respectivas bases atenderam, que demandaram veículos médios (cestas ou de carga leve)

CapDiariaExecMed

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes operacionais em veículos médios, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

ProjCrescimentoLoc

Projeção de crescimento ou variação das respectivas localidades, em relação aos dados históricos inseridos no modelo

ROUND Função arredondar para cima (inteiro)/baixo nos limites dados (máximo/até 4)

NumAtivMedComerDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais (todos os tipos, uma vez que a variação estará contida no *mix* de tempo)

realizáveis por equipes em veículos médios que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades

TempoPondDeslocIntraMed

Tempo médio de deslocamento dentro das respectivas localidades para veículos médios, levando em conta o *mix* de tipos de terreno/ocupação (fatores que influenciam as velocidades médias)

TempoMixCom

Tempo de execução (sem deslocamento) de atividades comerciais, calculado pela média ponderada do *mix* de tipos de atividade, suas respectivas durações e presença nas localidades

NumAtivRestMedDia

Quantidade diária de eventos de demanda operacional (ocorrências, emergências, desligamentos acidentais)

$$\begin{aligned}
 & CdeslocInterUnitMed \\
 = & 2 \times DistRod \times CCTkmMed \\
 & \times \left(SE \left(2 \times \left(\frac{DistRod}{VelMedPond} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. > CCTRestrTemp; \left(CCTBaseRestr \frac{DistRod}{(VelMedPond \times CCTRestrTemp)} \right); 1 \right) \right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

Onde:

CdeslocInterUnitMed

Custo individual de cada deslocamento ida e volta efetuado por veículo médio, da base de origem até a localidade

DistRod

Distância rodoviária a ser percorrida a partir da base até a respectiva localidade

CCTkmMed

Constante que representa o custo por quilômetro de cada veículo médio

VelMedPond

Velocidade média ponderada por respectivos tipos de veículo e suas velocidades médias de deslocamento, oriundas de observação

SE Função de verificação condicional. Retorna um valor se Verdadeiro e outro valor se Falso

CCTRestrTemp

Constante de restrição de tempo máximo de deslocamento (ida e volta)

CCTBaseRestr

Constante base de aceleração exponencial do custo do deslocamento

NdeslocDiaLev

$$= \left(\text{ROUND} 0.5 / 0.5 \text{Max} 4 \left(\frac{\sum_{l=1}^N \text{NumAtivLeveComerDiario}_l \times (\text{TempoPondDeslocIntraLeve}_l + \text{TempoMixCom}_l)}{\text{CapacidadeDiariaEqComLeve}} \right) \right)$$

$$l = 1, \dots, N$$

(18)

Onde:

NdeslocDiasLeve

Número total de deslocamentos diários de veículos leves para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

ROUND

Função arredondar para cima (inteiro)/baixo nos limites dados (máximo/até 4)

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

NumAtivLeveComerDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais (todos os tipos, uma vez que a variação estará contida no *mix* de tempo) realizáveis por equipes em veículos leves que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades

TempoPondDeslocIntraLeve

Tempo médio de deslocamento dentro das respectivas localidades para veículos leves, levando em conta o *mix* de tipos de terreno/ocupação (fatores que influenciam as velocidades médias)

TempoMixCom

Tempo de execução (sem deslocamento) de atividades

comerciais, calculado pela média ponderada do *mix* de tipos de atividade, suas respectivas durações e presença nas localidades

CapacidadeDiariaEqComLeve

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes de atendimento comercial em veículos leves, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

$$\begin{aligned}
 & CdeslocInterUnitLev \\
 & = 2 \times DistRod \times CCTkmLeve \\
 & \times \left(SE \left(2 \times \left(\frac{DistRod}{VelMedPond} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. > CCTRestrTemp; \left(CCTBaseRestr^{\frac{DistRod}{VelMedPond \times CCTRestrTemp}}; 1 \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

Onde:

CdeslocInterUnitLev

Custo individual de cada deslocamento ida e volta efetuado por veículo médio, da base de origem até a localidade

DistRod

Distância rodoviária a ser percorrida a partir da base até a respectiva localidade

CCTkmLeve

Constante que representa o custo por quilômetro de cada veículo leve

VelMedPond

Velocidade média ponderada por respectivos tipos de veículo e suas velocidades médias de deslocamento, oriundas de observação

SE

Função de verificação condicional. Retorna um valor se Verdadeiro e outro valor se Falso

CCTRestrTemp

Constante de restrição de tempo máximo de deslocamento (ida e volta)

CCTBaseRestr

Constante base de aceleração exponencial do custo do deslocamento

$$CtotPedagiosAnual$$

$$= DiasNorm$$

$$\times \left(\sum_{l=1}^N \sum_{b=1}^N (NdeslocDiaMed_l + NdeslocDiaLev_l \right. \quad (20)$$

$$\left. + (NdeslocDiaPes_l \times CCTeixos) \right) \times CCTped_{b,l}$$

$$l = 1, \dots, N \quad b = 1, \dots, N \quad l \neq b$$

Onde:

CtotPedagiosAnual

Custo total anual de pedágios para atendimento da demanda daquela localidade

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

NdeslocDiasPes

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos pesados para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

NdeslocDiasMed

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos médios para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

NdeslocDiasLev

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos leves para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

CCTeixos

Quantidade de eixos que os veículos pesados possuem

CCTped

Somatória do valor dos pedágios referentes a carro de passeio das respectivas rotas Base-Localidade

$$NdeslocIntraDiaPes = NdeslocDiaPes + CCTobrasPequenas \quad (21)$$

Onde:

NdeslocIntraDiaPes

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade em cada localidade que as equipes com veículos pesados devem efetuar para atender toda a demanda.

NdeslocDiasPes

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos pesados para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

CCTobrasPequenas

Quantidade de pequenas obras que cada equipe executa nas respectivas localidades, após a execução da obra principal do dia

$$CdeslocIntraUnitPes = DistMediaIntraLoc \times CCTkmPes \quad (22)$$

Onde:

CdeslocIntraUnitPes

Custo de cada deslocamento intralocalidade com veículo pesado na localidade

DistMediaIntraLoc

Distância média que as equipes devem rodar dentro de cada localidade para atendimento das diferentes demandas

CCTkmPes

Constante que representa o custo por quilometro de cada veículo pesado

NdeslocIntraDiaMed

$$= NdeslocDiaMed + NumAtivRestMedDia + NumAtivMedComerDiario \quad (23)$$

Onde:

NdeslocIntraDiaMed

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade cada localidade que as equipes com veículos médios devem efetuar para atender toda a demanda

NdeslocDiasMed

Quantidade total de deslocamentos diários de veículos médios para a localidade de forma a atender integralmente as demandas

NumAtivRestMedDia

Quantidade de eventos diários relacionado ao restabelecimento ou atendimento de emergências nas respectivas localidades

NumAtivMedComerDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais realizáveis por equipes em veículos médios que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades

$$CdeslocIntraUnitMed = DistMediaIntraLoc \times CCTkmMed \quad (24)$$

Onde:

CdeslocIntraUnitMed

Custo de cada deslocamento intralocalidade com veículo médio na localidade

DistMediaIntraLoc

Distância média que as equipes devem rodar dentro de cada localidade para atendimento das diferentes demandas

CCTkmMed

Constante que representa o custo por quilômetro de cada veículo médio

$$NdeslocIntraDiaLeve = NumAtivRestLeveDia + NumAtivLeveComerDiario \quad (25)$$

Onde:

NdeslocIntraDiaLeve

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade em cada localidade que as equipes com veículos leves devem efetuar para atender toda à demanda.

NumAtivRestMedDia

Quantidade de eventos diários relacionado ao restabelecimento ou atendimento de emergências nas respectivas localidades

NumAtivMedComerDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais realizáveis por equipes em veículos médios que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades.

$$CdeslocIntraUnitLeve = DistMediaIntraLoc \times CCTkmLeve \quad (26)$$

Onde:

CdeslocIntraUnitMed

Custo de cada deslocamento intralocalidade com veículo médio na localidade

DistMediaIntraLoc

Distância média que as equipes devem rodar dentro de cada localidade para atendimento das diferentes demandas

CCTkmLeve

Constante que representa o custo por quilometro de cada veículo leve

$$NeqExpLV = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemLVLocAtendidaBase_l\right) \quad (27)$$

$l = 1, \dots, N$

Onde:

NeqExpLV Quantidade de equipes linha viva de expansão e preservação necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e abrangência, já descontado o tempo consumido por deslocamentos

ROUNDUP Função arredondar para cima (inteiro)

N Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemLVLocAtendidaBase

Quantidade de veículos linha viva necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

$$NeqExpLM = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemLMLocAtendidaBase_l\right) \quad (28)$$

$$l = 1, \dots, N$$

Onde:

- NeqExpLM* Quantidade de equipes linha morta de expansão e preservação necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
- ROUNDUP* Função arredondar para cima (inteiro)
- N* Quantidade total de localidades analisada no modelo
- DemLMLocAtendidaBase*
Quantidade de veículos linha morta necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

$$NeqDig = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemPesadosLocAtendidaBase_l\right) \quad (29)$$

$$\times CCTfatorDigGui$$

$$l = 1, \dots, N$$

Onde:

- NeqDig* Quantidade de equipes de *digger* necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
- ROUNDUP* Função arredondar para cima (inteiro)
- N* Quantidade total de localidades analisada no modelo
- DemPesadosLocAtendidaBase*
Quantidade de veículos pesados necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata
- CCTfatorDigGui*
Percentual de *diggers* em relação à somatória *digger*/guindauto

$$\begin{aligned}
 NeqGui = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemPesadosLocAtendidaBase_l\right) \times (1 \\
 - CCTfatorDigGui) \\
 l = 1, \dots, N
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

Onde:

<i>NeqGui</i>	Quantidade de equipes guindauto necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
<i>ROUNDUP</i>	Função arredondar para cima (inteiro)
<i>N</i>	Quantidade total de localidades analisada no modelo
<i>DemPesadosLocAtendidaBase</i>	Quantidade de veículos pesados necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata
<i>CCTfatorDigGui</i>	Percentual de <i>diggers</i> em relação à somatória <i>digger</i> /guindauto

$$\begin{aligned}
 NeqMed6x3 = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemRestLocAtendidaBase_l\right) \\
 \times CCTfatorEscala \\
 l = 1, \dots, N
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Onde:

<i>NeqMed6x3</i>	Número de equipes médias operacionais e de STC, em escala 6x3, necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
<i>ROUNDUP</i>	Função arredondar para cima (inteiro)
<i>N</i>	Quantidade total de localidades analisada no modelo
<i>DemRestLocAtendidaBase</i>	Quantidade de veículos médios necessários para atendimento da demanda de restabelecimento em cada localidade considerando a configuração de bases candidata

CCTfatorEscala

Percentual de escalas 6x3 frente às escalas 5x2 para atendimento da demanda de restabelecimento versus obras. O valor ideal não foi foco desse estudo, podendo também ser passível de modelagem e nova otimização

$$NeqMed5x2 = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemRestLocAtendidaBase_l\right) \times (1 - CCTfatorEscala) \quad (32)$$

$$l = 1, \dots, N$$

Onde:

NeqMed5x2

Número de equipes médias operacionais e de STC, em escala 5x2, necessárias para atender toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos

ROUNDUP Função arredondar para cima (inteiro)

N Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemRestLocAtendidaBase

Quantidade de veículos médios necessários para atendimento da demanda de restabelecimento em cada localidade considerando a configuração de bases candidata

CCTfatorEscala

Percentual de escalas 6x3 frente às escalas 5x2 para atendimento da demanda de restabelecimento versus obras. O valor ideal não foi foco desse estudo, podendo também ser passível de modelagem e nova otimização

$$NeqLeve = ROUNDUP\left(\sum_{l=1}^N DemLeveLocAtendidaBase_l\right) \quad (33)$$

$$l = 1, \dots, N$$

Onde:

<i>NeqLeve</i>	Número de equipes leves necessárias para atender à toda a demanda da localidade da base e também suas localidades atendidas, já descontado o tempo consumido por deslocamentos
<i>ROUNDUP</i>	Função arredondar para cima (inteiro)
<i>N</i>	Quantidade total de localidades analisada no modelo
<i>DemLeveLocAtendidaBase</i>	Quantidade de veículos leves necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

$$EficienciaInter = \frac{CCThorasDisponiveisDia}{(DistRod/VelMedPond)} \quad (34)$$

Onde:

<i>EficienciaInter</i>	Eficiência das equipes descontados os tempos de deslocamento interlocalidades necessários para alcançar as respectivas localidades a partir das bases da configuração candidata
<i>CCThorasDisponiveisDia</i>	Quantidade de horas disponíveis para o atendimento da demanda em um dia normal de trabalho
<i>DistRod</i>	Distância rodoviária a ser percorrida a partir da base até a respectiva localidade
<i>VelMedPond</i>	Velocidade média ponderada por respectivos tipos de veículo e suas velocidades médias de deslocamento, oriundas de observação

VelMedPond

$$= \frac{(CCTvelPesado \times NveicPesados) + (CCTvelLV \times NveicLV) + (CCTvelLM \times NveicLM) + (CCTvelLeve \times NveicLeve)}{(NveicPesados) + (NveicLV) + (NveicLM) + (NveicLeve)}$$

(35)

Onde:

VelMedPond

Velocidade média ponderada por respectivos tipos de veículo e suas velocidades médias de deslocamento, oriundas de observação

CCTvelPesado

Constante que representa a velocidade média de deslocamento de veículo pesado em rodovia na respectiva área

NveicPesados

Número total de veículos pesados alocados na base

CCTvelLV

Constante que representa a velocidade média de deslocamento de veículo Linha Viva em rodovia na respectiva área

NveicLV

Número total de veículos de linha viva (cestas) alocados na base

CCTvelLM

Constante que representa a velocidade média de deslocamento de veículo linha morta em rodovia na respectiva área

NveicLM

Número total de veículos de linha morta (cestas) alocados na base

CCTvelLeve

Constante que representa a velocidade média de deslocamento de veículo Leve em rodovia na respectiva área

NveicLeve

Número total de veículos leves (pick-ups ou carros de passeio) alocados na base

$$\begin{aligned}
 & \text{EficienciaIntra} \\
 & = \frac{CCThorasDisponiveisDia}{\left(\frac{NdeslocIntraDiaPes \times CCTtempoDeslocIntraPes + NdeslocIntraDiaMed \times CCTtempoDeslocIntraMed}{NdeslocIntraDiaLeve \times CCTtempoDeslocIntraLeve} + \right)}
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Onde:

CCThorasDisponiveisDia

Quantidade de horas disponíveis para o atendimento da demanda em um dia normal de trabalho

NdeslocIntraDiaPes

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade em cada localidade que as equipes com veículos pesados devem efetuar para atender toda à demanda

CCTtempoDeslocIntraPes

Constante que representa o tempo médio de cada deslocamento intralocalidade das respectivas localidades, com veículos pesados

NdeslocIntraDiaMed

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade em cada localidade que as equipes com veículos médios devem efetuar para atender toda à demanda

CCTtempoDeslocIntraMed

Constante que representa o tempo médio de cada deslocamento intralocalidade das respectivas localidades, com veículos médios

NdeslocIntraDiaLeve

Quantidade de deslocamentos diários intralocalidade que em cada localidade que as equipes com veículos leves devem efetuar para atender toda à demanda

CCTtempoDeslocIntraLeve

Constante que representa o tempo médio de cada deslocamento intralocalidade das respectivas localidades, com veículos leves

$$\begin{aligned}
 & \text{DemPesadosLocAtendidaBase} \\
 = & \sum_{l=1}^N \frac{(\text{DemTotObrasPesLoc} + \text{DemEmergPesadoLoc}) \times \text{ProjCrescimentoLoc}}{\text{CapDiariaExecPes}} \quad (37) \\
 & l = 1, \dots, N
 \end{aligned}$$

Onde:

DemPesadosLocAtendidaBase

Quantidade de veículos Pesados necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemTotObrasPesLoc

Demanda de expansão e preservação que devem ser atendida por veículos pesados

DemEmergPesadoLoc

Demanda de restabelecimento que devem ser atendida por veículos pesados

ProjCrescimentoLoc

Projeção de crescimento ou variação das respectivas localidades, em relação aos dados históricos imputados no modelo

CapDiariaExecPes

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes em veículos pesados, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

$$\begin{aligned}
 & \text{DemLVLocAtendidaBase} \\
 = & \sum_{l=1}^N \frac{(\text{DemTotObrasLVLoc} + \text{DemEmergLVLoc}) \times \text{ProjCrescimentoLoc}}{\text{CapDiariaExecLV}} \quad (38) \\
 & l = 1, \dots, N
 \end{aligned}$$

Onde:

DemLVLocAtendidaBase

Quantidade de veículos linha viva necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemTotObrasLVLoc

Demanda de expansão e preservação que devem ser atendida por veículos linha viva

DemEmergLVLoc

Demanda de restabelecimento que devem ser atendida por veículos de linha viva

ProjCrescimentoLoc

Projeção de crescimento ou variação das respectivas localidades, em relação aos dados históricos inseridos no modelo

CapDiariaExecLV

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes em veículos pesados, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

$$\begin{aligned}
 & \text{DemLMLocAtendidaBase} \\
 = & \sum_{l=1}^N \left(\frac{(\text{DemTotObrasLMLoc} + \text{DemEmergLMLoc}) \times \text{ProjCrescimentoLoc}}{\text{CapDiariaExecLM}} \right. \\
 & \left. + \frac{(\text{NumAtivMedComerDiario}_l \times \text{TempoMixCom}_l)}{\text{CapacidadeDiariaEqComMed}} \right) \\
 & l = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{39}$$

Onde:

DemLMLocAtendidaBase

Quantidade de veículos linha morta necessários para atendimento da demanda de cada localidade, considerando a configuração de bases candidata

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

DemTotObrasLMLoc

Demanda de expansão e preservação que devem ser atendida por veículos linha morta

DemEmergLMLoc

Demanda de restabelecimento que devem ser atendida por veículos de linha morta

ProjCrescimentoLoc

Projeção de crescimento ou variação das respectivas localidades, em relação aos dados históricos inseridos no modelo

CapDiariaExecLM

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes em veículos pesados, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

NumAtivMedComerDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais realizáveis por equipes em veículos médios que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades

TempoMixCom

Tempo de execução (sem deslocamento) de atividades comerciais, calculado pela média ponderada do *mix* de tipos de atividade, suas respectivas durações e presença nas localidades.

CapacidadeDiariaEqComMed

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes de atendimento comercial em veículos médios, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

$$\begin{aligned}
 & DemLeveLocAtendidaBase \\
 = & \sum_{l=1}^N \frac{(NumAtivLeveComerDiario_l \times TempoMixCom_l)}{CapacidadeDiariaEqComLeve} \quad (40) \\
 & l = 1, \dots, N
 \end{aligned}$$

Onde:

DemLeveLocAtendidaBase

Quantidade de veículos leves necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de bases candidata

N

Quantidade total de localidades analisada no modelo

NumAtivLeveComerDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais realizáveis por equipes em veículos leves que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades.

TempoMixCom

Tempo de execução (sem deslocamento) de atividades comerciais, calculado pela média ponderada do *mix* de tipos de atividade, suas respectivas durações e presença nas localidades.

CapacidadeDiariaEqComLeve

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes de atendimento comercial em veículos médios, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

$$= \frac{DemRestLocAtendidaBase}{\sum_{l=1}^N \frac{(NumAtivRestDiario_l \times TempoMixRest_l)}{CapacidadeDiariaEqRest}} \quad (41)$$

$l = 1, \dots, N$

Onde:

DemRestLocAtendidaBase

Quantidade de veículos médios necessários para atendimento da demanda de cada localidade considerando a configuração de base candidata

N Índice da quantidade total de localidades analisada no modelo

NumAtivRestDiario

Quantidade de ordens de serviço comerciais realizáveis por equipes em veículos leves que são ou devem ser atendidas nas respectivas localidades

TempoMixCom

Tempo de execução (sem deslocamento) de atividades comerciais, calculado pela média ponderada do *mix* de tipos de atividade, suas respectivas durações e presença nas localidades

CapacidadeDiariaEqRest

Meta de execução ou capacidade medida de execução em campo das equipes de atendimento comercial em veículos médios, considerando o cenário hipotético de zero deslocamento

$$DistRod = MIN(CCTDistKM_{b,l}) \quad (42)$$

$$b = 1, \dots, N \quad l = 1, \dots, N \quad b \neq l$$

Onde:

<i>DistRod</i>	Distância rodoviária a ser percorrida a partir da base até a respectiva localidade
<i>MIN</i>	Função que retorna o valor mínimo em uma matriz
<i>CCTDistKM</i>	Distância em quilômetros definidas entre as localidades <i>b</i> e <i>l</i>
<i>N</i>	Quantidade total de localidades analisada no modelo

Todos os valores de custo são aplicados em reais (moeda, R\$).

5. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

O modelo de otimização é desenvolvido para resolução com algoritmo evolutivo, o que é suportado pelo *software Microsoft Excel*. Assim, as etapas e os passos do modelo estão construídos em planilhas, em cujas tabelas estão estruturadas as informações, premissas e fórmulas. Toda a formulação desenvolvida está implícita no conjunto de tabelas que se relacionam através de funções matemáticas ou de busca/referência. O detalhamento a seguir traz informações complementares para o entendimento das etapas/passos do modelo e da formulação, baseado na Figura 19.

O modelo desenvolvido aplica-se à otimização da alocação de bases e equipes numa área com N localidades, considerando que N representa o conjunto de localidades de uma empresa distribuidora de energia elétrica e, portanto, deve ser um número factível para tratamento pelo algoritmo evolutivo (de dezenas a algumas centenas de localidades). Na apresentação do desenvolvimento, são utilizados fragmentos de tabelas *Excel*, que contém informações/dados do estudo de caso que será apresentado no capítulo seguinte. Como padronização, as tabelas são apresentadas em até 5 linhas (5 localidades), embora o modelo possa ser aplicado num conjunto de N localidades.

Tendo como base as etapas e passos mostrados na Figura 19, a seguir são descritos em detalhes a forma de construção de cada passo.

5.1. Etapa 1 – Entrada de Demanda e Escolha de Bases

Passo 1) Demanda Anual (por localidade)

A demanda de Expansão e Preservação é inserida no modelo em unidades de serviço (US), segregada nos tipos de equipe apropriados. O modelo pode ser utilizado para trabalhar com dados de demanda separados de *digger* e guindauto, ou a demanda de ambos os tipos somada (demanda de veículos pesados).

No estudo de caso, como é apresentado no capítulo a seguir, é utilizada a somatória da demanda, bem como um coeficiente do *mix* de utilização de *digger* e guindauto no dimensionamento de equipes pois, na prática, essas equipes podem desempenhar as mesmas atividades (com produtividade diferente) e os registros históricos possuem erros significativos sobre o veículo utilizado. Os dados de produtividade também são ponderados pelo *mix* de utilização.

A US é uma medida relativa que pode ser transformada em valores de homem-hora por equipe. Neste trabalho optou-se pela utilização da unidade que possui maior aderência com os processos da empresa e é extraída das bases de dados já no formato desejado.

Tabela 02 – Demanda de expansão e preservação

Locais	Cidade	Pesado		LV		LM	
		2012	Prevista	2012	Prevista	2012	Prevista
1	AGUAI	563,3	673,3	527,4	984,5	290,8	334,2
2	AGUAS DA PRATA	619,9	438,9	920,1	298,6	440,8	348,2
3	ALVARES FLORENCE	718,0	1100,0	304,1	436,7	371,0	646,1
4	AMERICO DE CAMPOS	957,2	834,5	430,1	515,1	440,8	455,8
5	ANDRADINA	2188,5	4673,3	1637,4	2698,2	1147,4	2392,3

Observa-se na Tabela 02 os dados relativos ao ano base da análise (2012). A projeção da demanda é realizada externamente ao modelo, como será detalhado no capítulo 6 (Estudo de Caso). O modelo contempla a opção de aplicar um fator de projeção sobre os dados de demanda carregados.

A demanda de Operacional (Técnica) e de STC é inserida no modelo no formato de homem-hora, segregada em leve e média, em correspondência ao tipo de equipe que realiza o atendimento (veículo leve ou cesta aérea). O volume de homem-hora para cada tipo de atividade é obtido através de dados históricos e informações de passo-padrão (procedimento de execução padrão) das atividades, que constam em normas operacionais da empresa [34] [35], disponíveis para o público em geral. A Tabela 03 ilustra este tratamento dos dados, com base em 2012.

Tabela 03 – Demanda Operacional e de STC

Locais	Cidade	Comercial				Técnica Leve				Técnica Médio			
		Leve		Médio		Urbano		Rural		Urbano		Rural	
		2012	Prevista	2012	Prevista	2012	Prevista	2012	Prevista	2012	Prevista	2012	Prevista
1	AGUAI	1.967,6	2.078,3	366,0	409,6	342,0	430,1	134,0	168,5	70,0	88,0	281,0	353,4
2	AGUAS DA PRATA	463,6	442,3	69,6	101,9	52,0	51,4	66,0	65,2	28,0	27,7	135,0	133,3
3	ALVARES FLORENCE	334,7	305,4	89,6	101,3	34,0	31,0	106,0	96,7	20,0	18,2	253,0	230,8
4	AMERICO DE CAMPOS	555,5	581,7	180,0	159,0	89,0	73,0	51,0	41,9	31,0	25,4	164,0	134,6
5	ANDRADINA	5.490,1	4.843,9	1.286,0	1.334,0	1.042,0	991,5	210,0	199,8	275,0	261,7	467,0	444,4

Passo 2) Premissas de Produtividade

A produtividade diária é definida como a relação entre as horas efetivas de trabalho e as horas totais disponíveis para o trabalho. No modelo, é assumido que 100% das horas disponíveis são consumidas por trabalho em campo, deslocamentos e redutores de homem-hora. As horas efetivas correspondem ao trabalho executado

por uma equipe durante o dia. O trabalho de uma equipe pode ser medido em horas ou em quantidade de atividades.

Como já apresentado, a demanda de Expansão e Preservação é trabalhada no modelo em quantidade de USs. Logo, o modelo requer premissas de conversão (horas consumidas por US e USs por equipe/dia) para calcular a necessidade de equipes (coeficientes de demanda). Os valores de produtividade em quantidade de USs são necessários para o cálculo de deslocamentos (taxas de visita).

A demanda Operacional e de STC é consolidada em horas e semelhantemente utiliza premissas de quantidade de serviços e horas consumidas por serviço (tempos padrão) para calcular necessidade de equipes, e a quantidade de serviços por equipe/dia para calcular deslocamentos. Para ambos os casos, o modelo requer premissas que delimitam o volume total de horas anuais disponíveis. Abaixo as tabelas exemplificam o desenvolvimento. As Tabelas 04 a 07 exemplificam o desenvolvimento.

Tabela 04 – Premissas de dias e horas úteis

Calendário	Valor
Dias Ano	365
Dias Úteis	247
Operacional/STC - Horas úteis/dia - Leve	7
Operacional/STC - Horas úteis/dia - Médio	7
Operacional/STC - Horas úteis/dia - Pesado	7
Expansão e Preservação - Horas úteis/dia	7

Tabela 05 – Premissas de produtividade de expansão e preservação (USs por dia)

	Dig	Gui	LM	LV
Andradina	19,44	16,52	12,94	13,13
Tres Lagoas	14,14	14,00	11,95	11,91
Teodoro Sampaio	17,63	14,62	12,03	13,44
Dracena	20,86	16,87	14,71	13,41
Votuporanga	19,29	17,54	11,70	12,81

Tabela 06 – Tempo médio de atendimento da demanda operacional (horas)

Regiao	Gerencia	SSD	Abrang	UR	Qtd Eventos	Qtd HH	Tempo Médio
CENTRO	LIMEIRA	LIM	Cliente	Rural	596	201,67	0,34
CENTRO	LIMEIRA	LIM	Cliente	Urbano	3.352	1.132,67	0,34
CENTRO	LIMEIRA	LIM	Rede	Rural	955	926,80	1,08
CENTRO	LIMEIRA	LIM	Rede	Urbano	956	785,11	0,96

Tabela 07 – Tempo médio de atendimento da demanda de STC (horas)

Locais	Cidade	Tempo Médio/Ativ	Qtd Ativ	Demanda	Atividades/dia
1	AGUAI	0,27	1535	416,9	6,21
2	AGUAS DA PRATA	0,32	363	116,5	1,47
3	ALVARES FLORENCE	0,22	281	63,1	1,14
4	AMERICO DE CAMPOS	0,24	484	117,1	1,96
5	ANDRADINA	0,30	4159	1.233,6	16,84

Passo 3) Coeficiente de Demanda por Localidade

Os coeficientes de demanda, definidos da formulação por $Dem'X'LocAtendidaBase$ (onde X indica o tipo de demanda), são derivados da demanda total e da produtividade da equipes, e indicam a quantidade de equipes necessárias para atender a demanda anual de uma localidade, conforme já apresentado. É basicamente a demanda representada em unidades de equipes/dia. Tais coeficientes são ilustrados nas Tabelas 08 a 10.

Tabela 08 – Coeficiente de demanda de expansão e preservação

Cidade	Locais	Equipes/dia		
		Pesado	LV	LM
AGUAI	1	0,07	0,14	0,04
AGUAS DA PRATA	2	0,04	0,04	0,04
ALVARES FLORENCE	3	0,11	0,05	0,08
AMERICO DE CAMPOS	4	0,08	0,06	0,06
ANDRADINA	5	0,44	0,31	0,31

Tabela 09 – Coeficiente de demanda operacional média

Locais	Cidade	Tempo Méd/Ativ	Qtd Ativ	Ativ/Dia	Temp Desloc Intra	Tempo Tot Ativ	Equipes/Dia
1	AGUAI	1,33	441,38	1,21	0,39	2,17	0,31
2	AGUAS DA PRATA	1,34	160,96	0,44	0,15	0,82	0,12
3	ALVARES FLORENCE	1,24	249,03	0,68	0,28	1,21	0,17
4	AMERICO DE CAMPOS	1,24	160,02	0,44	0,17	0,76	0,11
5	ANDRADINA	1,06	706,01	1,93	0,65	2,88	0,41

Tabela 10 – Coeficiente de demanda de STC média

Locais	Cidade	Tempo Méd/Ativ	Qtd Ativ	Ativ/Dia	Temp Desloc Intra	Tempo Tot Ativ	Equipes/Dia
1	AGUAI	0,85	527,00	2,13	0,33	1,83	0,26
2	AGUAS DA PRATA	0,85	100,00	0,40	0,07	0,35	0,05
3	ALVARES FLORENCE	0,80	136,00	0,55	0,13	0,49	0,07
4	AMERICO DE CAMPOS	0,83	265,00	1,07	0,18	0,91	0,13
5	ANDRADINA	0,82	1.903,00	7,70	1,08	6,34	0,91

Nas tabelas de exemplo, observa-se que a quantidade de equipes/dia é fracionada e é baixa para a maior parte das localidades. O sentido de trabalhar com abrangências é justamente agregar a demanda para então alocar equipes numa base que minimize o custo total. O fracionamento da demanda ainda exige o arredondamento da quantidade de equipes nas bases após a demanda ter sido agregada na abrangência.

Passo 4) Taxa de Visitas por Localidade

A taxa de visita, definida da formulação por $N_{DeslocDias}'X'$ (onde X indica o tipo de demanda), é a quantidade média de vezes no ano que uma equipe deve trabalhar numa determinada localidade para atendimento da demanda.

Como apresentado, a taxa de visita é calculada de forma semelhante para os diferentes tipos de demanda, considerando um “pacote” mínimo diário de serviços para cada tipo de equipe. No caso da demanda de Expansão e Preservação, considera-se o tamanho médio de projetos. Para demanda operacional e de STC considera o volume médio de serviços possível de execução (dadas as horas disponíveis). Em todos os casos são acrescidos aos tempos de execução os tempos de deslocamento intralocalidade, que é o deslocamento realizado dentro de uma mesma localidade. A demanda é a mesma, porém a necessidade de equipes (taxa de visitas) aumenta considerando que parte do tempo disponível será consumida com deslocamentos.

A taxa de visitas incorpora a estratégia de planejamento e execução. Um deslocamento para uma localidade só deve ser realizado quando houver um pacote mínimo de serviços a ser executado (exceto casos emergenciais). Neste trabalho, assume-se que o aproveitamento da capacidade de execução associada ao deslocamento é ótimo, e todo o modelo suporta a tomada de decisão estratégica de longo prazo. Na prática, no dia-a-dia, outros fatores podem interferir no planejamento e causam a subutilização da capacidade (problemas com materiais, intempéries, absenteísmo, emergências). As Tabelas 11 a 13 ilustram as informações referentes às taxas de visitas.

Tabela 11 – Taxa de visita de expansão e preservação

Locais	Cidade	Proj Médio (US)	Projetos/Ano	Equip/Projeto	US/Eq/Dia	Qtd Desloc/Ano
1	AGUAI	51,5	18,7	2,8	18,6	54,0
2	AGUAS DA PRATA	96,1	2,9	5,2	18,6	16,6
3	ALVARES FLORENCE	96,4	4,3	4,3	22,2	19,6
4	AMERICO DE CAMPOS	36,3	13,2	1,6	22,2	25,5
5	ANDRADINA	56,5	44,5	2,5	22,4	131,1

Tabela 12 – Taxa de visita da demanda operacional leve

Locais	Cidade	Tempo Ativ	Qtd Ativ	Demanda	Equipes/dia	Qtd Desloc Inter/Dia
1	AGUAI	0,40	1,30	191,29	0,09	1,30
2	AGUAS DA PRATA	0,40	0,32	47,12	0,03	0,32
3	ALVARES FLORENCE	0,44	0,38	61,24	0,04	0,38
4	AMERICO DE CAMPOS	0,41	0,38	57,31	0,03	0,38
5	ANDRADINA	0,37	3,43	461,70	0,23	3,43

Tabela 13 – Taxa de visita de STC leve

Locais	Cidade	Tempo Ativ	Qtd Ativ	Demanda	Equipes/dia	Qtd Desloc Inter/Dia
1	AGUAI	0,36	1.968	712,81	0,58	1,00
2	AGUAS DA PRATA	0,42	464	194,73	0,15	0,50
3	ALVARES FLORENCE	0,29	335	97,59	0,10	0,50
4	AMERICO DE CAMPOS	0,31	555	170,36	0,15	0,50
5	ANDRADINA	0,37	5.490	2.052,17	1,61	2,00

Passo 5) Escolha de Bases

A escolha de bases, conforme já detalhada, refere-se à variável que indica (ou não) a presença de uma base operacional numa determinada localidade, assumindo valor 0 (zero) caso não possuir base, e 1 (um) caso possuir, conforme ilustrado na Tabela 14. A partir dessa escolha o modelo prossegue com a determinação das abrangências e custos associados.

Tabela 14 – Escolha de bases – Entrada de dados

Cidade	Locais	DEMANDA N1	DEMANDA N2	Base S/N	Base Origem	Base Origem TXT
AGUAI	1	1.049,2	1.548,6	0	191	SAO JOAO DA BOA VISTA
AGUAS DA PRATA	2	260,2	2.035,5	1	0	N/A
ALVARES FLORENCE	3	170,2	1.434,1	0	221	VOTUPORANGA
AMERICO DE CAMPOS	4	332,4	1.814,2	0	221	VOTUPORANGA
ANDRADINA	5	3.115,0	6.352,2	1	0	N/A

5.2. Etapa 2 – Escolha de abrangência e dimensionamento de equipes

Passo 6) Distâncias, Pedágios, Velocidades e Custos/km

As distâncias entre todas as cidades correspondem aos valores obtidos com a ferramenta *Google Maps*, e considera a rota de menor distância entre as localidades. A matriz de distâncias rodoviárias mostra a distância rodoviária entre todas as localidades, conforme exemplo da Tabela 15.

Tabela 15 – Distâncias interlocalidades (km)

	t/Des	1	2	3	4
AGUAI	1	0	32	423	422
AGUAS DA PRATA	2	32	0	455	454
ALVARES FLORENCE	3	423	455	0	20
AMERICO DE CAMPOS	4	422	454	20	0
ANDRADINA	5	541	574	212	233

Da mesma forma, os custos de pedágios para deslocamento entre todas as localidades compõem a matriz representada na Tabela 16.

Tabela 16 – Custo de pedágio interlocalidades (R\$)

	\$/Des	1	2	3	4
AGUAI	1	0	3,6	0	0
AGUAS DA PRATA	2	3,6	0	0	0
ALVARES FLORENCE	3	0	0	0	0
AMERICO DE CAMPOS	4	0	0	0	0
ANDRADINA	5	0	0	0	0

As velocidades de deslocamento, baseadas em dados históricos (2013) da empresa do estudo de caso, são definidas para cada tipo de veículo, conforme ilustrado nas Tabelas 17 e 18. As velocidades variam também conforme tipo de deslocamento (interlocalidade, intralocalidade urbano e rural).

Tabela 17 – Velocidade de deslocamento interlocalidades (km/h)

Locais	Cód Loc	Cidade	Leve	Medio	Pesado
1	018	AGUAI	76,7	68	75
2	011	AGUAS DA PRATA	64,1	68	75
3	884	ALVARES FLORENCE	74,6	75	72
4	889	AMERICO DE CAMPOS	74,6	75	72
5	695	ANDRADINA	75,6	78	77

Tabela 18 – Velocidade de deslocamento intralocalidades (km/h)

Locais	Cód Loc	Cidade	Urbano			Rural		
			Leve	Medio	Pesado	Leve	Medio	Pesado
1	018	AGUAI	45	52	58	45	52	58
2	011	AGUAS DA PRATA	47	52	58	47	52	58
3	884	ALVARES FLORENCE	55	57	56	55	57	56
4	889	AMERICO DE CAMPOS	55	57	56	55	57	56
5	695	ANDRADINA	55	60	59	55	60	59

Semelhantemente, os custos de deslocamento por quilômetro baseiam-se em dados da empresa utilizada no estudo de caso, conforme Tabela 19. O custo por quilometro por tipo de veículo é composto pelo custo do combustível e custo de manutenção.

Tabela 19 – Custos por quilômetro

Locais	Cidade	Valores/KM						Custo/KM Ponderado		
		LV	LM	Dig	Gui	Hilux	Leve	LEVE	MEDIO	PESADO
1	AGUAI	R\$ 1,32	R\$ 1,43	R\$ 1,75	R\$ 1,68	R\$ 1,00	R\$ 0,49	R\$ 0,49	R\$ 1,25	R\$ 1,72
2	AGUAS DA PRATA	R\$ 1,32	R\$ 1,43	R\$ 1,75	R\$ 1,68	R\$ 1,00	R\$ 0,49	R\$ 0,49	R\$ 1,25	R\$ 1,72
3	ALVARES FLORENCE	R\$ 1,30	R\$ 1,30	R\$ 1,79	R\$ 1,64	R\$ 0,97	R\$ 0,48	R\$ 0,48	R\$ 1,19	R\$ 1,72
4	AMERICO DE CAMPOS	R\$ 1,30	R\$ 1,30	R\$ 1,79	R\$ 1,64	R\$ 0,97	R\$ 0,48	R\$ 0,48	R\$ 1,19	R\$ 1,72
5	ANDRADINA	R\$ 1,30	R\$ 1,32	R\$ 1,69	R\$ 1,77	R\$ 0,98	R\$ 0,44	R\$ 0,44	R\$ 1,20	R\$ 1,73

Passo 7) Custos de Deslocamentos

Os custos de deslocamento entre todas as localidades são calculados utilizando as informações de custo por quilômetro, pedágios, distâncias, conforme mostra o exemplo da Tabela 20.

Tabela 20 – Custo de deslocamento unitário interlocalidades leve

\$/Des	1	2	3	4	5
1	R\$ -	R\$ 85	R\$ 8.527	R\$ 8.466	R\$ 18.970
2	R\$ 85	R\$ -	R\$ 13.086	R\$ 12.989	R\$ 30.264
3	R\$ 8.689	R\$ 13.334	R\$ -	R\$ 52	R\$ 551
4	R\$ 8.627	R\$ 13.235	R\$ 52	R\$ -	R\$ 1.886
5	R\$ 19.329	R\$ 30.837	R\$ 551	R\$ 1.886	R\$ -

Como já citado, os deslocamentos são restringidos pelo tempo total de viagem não superior a um determinado limite. O modelo permite que seja escolhida qualquer combinação de bases (origem e abrangência), penalizando as escolhas que implicam em tempo de deslocamento superior ao valor escolhido através da elevação do custo. Como exemplo, a Tabela 20 permite observar deslocamento entre localidades (designadas por números de coluna e linha) com alto custo, pois foi

penalizado pelo tempo de deslocamento (conforme apresentado nas fórmulas 15, 17 e 19).

Passo 8) Tempos de Deslocamentos

O tempo de deslocamento interlocalidades é calculado considerando as distâncias e velocidades médias por tipo de veículo. A Tabela 21 ilustra os tempos de deslocamentos.

Tabela 21 – Tempos de deslocamento unitário interlocalidades (horas)

t/Des	1	2	3	4	5
1	-	0,94	11,83	11,80	14,82
2	0,94	-	12,73	12,70	15,73
3	11,83	12,73	-	0,53	5,54
4	11,80	12,70	0,53	-	6,09
5	14,82	15,73	5,54	6,09	-

Passo 9) Restrições para Tempo de Deslocamento

Conforme mencionado, o modelo penaliza através do custo do deslocamento a escolha inadequada de bases e abrangências. Para deslocamentos com tempos (ida e volta) acima de 4 horas, o custo é penalizado por um componente exponencial que multiplica o custo real, conforme ilustrado na Tabela 22.

Tabela 22 – Restrições de tempo de deslocamento (horas)

Tempo Máximo de Deslocamento (ida+volta)	4
Base da aceleradora de custo de deslocamento	6

Os parâmetros podem ser alterados a fim de se obter melhor desempenho do algoritmo ou para a busca de soluções ótimas (exigem mais tempo de processamento para inspeção das possibilidades).

Passo 10) Escolha de Abrangências

A escolha das abrangências é feita pelo modelo considerando a taxa de visitas e o menor custo de deslocamento entre uma localidade e todas as demais. Ou seja, para uma localidade que não possui base, o modelo verifica qual a melhor opção de base origem que reduz o custo total de deslocamentos, utilizando a taxa de visitas e a planilha de custos de deslocamentos entre localidades. Ver detalhe na Tabela 14.

Passo 11) Modificadores de Homem-hora

Os aumentadores e redutores da capacidade de homem-hora são aplicados em diferentes partes do modelo.

O volume em horas extras planejado pela empresa pode ser abatido diretamente da demanda operacional em horas para cada localidade, seguindo distribuição proporcional à demanda. No caso, tempo de preparação e planejamento das equipes (antes de sair da base) foi descontado do tempo diário total, reduzindo a jornada de trabalho para 7 horas diárias (sendo de 8 horas a jornada de trabalho regular). É assumida como premissa a utilização de 1 (uma) hora diária por equipe para preparação do veículo, separação e carregamento de materiais e planejamento das atividades sem sair da base. Observa-se que os tempos diários no item Premissas de Produtividade já aparecem descontados (7 horas).

Ainda, são aplicados, após o dimensionamento de equipes e de pessoas, os redutores de absenteísmo (4%) e férias (8,33%), que provocam o aumento da quantidade total de pessoas necessária para a formação das equipes e atendimento da demanda.

Passo 12) Equipes para a Base Origem

A quantidade de equipes da base origem é basicamente calculada pelo coeficiente de demanda “depreciado” pelo deslocamento intralocalidade, urbano e rural, seguindo as regras dos aumentadores e redutores de homem-hora, conforme ilustrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Dimensionamento de equipes na base origem

CIDADE	Loc	Comercial+Oper			CEP			Elektro				Distribuição		
		Leve	Médio	Pesado	Leve	Médio	Pesado	Leve	Médio	Pesado	TOTAL	Leve	Médio	Pesado
AGUAI	1	0,58	0,19	0,00	0	0,12	0,08	0,58	0,32	0,08	0,98	59,5%	32,4%	8,1%
AGUAS DA PRATA	2	0,15	0,04	0,00	0	0,19	0,08	0,15	0,23	0,08	0,46	33,5%	49,7%	16,7%
ALVARES FLORENCE	3	0,10	0,05	0,00	0	0,09	0,08	0,10	0,14	0,08	0,32	31,0%	42,9%	26,1%
AMERICO DE CAMPOS	4	0,15	0,10	0,00	0	0,11	0,11	0,15	0,21	0,11	0,47	32,1%	44,8%	23,1%
ANDRADINA	5	1,61	0,62	0,00	0	0,49	0,38	1,61	1,10	0,38	3,09	52,1%	35,6%	12,4%

Passo 13) Equipes para as Bases da Abrangência

A quantidade de equipes para atender a demanda das demais localidades na abrangência é dada pela demanda em equipes estimada para a localidade

(coeficiente de demanda), “depreciado” pelo deslocamento intra e interlocalidade (em relação à base origem escolhida).

Assim, somados, a quantidade de equipes da base origem e quantidade de equipes “depreciada” de cada localidade compõem a quantidade total de equipes necessárias em uma base para atender a demanda de toda a abrangência, considerando os modificadores de HH, conforme ilustrado na Tabela 24.

Tabela 24 – Dimensionamento de equipes na abrangência

Base Origem	Demanda Local							Demanda Remota						
	Exp. e Preserv.				Comercial			Exp. e Preserv.				Comercial		
	EQ LV	EQLM	EQD	EQG	EQL	EQM	EQP	EQ LV	EQLM	EQD	EQG	EQL	EQM	EQP
191	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,15	0,06	0,00	0,08	0,15	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
221	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
221	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,36	0,29	0,00	0,51	1,61	0,62	0,00	1,16	0,85	0,00	1,65	3,74	0,90	0,00
0	0,36	0,79	0,00	0,94	0,80	0,19	0,00	0,02	0,06	0,00	0,07	0,20	0,07	0,00

Passo 14) Arredondamento de Equipes

O arredondamento da quantidade fracionada de equipes necessárias ocorre na parte final do modelo. A lógica de arredondamento prevê limiares de ajuste. Por exemplo, se uma determinada base possui demanda para 3,1 equipes (com demanda da abrangência já agregada), o modelo irá arredondar para 3 equipes, considerando que 0,1 (quantidade de demanda de equipes) será atendida com horas extras ou fora do padrão adotado de tempo de atendimento (probabilidade e risco), estando abaixo do limiar de 0,2 equipes de demanda. Da mesma forma, uma base com demanda para 2,6 equipes será arredondada para 3 equipes. A Tabela 25 apresenta as premissas de arredondamento.

Tabela 25 – Premissas de arredondamento

Aproveitamento de Capacidade - Limites de Arredondamento de Equipes	
Fração de equipe mínima para deslocamento único - Comercial	0,25
Fração de equipe mínima para deslocamento único - Técnica	0,25
Limite de aproveitamento equipes Cesta	0,2
Limite de aproveitamento equipes Digger/Gui	0,2
Limite de aproveitamento de capacidade de equipes Com. 6*3	0,2
Limite de aproveitamento de capacidade de equipes Com. 5*2	0,2
Limite de aproveitamento de capacidade de equipes Com. 5*2 LEVE	0,2

5.3. Etapa 3 – Composição de custos

Passo 15) Premissas de Custo

As premissas de custo referem-se aos valores que compõem os custos fixos ou variáveis por unidade (equipe, veículo, infraestrutura). Os custos são estimados utilizando dados da empresa.

O custo do aluguel é aplicado de acordo com a situação de infraestrutura predial. As empresas normalmente possuem infraestrutura própria nas localidades. Alguns componentes de tecnologia da informação (infraestrutura) são dimensionados por grupo de 10 pessoas.

O custo anual das equipes inclui o salário, benefícios (vale refeição, plano de saúde), previdência social, FGTS, férias e 13º salário. O custo da equipe é calculado conforme o número de integrantes: 3 pessoas na equipe em escala 6x3, 2 pessoas na equipe em escala 5x2. Estão inclusos também os custos com despesas de viagens (refeição e estadia) e de EPIs e EPCs. O custo fixo dos veículos corresponde ao custo de licenciamento, IPVA/DPVAT, seguro. A Tabela 26 ilustra as premissas de custos individuais de infraestrutura e equipes e a Tabela 27 ilustra as premissas de custos individuais de veículos.

Tabela 26 – Premissas de custo individuais de infraestrutura e equipes

Custos de Infra	
Custo Base da Base	R\$ 25.600
Custo Infra por Eletricista	R\$ 4.200
Custo Aluguel por Eletricista	R\$ 5.850
Custo Infra adicional p/ cada 10 Eletricistas	R\$ 1.850
Custo Anual Equipe LV - 6x3	R\$ 156.420
Custo Anual Equipe Geral 6x3	R\$ 142.200
Custo Anual Equipe LV - 5x2	R\$ 104.280
Custo Anual Equipe Geral 5x2	R\$ 94.800
Custos Adicionais por HC	R\$ 5.260

Tabela 27 – Premissas de custo individuais de veículos

Custos Marginais de veículo - Documentação	
Custo Marginal Pesado Anual	R\$ 2.100
Custo Marginal Médio Anual	R\$ 1.500
Custo Marginal Leve Anual	R\$ 1.100

Passo 16) Custos de Infraestrutura

Os custos de infraestrutura, como já citado, abrangem a manutenção predial, limpeza e conservação, segurança, despesas com água, esgoto e energia elétrica, IPTU e aluguel, nos casos (localidades) em que a empresa não possua infraestrutura própria. O custo anual total de infraestrutura é composto pelos custos fixos e variáveis e se aplicam somente às localidades escolhidas para possuírem bases, conforme ilustrado na Tabela 28.

Tabela 28 – Custos de infraestrutura

Cidade	Loc	S/N	Base Própria	Custo Fixo Infra Base	HC	Blocos 10HC	Infra HC's	Infra Bloco 10HC	Aluguel	Adicionais
AGUAI	1	0	1	R\$ -	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AGUAS DA PRATA	2	1	0	R\$ 27.100,00	7	1	R\$ 29.400,00	R\$ 1.850,00	R\$ 40.950,00	R\$ 36.820,00
ALVARES FLORENCE	3	0	0	R\$ -	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AMERICO DE CAMPOS	4	0	1	R\$ -	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ANDRADINA	5	1	1	R\$ 1.500,00	27	3	R\$ 113.400,00	R\$ 5.550,00	R\$ -	R\$ 142.020,00

Passo 17) Custos de Veículos

O custo fixo anual dos veículos é dado pelo custo unitário multiplicado pela quantidade de equipes, conforme ilustrado na Tabela 29.

Tabela 29 – Custos de veículos

Cidade	Loc	S/N	Custos de Veículos			
			Custo Marginal Dig/Gui	Custo Marginal LV	Custo Marginal LM	Custo Marginal Leve
AGUAI	1	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
AGUAS DA PRATA	2	1	R\$ 17.500,00	R\$ 10.300,00	R\$ 10.300,00	R\$ -
ALVARES FLORENCE	3	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
AMERICO DE CAMPOS	4	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
ANDRADINA	5	1	R\$ 35.000,00	R\$ 20.600,00	R\$ 30.900,00	R\$ -

Passo 18) Custos de Pessoas/Equipes

O custo anual de pessoas é calculado considerando a quantidade de equipes alocada em cada base, utilizando as premissas de custo, conforme Tabela 30.

Tabela 30 – Custos de equipes

Cidade	Loc	S/N	Custo EQ
AGUAI	1	0	R\$ -
AGUAS DA PRATA	2	1	R\$ 346.020,00
ALVARES FLORENCE	3	0	R\$ -
AMERICO DE CAMPOS	4	0	R\$ -
ANDRADINA	5	1	R\$ 1.308.240,00

Passo 19) Custos de Deslocamentos

É a soma dos custos dos deslocamentos inter e intralocalidades. Observar que as localidades que possuem base não apresentam custos interlocalidades. A Tabela 31 ilustra os custos de deslocamento anuais.

Tabela 31 – Custos de deslocamentos

Cidade	Loc	S/N	Base Origem	Base Origem TXT	Min Desloc. Inter	Desloc. Intra
AGUAI	1	0	191	SAO JOAO DA BOA VISTA	R\$ 33.484,18	R\$ 19.607,92
AGUAS DA PRATA	2	1	0	N/A	FALSO	R\$ 8.041,66
ALVARES FLORENCE	3	0	221	VOTUPORANGA	R\$ 15.528,57	R\$ 8.378,32
AMERICO DE CAMPOS	4	0	221	VOTUPORANGA	R\$ 30.901,49	R\$ 9.002,22
ANDRADINA	5	1	0	N/A	FALSO	R\$ 43.811,83

Passo 20) Custo Total

Assim, o custo total é dado pela composição dos custos de infraestrutura, equipes/pessoas, veículos e deslocamentos, que é função das variáveis de entrada, destacando a demanda de serviços e a escolha de bases pelo algoritmo evolutivo, que irá determinar as abrangências e custos de deslocamentos. A Tabela 32 ilustra os custos anuais totais por localidade.

Tabela 32 – Custo anual total por localidade – Exemplo

Cidade	Loc	S/N	Base Origem	Base Origem TXT	Custo Total da Base	Totais	
						Deslocamento	Custo Total
AGUAI	1	0	191	SAO JOAO DA BOA VISTA	R\$ -	R\$ 53.092,10	R\$ 53.092,10
AGUAS DA PRATA	2	1	0	N/A	R\$ 520.248,00	R\$ 8.041,66	R\$ 528.289,66
ALVARES FLORENCE	3	0	221	VOTUPORANGA	R\$ -	R\$ 23.906,89	R\$ 23.906,89
AMERICO DE CAMPOS	4	0	221	VOTUPORANGA	R\$ -	R\$ 39.903,70	R\$ 39.903,70
ANDRADINA	5	1	0	N/A	R\$ 1.657.240,00	R\$ 43.811,83	R\$ 1.701.051,83

5.4. Busca de Soluções

5.4.1. Busca Empírica

O conhecimento existente sobre a estrutura operacional de uma empresa e as condições do ambiente das localidades pode orientar a busca de soluções.

Certamente, se uma empresa possui um modelo de bases e abrangências semelhante ao modelo operacional descrito neste trabalho (em níveis), aplicando sua configuração de bases na metodologia proposta, ter-se-á um resultado que deve assemelhar-se aos custos reais dessa empresa, e que não deve estar muito distante do resultado ótimo. O conhecimento empírico permite o teste de soluções, alterando

manualmente a configuração de bases no modelo, conforme o conhecimento prévio das variáveis que envolvem a operação nas localidades.

5.4.2. Busca Heurística

O algoritmo evolutivo é utilizado para realizar a busca de soluções ótimas para o modelo de otimização. Para este trabalho foi utilizado o algoritmo evolutivo *Scatter Search*, desenvolvido pela *Frontline Solver* e distribuído no pacote de *software Microsoft Excel*.

Algoritmo Evolutivo *Scatter Search*

É um algoritmo normalmente utilizado na otimização de problemas difíceis (*NP-Completo*) que, pela grande quantidade de variáveis e possibilidades de soluções, exigem grande poder computacional. São normalmente problemas de otimização não lineares com soluções combinatórias. O conceito fundamental do método foi desenvolvido nos anos 1960 [36]. O método utiliza estratégias de diversificação e intensificação para a busca de soluções [37].

O algoritmo inicialmente gera um conjunto de soluções para o problema e obtém um subconjunto de melhores soluções de referência (1), cria novos pontos de partida pela combinação linear dos subconjuntos (2), forma novos conjuntos de soluções (3) e reinicia a busca de subconjuntos (4) e até que seja alcançado um limite de iterações (5).

A combinação linear feita pelo algoritmo tem o objetivo de gerar soluções ponderadas entre os subconjuntos e, através de combinação não convexa, fornecer soluções não contidas na solução de referência original. A estratégia do algoritmo de escolha de subconjuntos específicos para combinação faz uso de clusterização (agrupamento de semelhantes), permitindo que sejam geradas novas soluções dentro e através dos clusters.

Não é objetivo deste trabalho aprofundar a teoria sobre algoritmos de busca meta-heurísticos, algoritmos evolutivos ou *Scatter Search*. Tais técnicas foram escolhidas e aplicadas à solução do problema com resultados satisfatórios. O aprimoramento da aplicação das técnicas será necessário para obter resultados ótimos com menor tempo de processamento.

No *Excel*, com o pacote da *Frontline Solver* instalado, o algoritmo *Scatter Search* pode ser selecionado através da escolha da família de algoritmos evolutivos. Os parâmetros de execução do algoritmo podem ser ajustados, como a convergência, a taxa de mutação, tamanho de população, que influem significativamente no desempenho do algoritmo. Condições de parada do algoritmo podem ser estabelecidas pela quantidade e tempo máximo de iterações.

6. ESTUDO DE CASO

6.1. Apresentação da Empresa

O estudo de caso foi desenvolvido na empresa ELEKTRO. Constituída em 1998, a Elektro Eletricidade e Serviços S.A. é uma empresa de capital aberto, controlada indiretamente desde 2011 pela Iberdrola S.A., grupo espanhol que figura entre as maiores companhias de energia elétrica no mundo [38].

A ELEKTRO distribui energia elétrica para aproximadamente 6 milhões de pessoas em 228 cidades, 223 delas no Estado de São Paulo e 5 no Estado do Mato Grosso do Sul (Figura 20, área de concessão), o que a posiciona como a oitava maior distribuidora de energia elétrica do Brasil e a terceira maior do Estado de São Paulo em volume de energia (GWh). Com 3.695 colaboradores próprios e 1.411 terceiros, a ELEKTRO faturou, no ano de 2013, 12.435,8 GWh para o mercado cativo e distribuiu 4.085,5 GWh para o mercado livre. Estão vinculados à sua rede cerca de 2,4 milhões de clientes residenciais, comerciais, industriais, públicos e rurais.

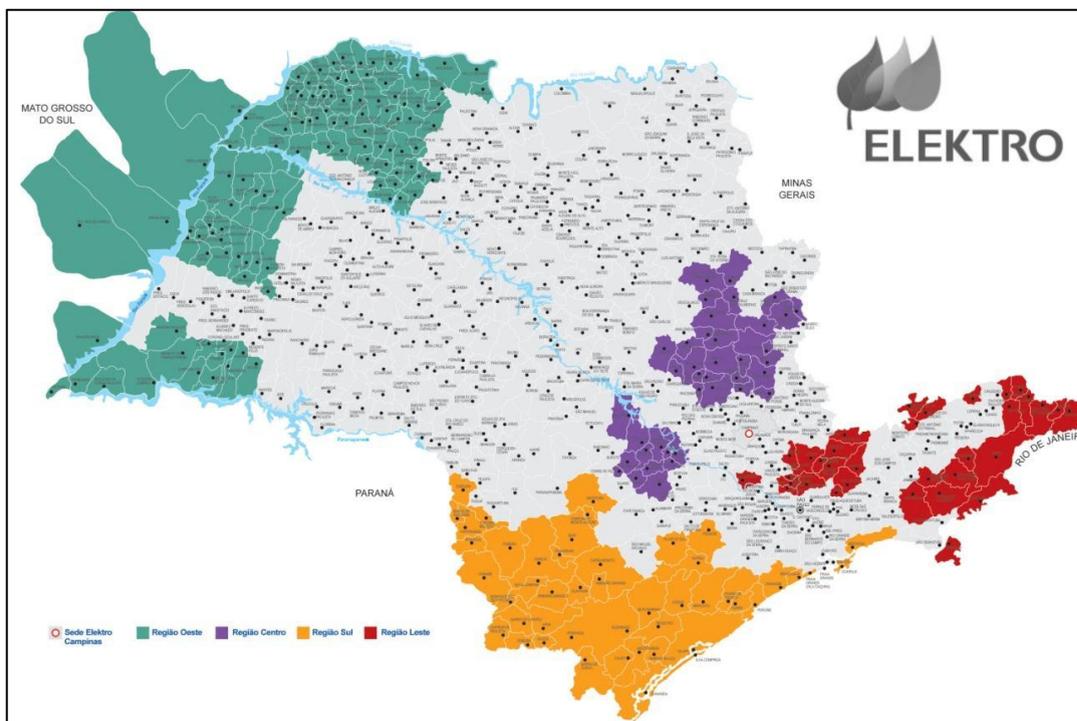


Figura 20 – Mapa da Área de Concessão [12]

A ELEKTRO mantém atendimento presencial em todos os municípios de sua área de concessão, além de duas unidades móveis de atendimento, utilizadas para ações

de relacionamento com clientes e como contingência, em caso de intempéries, atuando ininterruptamente para a continuidade das operações. Reúne ainda 103 bases operacionais com equipes multifuncionais para execução em campo de atividades de operação, expansão e preservação da rede, serviços técnicos comerciais, inspeção e substituição de medidores e leitura e entrega de contas. Possui 135 subestações e aproximadamente 110 mil quilômetros de rede de distribuição para fornecer energia elétrica com índice de disponibilidade de serviço médio de 99,9%.

A Sede Corporativa, a Central de Relacionamento com Clientes (CRC) e o Centro de Operação da Distribuição (COD) da Empresa estão sediados em Campinas-SP, e o Centro de Distribuição (CD), em Sumaré-SP. O Centro de Operação coordena toda a operação do sistema elétrico e a execução de serviços em campo, realizando a gestão logística das equipes alocadas nas 103 bases operacionais, em colaboração com os gestores também alocados nas regiões.

A ELEKTRO em Números

A Figura 21 resume desempenho dos indicadores operacionais e financeiros da ELEKTRO nos anos recentes, entre outros indicadores.

Econômico-financeiros	2011	2012	2013	Varição 13/12
Receita operacional bruta	5.332,3	5.369,8	4.817,4	-10,3%
Receita operacional líquida	3.564,1	3.569,5	3.549,3	-0,6%
Resultado do serviço	779,8	527,1	500,1	-5,1%
Margem do resultado do serviço ¹ (%)	21,9	14,8	14,1	-0,7 p.p.
EBITDA ²	940,0	667,1	647,1	-3,0%
Margem EBITDA ¹ (%)	26,4	18,7	18,2	-0,5 p.p.
Lucro líquido	492,4	337,5	323,7	-4,1%
Margem líquida ¹ (%)	13,8	9,5	9,1	-0,4 p.p.
Dividendos e juros sobre capital próprio declarados	460,2	342,0	334,3	-2,3%
Investimentos ³	302,0	292,0	302,3	3,5%
Operacionais	2011	2012	2013	Varição 13/12
Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) – horas	9,05	9,80	8,46	-13,7%
Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) – número de vezes	5,39	5,33	4,99	-6,4%
Perdas de distribuição (%)	6,97	7,20	7,21	0,01 p.p.
Comerciais	2011	2012	2013	Varição 13/12
Número de clientes cativos	2.253.735	2.307.630	2.372.422	2,8%
Número de clientes livres	70	104	114	9,6%
Total de clientes livres e cativos	2.253.805	2.307.734	2.372.536	2,8%
Compra de energia elétrica (GWh)	13.842	13.856	14.405	4,0%
Energia elétrica distribuída a clientes finais ⁴ (GWh)	12.008	11.974	12.436	3,9%
Segurança	2011	2012	2013	Varição 13/12
Fatalidades (Elektro)	0	0	0	-
Fatalidades (empresas contratadas)	0	0	0	-
Acidentes com afastamento (Elektro) ⁶	2	5	3	-40,0%
Acidentes sem afastamento (Elektro) ⁶	71	55	77	40,0%
Acidentes com afastamento (empresas contratadas) ⁶	10	7	7	0%
Acidentes sem afastamento (empresas contratadas) ⁶	16	6	15	150%
Fatalidades (população)	6	5	5	0%
Lesões (população)	9	14	22	57,1%

Figura 21 – ELEKTRO em números [38]

6.2. Engenharia, Planejamento e Operação

A operação, planejamento e engenharia do sistema elétrico são desenvolvidos matricialmente, sendo os processos de negócio gerenciados e executados de forma compartilhada pelas áreas na sede corporativa e nas regiões.

Na sede, as áreas realizam a gestão dos processos (gestão da qualidade, apuração de resultados) e desenvolvem oportunidades (planos de ação e projetos) para a melhoria contínua dos processos com o aperfeiçoamento de métodos, ferramentas, normas e materiais, e também a análise do desempenho, projeto e planejamento do

sistema elétrico (rede, linhas de transmissão e subestações). Nas regiões, o foco é a execução dos serviços apoiada no planejamento de curto prazo para o cumprimento das metas de qualidade, atendimento de prazos em serviços, realização de obras e manutenção.

A gestão da demanda de serviços e o planejamento da execução são realizados de forma integrada pelas diversas áreas sob coordenação do Centro de Operação, que utiliza sistemas técnicos especializados com informações em tempo real, e soluções de comunicação de voz e dados para despacho de serviços para as equipes. O acionamento das equipes é realizado por rádio (voz) para os casos críticos (restabelecimento) e seguido do despacho da ordem de serviço para o dispositivo móvel da equipe. Os demais serviços (serviços técnicos comerciais, expansão e preservação de rede) são despachados para as equipes pelo envio das ordens para os dispositivos móveis.

A organização da operação nas regiões é realizada a partir das bases operacionais que são agrupadas em abrangências de nível 1 e 2, e também agrupadas nos níveis de gestão administrativa (supervisão, gerência e gerência executiva de região). O escopo deste trabalho é a otimização do modelo operacional e, portanto, não são detalhados neste documento os processos de engenharia e planejamento, bem como a estrutura administrativa de gestão.

Contexto Operacional

Até 2013, a ELEKTRO possuía 103 bases operacionais de abrangência nível 1, sendo também 25 delas bases de abrangência nível 2. Com a utilização da ferramenta *Google Fusion Tables* [39], são apresentadas as abrangências de nível 1 e 2 nas Figuras 22 e 23.

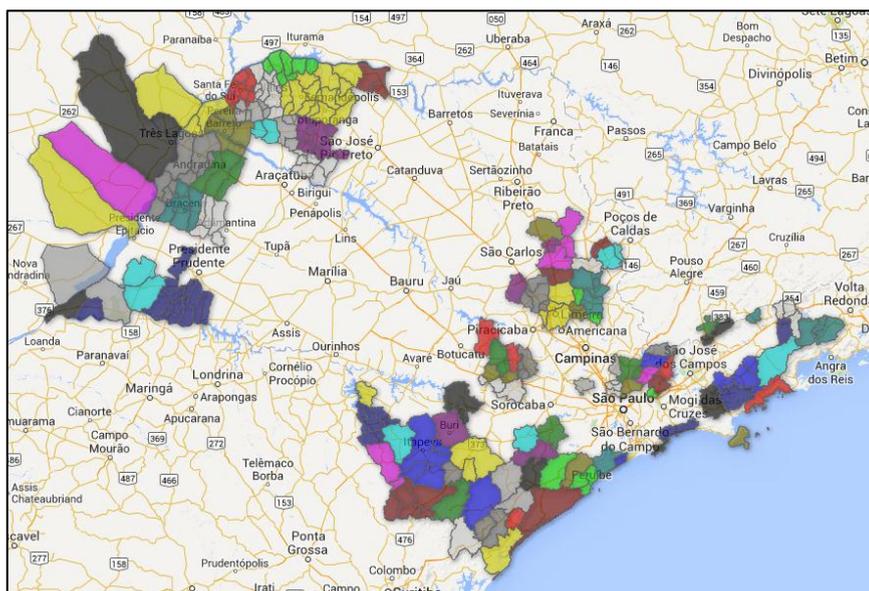


Figura 22 – Situação de abrangências nível 1 em 2013

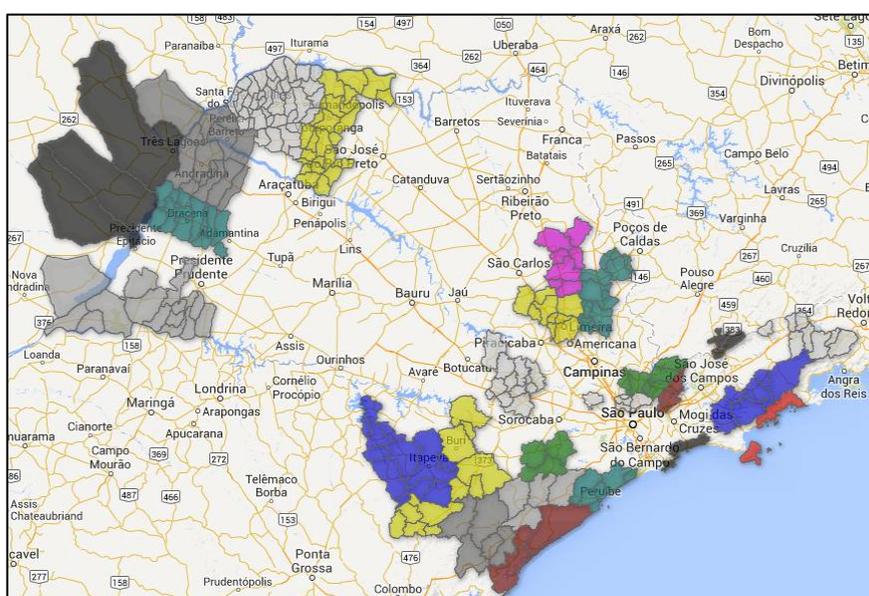


Figura 23 – Situação de abrangências nível 2 em 2013

Como pode ser observado, as abrangências são irregulares, podendo variar em tamanho (quantidade de localidades) ou volume de demanda, entre outros fatores. Na situação referente a 2013, ocorrem abrangências cruzadas, em que uma determinada abrangência nível 1 pode estar dividida entre duas abrangências de nível 2, o que aumenta a complexidade do planejamento e da gestão das equipes e serviços.

As abrangências mostradas no mapa foram formadas ao longo do tempo considerando o crescimento e o desempenho do sistema elétrico, bem como a

evolução do modelo operacional da ELEKTRO, cujo histórico remete ao período em que a empresa era ainda uma companhia estatal, parte da antiga CESP (Companhia Energética de São Paulo).

No passado (até 2008), os serviços eram executados por agrupamentos de equipes distintos (equipe própria e contratada). As equipes próprias basicamente formavam as abrangências de nível 1 e atendiam a demanda operacional (restabelecimento). As equipes contratadas atuavam de forma distribuída, conforme a demanda negociada em contrato, atendendo a demanda de serviços técnicos comerciais e de expansão e preservação (não estavam formadas ainda as abrangências de nível 2). Nesse contexto, havia pouca sinergia entre as equipes para a execução diária das equipes (exceto em casos de emergência), e o Centro de Operação não dispunha de todas as equipes para a execução dos serviços.

Em 2009, a ELEKTRO iniciou um processo de primarização/internalização de equipes para execução de todos os serviços/demandas (operacional, STC, expansão e preservação) com equipes próprias, realizando também a mudança de processos e métodos com a introdução de novas tecnologias, por exemplo: *digger derrick*, *ez hauler*, *gator*, poste de fibra modular, motopoda, socador hidráulico, inspeção aérea, integração completa de sistemas técnicos e comerciais com SAP, atualização e georreferenciamento da base de ativos, soluções de mobilidade, solução de voz híbrida (celular e satélite), entre outras inovações. Nesse processo de mudança, o atendimento da demanda de STC foi integrada às 103 bases operacionais de abrangência de nível 1, e então foram formadas as 25 bases operacionais de abrangência de nível 2 (compartilhando parte da infraestrutura das 103 bases existentes).

As 25 novas bases de nível 2 foram instaladas/posicionadas e a quantidade de equipes dimensionada conforme estudo dos volumes de serviços contratados e laboratórios de produtividade com as novas tecnologias de execução em campo. A escolha das localidades para alocação das bases considerou a oferta de mão de obra capacitada (eletricistas) e facilidades no aproveitamento de infraestrutura existente. A concentração em 25 bases foi também uma escolha estratégica para garantir maior qualidade nos processos durante a transição do modelo (gestão de mudança).

A mudança iniciada em 2009 e concluída em 2012, baseada em pessoas (mudança para quadro próprio de equipes), novos processos e tecnologia, foi também fundamentada no aumento da produtividade, da qualidade e, principalmente, da segurança das pessoas. A partir da mudança, verificou-se grande melhoria do desempenho operacional e financeiro, com redução de acidentes em campo. O desempenho operacional foi favorecido pela sinergia proporcionada por um quadro completo de equipes próprias sob gestão centralizada e integrada da operação, planejamento e engenharia do sistema elétrico.

6.3. Projeto Logística Operacional

Este trabalho foi aplicado na ELEKTRO como parte do escopo do Projeto Logística Operacional, cuja finalidade foi o aumento da eficiência operacional, qualidade de vida e segurança dos colaboradores pela readequação das bases e equipes operacionais para atendimento da demanda de serviços. A metodologia de otimização foi aplicada para toda a ELEKTRO, resultando na proposição de mudanças significativas na estrutura operacional.

O estudo de caso a ser detalhado mostrará o escopo executado na aplicação do modelo na parte superior da Região Centro (Gerências de Limeira e Rio Claro), concluído no primeiro semestre de 2014 e com resultados já consolidados. O projeto garantiu as condições para execução deste trabalho, facilitando o levantamento de dados e implantação das mudanças com o apoio das áreas da empresa (infraestrutura, recursos humanos, tecnologia da informação, operação, planejamento, logística de materiais, financeiro).

O Projeto Logística Operacional teve duração de dois anos (2013-2014) e, além da disposição logística das equipes, desenvolveu novos processos e melhores práticas para o planejamento da execução dos serviços e aproveitamento de equipes (ganhos de eficiência e sinergia), com melhor planejamento de escalas, estratégias e áreas de atuação (poligonais urbanas), e roteirização de serviços.

Etapas do Projeto

O projeto foi executado em etapas:

- 1) Concepção do modelo de otimização (janeiro a maio/2013) – É a parte fundamental deste trabalho. Consistiu no desenvolvimento do modelo de

otimização detalhado no capítulo 4 (Metodologia para Alocação de Bases e Equipes Operacionais). Baseou-se no estudo do modelo operacional da ELEKTRO e no estudo de casos de aplicação de algoritmos evolutivos para o melhoramento operacional em Localização de Instalações.

2) Levantamento de dados e premissas (janeiro a maio/2013) – Ocorreu paralelamente à concepção do modelo, sendo direcionada pela necessidade de levantamento de informações para aprimoramento do modelo. Baseou-se fundamentalmente no levantamento de dados de demanda (principal variável do modelo), definição de premissas de produtividade e custo (infra e frota). O levantamento de demanda foi consolidado na forma de “mapa de calor”, que reduz as informações sobre as demandas (operacional, STC, expansão e preservação) por tipo e por localidade, facilitando a entrada dos dados no modelo e cuja visualização gráfica facilita a inspeção de soluções. O levantamento de dados foi aprimorado com as projeções de demanda, em que as demandas foram projetadas 5 anos à frente com base em metodologia própria desenvolvida para este trabalho. A demanda de serviços projetada foi anualizada para composição dos dados de entrada do modelo. O horizonte de projeção foi definido com base no período de tempo desejado para o retorno do projeto (inferior ao horizonte de tempo), e também considerando a incerteza elevada para períodos de tempo maiores. O mapa de calor e as projeções de demanda são detalhados a seguir.

3) Aplicação do modelo (junho a julho/2013) – O modelo foi testado e aprimorado para resolução com algoritmo evolutivo, apresentando resultados e oportunidades significativas para a alocação de bases e equipes. Basicamente, o modelo propôs poucas alterações nas abrangências de nível 1, mudando de 103 para 105 base operacionais, com redistribuição de equipes para equilíbrio “demanda *versus* recursos” nas bases. Para as abrangências de nível 2, o modelo propôs o aumento de 25 para 38 bases operacionais e maior redistribuição de equipes, utilizando infraestrutura existente, oferecendo significativa redução de deslocamentos e ganho de capacidade.

4) Projeto piloto (agosto a dezembro/2013) – Foram escolhidas as bases de Mogi Guaçu e São João da Boa Vista para execução de projeto piloto. A base

de nível 2 instalada em Mogi Guaçu foi então dividida com São João (parte das equipes e veículos foram realocadas para São João) conforme proposição do modelo. Foram então verificadas as premissas de entrada e confirmados os resultados de saída do modelo relacionados à redução de deslocamentos e aumento de produtividade. A execução do projeto piloto implicou na adequação da infraestrutura da base em São João (pátio de estacionamento e almoxarifado) com baixo desembolso financeiro.

5) Expansão do modelo – A confirmação da efetividade do modelo de otimização com base no projeto piloto sustentou a aprovação da expansão da proposta do modelo para toda a ELEKTRO, que se desdobrou com a construção de *business cases* (análises de viabilidade econômica e financeira) para cada região da ELEKTRO e execução de mudanças (equipes/pessoas, infraestrutura, logística de materiais, tecnologia da informação) conforme cronograma de implantação e desembolsos estabelecidos. O controle da implantação e seus resultados foram monitorados com relatório de deslocamentos (km) e produtividade diária por equipe. A expansão do modelo seguiu o cronograma abaixo, conforme a relação de novas bases de abrangência de nível 2:

5.1) Região Centro (janeiro a abril/2014) – São João da Boa Vista (confirmação), Rio Claro e Araras.

5.2) Região Oeste e Sul (maio a setembro/2014) – Ilha Solteira, Santa Fé do Sul, Fernandópolis, Nhandeara e Pirapozinho (Oeste). Bertioga, Itaporanga e Apiaí (Sul). A implantação ocorreu simultaneamente nas duas regiões.

5.3) Região Leste (outubro a dezembro/2014) – Cunha, Piracaia e Mairiporã.

Obs.: Para cada nova base de abrangência nível 2 listada acima há uma ou duas bases já existentes que foram divididas para a formação da nova base.

Neste trabalho é detalhado o escopo implantado da Região Centro, com resultados consolidados que validam o modelo de otimização. Antes do detalhamento do

escopo e resultados, são apresentados os detalhes do levantamento de demanda (mapa de calor e projeções).

6.4. Demanda de Serviços

Conforme já mencionado, a demanda de serviços do ano de 2012 serviu como base para a projeção de demanda que alimenta o modelo. O levantamento de dados de demanda foi um passo importante para o desenvolvimento deste trabalho, considerando a complexidade do acesso, extração, tratamento e armazenamento dos dados de diferentes bases de dados e em formatos distintos. O grande volume de dados requer ferramentas especializadas para a manipulação das tabelas até que as informações estejam preparadas para serem inseridas no modelo.

Foram utilizados recursos de linguagem *PL/SQL* para acesso a bases de dados *Oracle* e o *software SAS Enterprise Guide* para acesso, busca e tratamento das informações. As informações formatadas foram inseridas no modelo com auxílio do *PowerPivot* (complemento para *Microsoft Excel*). As informações reunidas e correlacionadas formam uma base de dados em “cubo”, que facilita a investigação e análise dos dados.

Mapa de Calor da Demanda

Os dados de demanda (operacional, STC, expansão e preservação) foram obtidos por localidade (1), por tipo de demanda (2) e equipe adequada para o atendimento (3), e apurados em unidades de homem-hora de trabalho necessário para atendimento da demanda.

O resultado do levantamento pode ser visualizado em forma de mapa de calor com auxílio da ferramenta *Google Fusion Tables*, em que é possível visualizar a demanda distribuída geograficamente e o volume total de serviços em homem-hora para cada localidade representado em escala de cores (no caso da Figura 24, abaixo, em tons de cinza). A intensidade da cor de cada localidade varia de acordo com a escala que vai do mínimo ao máximo volume de serviços dentre as localidades.

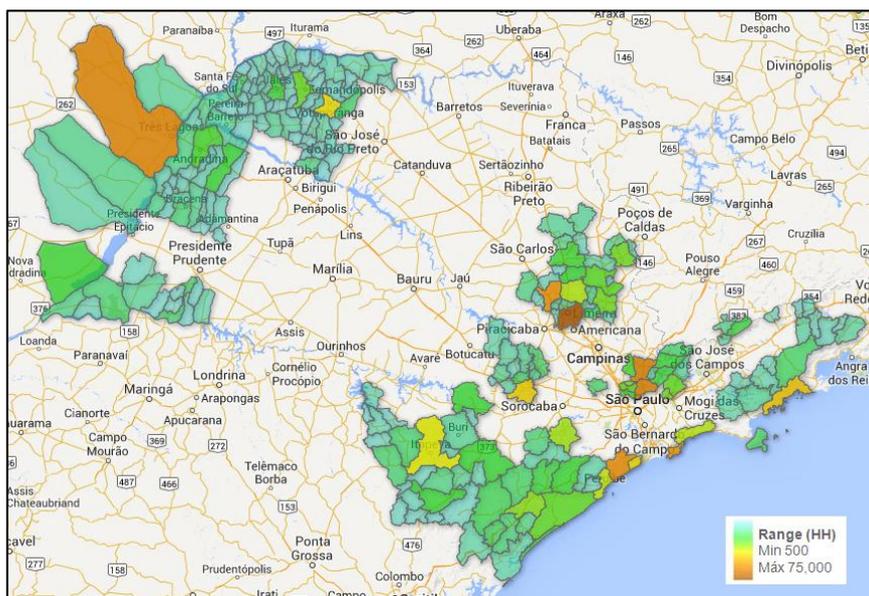


Figura 24 – Mapa de calor da demanda

No mapa de calor estão somadas em homem-hora as demandas operacional, de STC e de expansão e preservação. Utilizando a ferramenta *Fusion Tables*, é possível explorar as informações visualizando o detalhe da demanda em cada localidade (distribuição por tipo e por equipe, ou veículo), conforme mostra o exemplo na Figura 25.

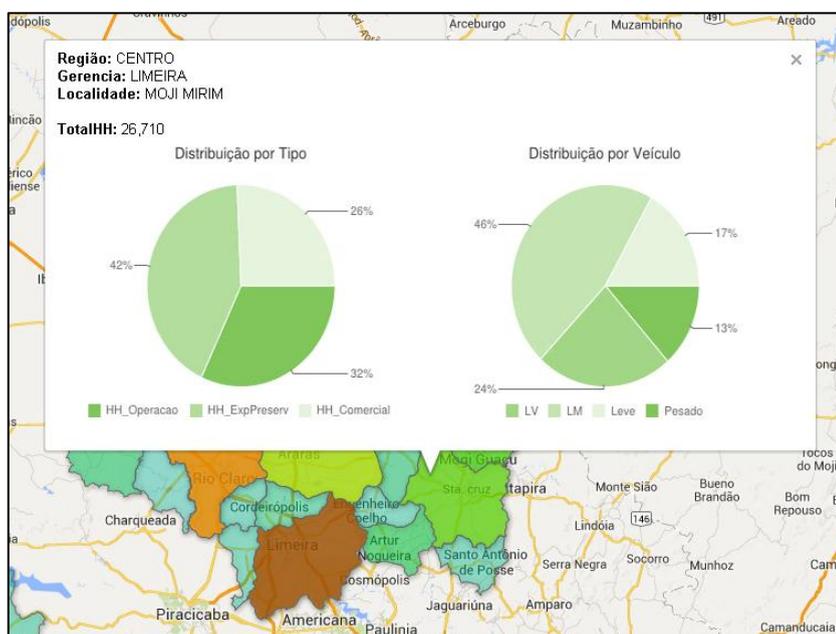


Figura 25 – Detalhe do mapa de calor da demanda

A demanda de veículo pesado corresponde à demanda de *digger derrick* e guindauto. No estudo de caso não houve distinção entre essas demandas,

considerando a imprecisão sobre os dados de execução (tipo de equipe executora). Assim, também a premissa de produtividade para *digger* e guindauto é única, considerando o *mix* de equipes atual na ELEKTRO (no modelo de otimização, após a obtenção da quantidade de equipes pesadas, as equipes tipo *digger* e guindauto foram dimensionadas na proporção do *mix* atual dessas equipes).

O desenvolvimento do mapa de calor facilitou a análise das informações pelas partes envolvidas antes da aplicação da metodologia. Através do mapa, foram identificadas e corrigidas inconsistências no levantamento de dados, que poderiam interferir erroneamente na alocação de bases e equipes.

Metodologia de Projeção de Demanda

Os tipos de dados que, em geral, estão disponíveis para análise empírica, são as séries temporais, os cortes transversais e os painéis [40]. As séries temporais são observações de uma ou mais variáveis ao decorrer do tempo. Os dados de corte transversal são dados relativos a uma ou mais variáveis para várias unidades ou entidades amostrais no mesmo período. Nos dados em painel, a mesma unidade de corte transversal, no caso deste estudo, as 228 localidades da área de concessão da ELEKTRO, são observados ao longo do tempo. Resumindo, os dados em painel têm uma dimensão espacial e outra temporal.

Há grandes vantagens de se utilizar os dados em painel. Como esta metodologia é uma combinação de série temporal com corte transversal, teremos mais observações para a realização do modelo de regressão e, conseqüentemente, aumenta-se o número de graus de liberdade. Outro ponto importante é que a regressão com efeitos fixos de entidade com dados em painel controla variáveis não observadas que diferem de uma entidade para outra, mas são constantes ao longo do tempo [41]. Estas variáveis não observadas podem viciar a estimativa dos coeficientes da regressão. Os painéis podem ser classificados em equilibrado e desequilibrado. O primeiro é o caso em que todos os dados são observados no mesmo período em estudo para todas as entidades. O segundo acontece quando os dados são observados em períodos, com início e/ou término distintos entre as entidades.

Os painéis também podem ser estáticos, quando a variável dependente é analisada nos instantes em que são observadas e, portanto, não são consideradas possíveis

defasagens da variável na elaboração do modelo. Eles também podem ser dinâmicos, quando a variável dependente é analisada no instante em que é observada e em possíveis defasagens da variável. No caso do estudo em questão, tem-se um painel equilibrado, pois se tem todos os dados para todos os municípios e também um painel estático, dado que os modelos utilizados não utilizam a variável dependente demanda defasada nos modelos de regressão.

A realização da regressão com dados em painel depende das premissas que são feitas a respeito dos interceptos, dos coeficientes angulares e dos termos de erros. A abordagem dos efeitos fixos consiste na utilização de variáveis binárias do tipo *dummy* para captar a diferença entre os interceptos das entidades e/ou do tempo. Também se pode utilizar a interação das variáveis *dummy* a as covariáveis do modelo para captar diferenças entre os coeficientes angulares. A abordagem de efeitos aleatórios assume que o intercepto é uma variável aleatória e as diferenças individuais de cada entidade se refletem em um termo de erro.

Os modelos de regressão com dados em painel utilizados foram considerando a abordagem de efeitos fixos e foram confeccionados no *software Eviews*.

Variáveis dependentes:

- Obras de varejo (universalização e clientes);
- Obras de segurança;
- Iluminação pública (até 2014, ainda sob responsabilidade das distribuidoras);
- Ocorrência técnica acidental;
- Desligamento;
- Ligação nova;
- Troca de padrão;

Variáveis explicativas testadas:

- Número de clientes;
- Extensão da rede;
- Consumo de energia.

Todas as variáveis dependentes e explicativas foram tomadas para cada um dos 228 municípios atendidos pela ELEKTRO. Tem-se cada uma das variáveis com discretização anual.

Os Modelos de Regressão com dados em painel foram confeccionados para cada uma das variáveis dependentes. Foram realizados testes de hipóteses para se testar a significância estatística dos diferentes interceptos por localidade e dos diferentes interceptos para cada um dos tempos e também de cada variável explicativa. Desse modo, os modelos foram selecionados de acordo com a significância estatística dos coeficientes e também de acordo com os maiores R-quadrados obtidos.

As Figuras 26, 27 e 28 mostram o fluxograma geral (passo a passo) da projeção de demanda, por tipo.

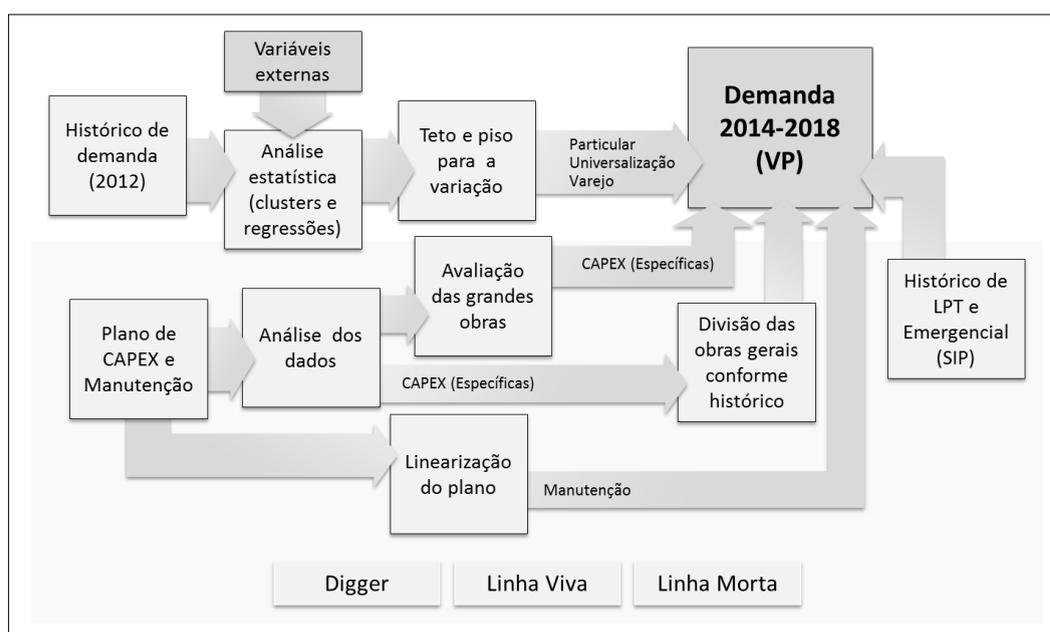


Figura 26 – Fluxograma da projeção de demanda de expansão e preservação

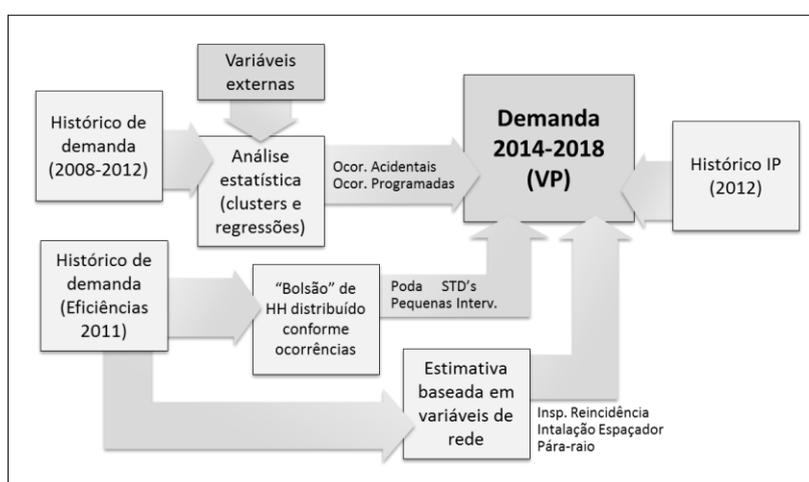


Figura 27 – Fluxograma da projeção de demanda operacional

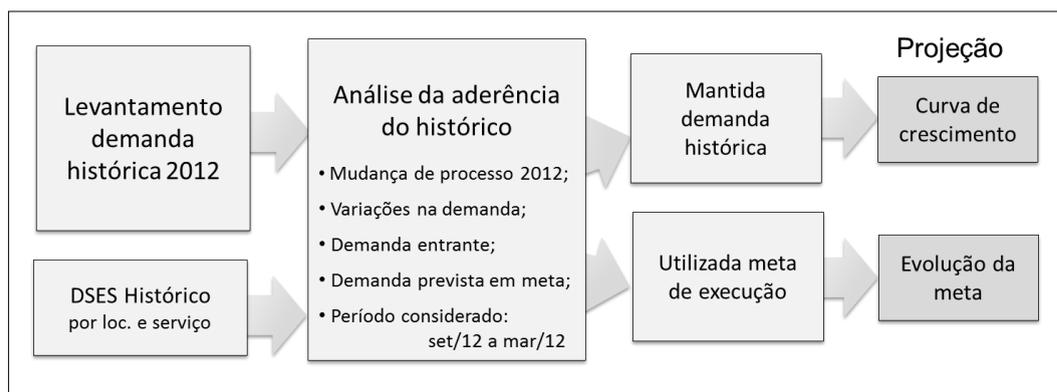


Figura 28 – Fluxograma da projeção de demanda comercial

6.5. Escopo e Resultados

A Região Centro da ELEKTRO é dividida em três gerências: Limeira, Rio Claro e Tatuí. Cada gerência é também dividida em supervisões que englobam as abrangências de nível 1 e 2. A aplicação do algoritmo evolutivo no modelo de otimização não apresentou oportunidades significativas de readequação de bases e equipes na gerência de Tatuí, que permaneceu inalterada. Por esse motivo, o estudo de caso a seguir detalha apenas as mudanças ocorridas nas gerências de Limeira e Rio Claro.

As gerências alvo do estudo possuem 27 localidades atendidas, entre elas as cidades de Limeira, Rio Claro, Pirassununga, Mogi Guaçu, Mogi Mirim, Araras e São João da Boa Vista, que concentram a maior parcela da demanda de serviços. A região do estudo é servida por importantes rodovias (Anhanguera, Bandeirantes, Adhemar de Barros) que interligam as principais localidades. Há pedágios em praticamente todos os trechos relevantes para a composição de custos e, de fato, a existência (ou não) de pedágios pode influenciar a escolha de bases.

O estudo de caso foi focado na otimização das bases e equipes para atendimento da demanda de expansão e preservação (abrangências de nível 2), considerando que a análise prévia de oportunidades relacionadas às outras demandas não apresentaram resultados relevantes, conforme mencionado. As gerências de Limeira e Rio Claro possuíam juntas 3 bases operacionais de nível 2, localizadas em Limeira, Mogi Guaçu e Pirassununga, conforme mostra a Figura 29.

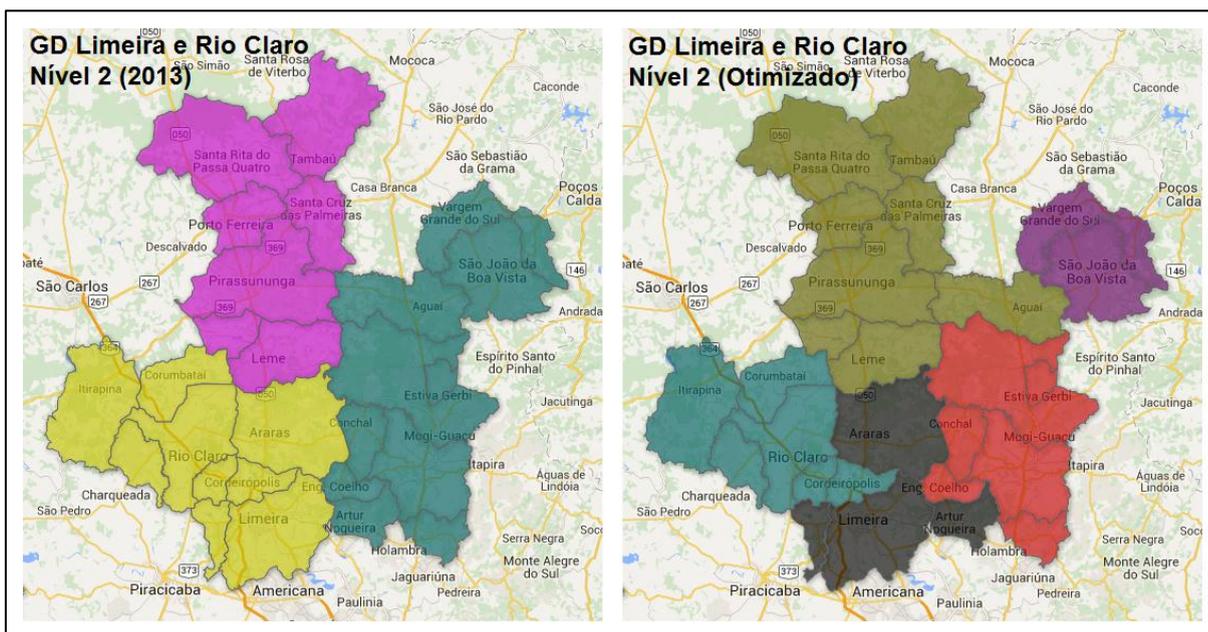


Figura 29 – Região Centro (Limeira e Rio Claro) – Abrangências nível 2

O modelo de otimização foi carregado com os dados de expansão e preservação, a configuração de bases nível 2 (anterior a 2013) e demais premissas destacadas na metodologia. O modelo projetou um custo operacional total anual para essa condição, sendo o objetivo do estudo a minimização deste custo.

A aplicação do algoritmo evolutivo no modelo resultou na proposição de uma nova configuração de bases nível 2, também mostrada na Figura 29, com a redução do custo total. O algoritmo propôs a abertura de 3 novas bases, em São João da Boa Vista, Rio Claro e Araras, pela divisão das bases existentes e mantendo estas com menor quantidade de equipes (com exceção de Pirassununga, que não teve alteração).

O escopo da mudança (quantidade de colaboradores e equipes) foi também ajustado de acordo com a disponibilidade de vagas ou colaboradores interessados na mudança de localidade de trabalho. A Figura 30 resume a mudança baseada na proposta do algoritmo.

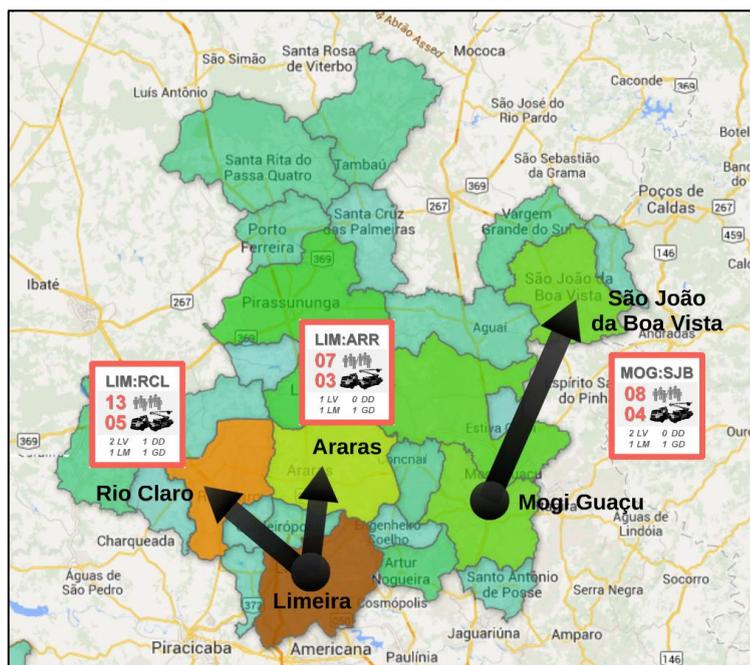


Figura 30 – Escopo de mudanças do estudo de caso

O resultado de custo total de ambas as configurações (2013 e cenário otimizado) é apresentado resumidamente nas Tabelas 33 e 34, respectivamente. O custo total calculado pelo modelo para a configuração de 2013 foi de R\$ 5.500.013, enquanto que o custo total otimizado pelo algoritmo evolutivo foi de R\$ 5.123.535. A redução do custo entre os cenários foi de 6,8%.

Nas tabelas que resumem o custo, pode-se observar também que a quantidade total de colaboradores no conjunto das bases é reduzida de 68 para 65 pessoas. Tal diferença reflete o ganho em capacidade de execução, proporcionada pelo aumento da produtividade diária das equipes com a redução dos deslocamentos. Na prática, no estudo de caso, não foram desmobilizadas equipes e foi mantida a quantidade original de colaboradores. Para a composição do *business case* foram consideradas apenas as premissas de redução de custos de deslocamentos.

Tabela 33 – Custos total das bases operacionais de nível 2, 2013

Cidade	Loc	Demanda EP	Base S/N	Base Origem	Base Origem TXT	Base Própria	HC	Custos (R\$)					Total
								Infra	Frota	Equipe	Desloc		
AGUAI	1	2.219	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	28.903	28.903	
AGUAS DA PRATA	2	1.138	0	115	MOGI GUACU	0		-	-	-	18.050	18.050	
ARARAS	12	9.878	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	76.976	76.976	
ARTUR NOGUEIRA	14	2.867	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	39.235	39.235	
CONCHAL	39	1.866	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	18.493	18.493	
CORDEIROPOLIS	41	2.712	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	16.742	16.742	
CORUMBATAI	43	1.344	0	100	LIMEIRA	0		-	-	-	17.219	17.219	
ENGENHEIRO COELHO	50	1.598	0	115	MOGI GUACU	0		-	-	-	16.488	16.488	
IPEUNA	74	788	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	10.773	10.773	
IRACEMAPOLIS	76	1.576	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	12.411	12.411	
ITIRAPINA	87	2.218	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	35.337	35.337	
LEME	99	8.144	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	53.579	53.579	
LIMEIRA	100	21.770	1	0	N/A	1	31	327.760	159.600	1.540.500	113.338	2.141.198	
MOGI GUACU	115	6.716	1	0	N/A	1	24	259.690	114.300	1.194.480	32.771	1.601.241	
MOGI MIRIM	116	7.754	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	38.831	38.831	
PIRASSUNUNGA	154	8.241	1	0	N/A	1	13	153.780	65.900	644.640	32.084	896.404	
PORTO FERREIRA	160	1.358	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	18.462	18.462	
RIO CLARO	170	15.376	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	132.426	132.426	
SANTA CRUZ DA CONCEICAO	177	1.181	0	154	PIRASSUNUNGA	0		-	-	-	8.176	8.176	
SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS	178	1.389	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	15.184	15.184	
SANTA GERTRUDES	180	4.360	0	100	LIMEIRA	0		-	-	-	28.920	28.920	
SANTA RITA DO PASSA QUATRO	185	3.943	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	40.121	40.121	
SANTO ANTONIO DA POSSE	187	1.063	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	14.506	14.506	
SAO JOAO DA BOA VISTA	191	9.880	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	123.558	123.558	
TAMBAU	203	3.109	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	35.156	35.156	
VARGEM GRANDE DO SUL	219	3.339	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	55.588	55.588	
ESTIVA GERBI	223	293	0	115	MOGI GUACU	0		-	-	-	6.034	6.034	
CUSTO TOTAL												5.500.013	

Tabela 34 – Custos total das bases operacionais de nível 2, otimizado

Cidade	Loc	Demanda EP	Base S/N	Base Origem	Base Origem TXT	Base Própria	HC	Custos (R\$)					Total
								Infra	Frota	Equipe	Desloc		
AGUAI	1	2.219	0	191	SJ BOA VISTA	1		-	-	-	23.041	23.041	
AGUAS DA PRATA	2	1.138	0	191	SJ BOA VISTA	0		-	-	-	6.623	6.623	
ARARAS	12	9.878	1	0	N/A	1	5	76.250	27.800	251.220	33.890	389.160	
ARTUR NOGUEIRA	14	2.867	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	39.235	39.235	
CONCHAL	39	1.866	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	18.493	18.493	
CORDEIROPOLIS	41	2.712	0	170	RIO CLARO	1		-	-	-	15.998	15.998	
CORUMBATAI	43	1.344	0	170	RIO CLARO	0		-	-	-	8.223	8.223	
ENGENHEIRO COELHO	50	1.598	0	115	MOGI GUACU	0		-	-	-	16.488	16.488	
IPEUNA	74	788	0	170	RIO CLARO	1		-	-	-	6.624	6.624	
IRACEMAPOLIS	76	1.576	0	100	LIMEIRA	1		-	-	-	12.411	12.411	
ITIRAPINA	87	2.218	0	170	RIO CLARO	1		-	-	-	22.042	22.042	
LEME	99	8.144	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	53.579	53.579	
LIMEIRA	100	21.770	1	0	N/A	1	13	153.780	65.900	644.640	113.338	977.658	
MOGI GUACU	115	6.716	1	0	N/A	1	13	153.780	65.900	644.640	32.771	897.091	
MOGI MIRIM	116	7.754	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	38.831	38.831	
PIRASSUNUNGA	154	8.241	1	0	N/A	1	13	153.780	65.900	644.640	32.084	896.404	
PORTO FERREIRA	160	1.358	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	18.462	18.462	
RIO CLARO	170	15.376	1	0	N/A	1	13	153.780	65.900	644.640	64.145	928.465	
SANTA CRUZ DA CONCEICAO	177	1.181	0	154	PIRASSUNUNGA	0		-	-	-	8.176	8.176	
SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS	178	1.389	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	15.184	15.184	
SANTA GERTRUDES	180	4.360	0	170	RIO CLARO	0		-	-	-	16.619	16.619	
SANTA RITA DO PASSA QUATRO	185	3.943	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	40.121	40.121	
SANTO ANTONIO DA POSSE	187	1.063	0	115	MOGI GUACU	1		-	-	-	14.506	14.506	
SAO JOAO DA BOA VISTA	191	9.880	1	0	N/A	1	8	104.630	38.100	407.640	40.302	590.672	
TAMBAU	203	3.109	0	154	PIRASSUNUNGA	1		-	-	-	35.156	35.156	
VARGEM GRANDE DO SUL	219	3.339	0	191	SJ BOA VISTA	1		-	-	-	28.236	28.236	
ESTIVA GERBI	223	293	0	115	MOGI GUACU	0		-	-	-	6.034	6.034	
CUSTO TOTAL												5.123.535	

A formação das novas bases nível 2 com o aproveitamento de infraestrutura própria exigiu adequações que foram executadas na implantação. Estes custos de

adequação não foram considerados previamente no modelo de otimização, dada a dificuldade de avaliação prévia da capacidade de todos os prédios existentes e estimação dos custos de adequação. Tais custos puderam ser suportados pelo plano de investimentos da empresa e foram considerados na análise de viabilidade econômica e financeira. Também os custos adicionais com a logística de materiais não foram considerados no modelo e igualmente inseridos na análise financeira final.

Para a avaliação da efetividade da mudança foram estabelecidas metas de redução de deslocamentos (km) e de aumento da produtividade diária das equipes. O desempenho antes e depois da mudança foi comparado considerando o período de 6 meses de análise: abril a setembro/2013 (antes); abril a setembro/2014 (depois). Os períodos equivalentes em meses do ano foram considerados para evitar distorções causadas pelo período de chuvas, que provoca a flutuação no volume da demanda operacional e altera também a execução das atividades de expansão e preservação.

Os resultados de redução de deslocamento e aumento da produtividade corresponderam ao esperado, com a redução total no período de 68 mil quilômetros em deslocamentos (-23,3%) e produção adicional de 7.361 USs (+24,1%) para o conjunto da Região Centro. A gerência de Tatuí foi considerada na análise por questão prática de apuração do resultado. As bases da gerência de Tatuí não tiveram alterações nem apresentaram melhorias nos resultados de deslocamentos, porém cabe ressaltar que em todas as bases ocorreu aumento de capacidade/produção, também devido a melhorias promovidas nos processos de planejamento e gestão por outras ações do Projeto Logística Operacional.

O resultado da análise de viabilidade realizada com dados do período posterior às mudanças foi positivo, com VPL (valor presente líquido) de 793 mil reais e *payback* de 2 anos, considerando a taxa de atratividade para projetos internos da ELEKTRO. Na análise, além dos custos adicionais de adequação e redução de custos de deslocamentos, foram considerados os custos financeiros e tributários (depreciação, imposto de renda) para a composição do fluxo de caixa descontado.

O estudo de caso envolvendo a Região Centro não apresentou oportunidades de desmobilização de infraestrutura. As bases de Limeira e Mogi Guaçu (bases

existentes na configuração original) cederam equipes e veículos para as novas bases. A divisão dessas bases reduz a necessidade de infraestrutura predial nessas localidades, sendo mais uma oportunidade para redução de custos ou ganho de capital a ser reinvestido no sistema elétrico. De fato, estas bases utilizam infraestrutura própria e não há interesse imediato da empresa em mudar de localização (prédio). Considerando os custos associados, essa possível ação requer planejamento operacional e financeiro de longo prazo. A oportunidade de desmobilização predial foi verificada em outras regiões da Elektro, na continuação do Projeto Logística Operacional, com a troca de prédios alugados em bases que cederam grande quantidade de equipes e tiveram redução do custo total. Essa eficiência foi capturada fora do modelo de otimização.

7. CONCLUSÃO

7.1. Considerações Finais

O presente trabalho propõe uma nova metodologia para otimização dos custos operacionais em concessionárias de distribuição de energia elétrica, fundamentada num modelo matemático do problema de Localização de Instalações, no caso, a alocação de bases e equipes operacionais para o atendimento da demanda de serviços numa área de concessão. A metodologia também está fundamentada na utilização de algoritmos evolutivos para a busca de soluções otimizadas para o problema de localização.

O modelamento matemático do problema mostrou-se aderente à realidade pela inspeção de resultados de formação de abrangências. No estudo de caso, dada a configuração de bases da situação original (2013), o modelo reconstruiu as abrangências de forma muito semelhante e apresentou um custo total aderente com a realidade. Assim, novas configurações foram avaliadas com auxílio de algoritmo evolutivo para minimizar o custo total, originando a proposta de mudança que foi implantada no estudo de caso com resultados muito positivos em face aos objetivos deste trabalho.

De fato, havendo conhecimento empírico da situação operacional de uma empresa, com a utilização do modelo de otimização e do mapa de calor da demanda, a busca de outras soluções pode ser realizada por heurística simples, inserindo manualmente no modelo as configurações de bases desejadas. Em alguns casos, por razões da condição geográfica e volume de demanda, uma configuração otimizada pode ser facilmente encontrada. No entanto, a utilização do algoritmo é essencial e oferece ótimos resultados quando não há conhecimento prévio da situação operacional e as premissas de entrada não evidenciam as oportunidades.

O desenvolvimento deste trabalho foi extremamente facilitado pelas condições oferecidas pela ELEKTRO com o Projeto Logística Operacional, que possibilitou a construção do conhecimento necessário para o modelamento do problema, o levantamento e detalhamento das premissas e dados de entrada, a realização do projeto piloto e desenvolvimento do estudo de caso.

A metodologia proposta busca contribuir no aspecto acadêmico da Pesquisa Operacional, com a exploração do conhecimento existente e desenvolvimento de um caso específico de aplicação de algoritmos evolutivos em Localização de Instalações. No Setor Elétrico, a metodologia é também relevante num cenário em que as empresas buscam melhorar a eficiência operacional e a qualidade do serviço para atender os anseios da sociedade (consumidores, agentes institucionais, acionistas). O modelo é de certa forma mais condicionado para a situação operacional da ELEKTRO, podendo, no entanto, ser facilmente adaptado e ainda melhorado para aplicação genérica em outras empresas, inclusive em prestadores de serviços públicos de fornecimento de gás e água, que possuem um modelo operacional semelhante.

7.2. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Metodologia para otimização de alocação de bases e equipes operacionais em distribuição de energia elétrica, com modelagem matemática do problema e aplicação de algoritmos evolutivos para busca de soluções ótimas, no campo de Localização de Instalações em Pesquisa Operacional;
- Metodologia de levantamento e de projeção de demanda de serviços em distribuição de energia elétrica, por localidade e por tipo de demanda e equipe, com tratamento e análise de informações para composição de mapa de calor da demanda e projeções em painéis;
- Metodologia de cálculo dos custos operacionais para distribuidoras de energia elétrica, sendo uma alternativa ao modelo da ANEEL para cálculo das despesas que compõem a parcela B da tarifa e medida da produtividade/eficiência das empresas;
- Descrição de modelo operacional para empresas de distribuição de energia elétrica, com o detalhamento dos requisitos operacionais e técnicos, organização da estrutura, táticas de atendimento, planejamento e gestão dos processos com base em empresa que é referência no setor.

7.3. Prosseguimento dos Estudos

A metodologia proposta neste trabalho poderá ainda ser aprimorada e complementada com pesquisa adicional, voltada tanto para o tema da Pesquisa Operacional, quanto para a operação e planejamento da distribuição de energia elétrica.

Em Pesquisa Operacional, no campo de Localização de Instalações, o modelo de otimização pode ser simplificado de forma a facilitar a sua aplicação em outras empresas ou setores, apenas focando na solução ótima de alocação de bases, com uma representação também mais simplificada dos custos operacionais e sem a dependência de um levantamento de dados detalhado. Por outro lado, considerando outros objetivos de negócio das empresas, a modelagem de custos pode ser ainda mais aprimorada, conforme mencionado no estudo de caso, incorporando os custos de adequação de infraestrutura e de logística de materiais, e a redução dos custos prediais com a desmobilização de prédios próprios ou alugados. Os custos da estrutura administrativa e de gestão também podem ser modelados para ter-se uma representação completa dos custos das distribuidoras.

O modelo de otimização pode também ser redesenhado para a resolução através de outros algoritmos de programação matemática, para ser aplicado em casos com menor quantidade de variáveis de decisão (binárias), oferecendo resultados mais rápidos ou precisos. Uma mudança mais profunda no modelo permitiria a utilização de algoritmos de programação linear e a busca de soluções num espaço maior, sem a predefinição das localidades candidatas.

Para a continuação da pesquisa com foco no Setor Elétrico, poderá ser agregada ao modelo de otimização a componente de custos associados à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Ou seja, a localização das bases poderá ser definida considerando metas de qualidade de fornecimento e outras ações que influem na demanda de serviços, como o desenvolvimento de automatismos na rede, mudanças de topologia e padrão de rede, estratégias de manutenção, entre outros fatores. O modelo pode ser desenvolvido de forma a otimizar múltiplos objetivos, tornando-se assim um problema mais complexo, em que se pretende otimizar objetivos conflitantes, como o custo total e também os indicadores de qualidade do fornecimento (duração e frequência das interrupções ou energia não

distribuída). Nesse caso, os problemas devem ser adequados ao escopo de conjuntos elétricos (agrupamento menor de localidades, subestações e rede de distribuição, que definem uma área de atuação) sendo possivelmente adotado outro tipo de algoritmo para resolução.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **MME**, Ministério de Minas e Energia. *RESEB – Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro – Sumário Executivo*, 2011
- [2] **ABRADEE**, Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. *Website <http://www.abradee.com.br>*, 2014
- [3] **EPE**, Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional – BEN 2014*, 2014
- [4] **EPE**, Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2020*, 2014
- [5] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. *PRORET, Procedimentos de Revisão Tarifária – Módulos 2.1 e 2.2*, 2011
- [6] **EL HAGE, F. S.** *A estrutura tarifária de uso das redes de distribuição de energia elétrica no Brasil: análise crítica do modelo vigente e nova proposta metodológica*, São Paulo, USP, 2011
- [7] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. *Metodologia de Cálculo dos Custos Operacionais – Nota Técnica no. 265/2010*, 2010
- [8] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. *PRODIST, Procedimentos de Distribuição – Módulo 8*, 2011
- [9] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. *Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica – REN no. 499/2012*, 2012
- [10] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. *Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico*, 2009
- [11] **MTE**, Ministério do Trabalho. *NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade*. 2004
- [12] **ELEKTRO**. *Website <http://www.elektro.com.br>*, 2014
- [13] **TAHA, H.** *Operations Research An Introduction*, Nova Jersey, Pearson, 8a. Edição, 2007

- [14] **LOPES, A. S.** *Desenvolvimento Regional: Problemática, Teoria, Modelos*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2001
- [15] **NILSSON, J.** *Principals of artificial intelligence*. Nova Iorque, Birkhauser, 1982
- [16] **GREENE, J. C., CARACALLI, V. J.** *Defining and describing the paradigm issue in mixed-method evaluation*. 1997
- [17] **THATSMATHS.** Website <http://thatsmaths.com>, 2013
- [18] **MORELLI, R.** *Artificial Intelligence, State Space Search*, 2011
- [19] **MATLAB.** *Tutorial for the optimization toolbox*, 2014
- [20] **GUROBI.** *Optimizing MIP problems*, 2014
- [21] **Turing, A.** *On Computable Numbers, With an Application to the Entscheidungsproblem*, Nova Jersey, Princeton, 1936
- [22] **CLAYMATH.** *P vs NP Problem*, 2014
- [23] **BATTA, R., BHADURY, J., JARAMILLO, J. H.** *On The Use of Genetic Algorithms to Solve Location Problems*, Computers and Operations Research, Volume 29, 2002
- [24] **CRAENEN, B., EIBEN, A. E., MARCHIORI E.** *How to Handle Constraints with Evolutionary Algorithms*, 2001
- [25] **COELHO, P. G., VON ZUBEN, F. J.** *Otimização Evolutiva Multiobjetivo*, UNICAMP-FEEC, 2010
- [26] **AUGUSTO, O. B., BENNIS, F., CARO, S.** *Multiobjective engineering design optimization problems: a sensitivity analysis approach*, Pesquisa Operacional, Volume 32, No. 3, Rio de Janeiro, 2012
- [27] **BLOCK, D., DUPUIS, E. M.** *Making the Country Work for the City: Von Thunen's Ideas in Geography, Agricultural Economics and the Sociology of Agriculture*, The American Journal of Economics and Sociology, 2001
- [28] **CLAUDE, C., RODRIGUE, JP., SLACK, B.** *The Geography of Transport Systems*, Nova Iorque, Roudedge, 3ª Edição, 2009

- [29] **EPA**, Environmental Protection Agency. *An Integrated Approach for Brownfield Redevelopment*, 1996
- [30] **DÖKMECI, V. F.** *Optimum location of hierarchical production units with respect to price-elastic demand*, US EPA, 1991
- [31] **MLADENOVIC, N., et al.** *The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches*, European Journal of Operational Research, 2007
- [32] **EISERT, H.A., MARIANOV, V.** *Foundation of Location Analysis*, Hardcover, 2011
- [33] **GARCÍA-LÓPEZ, F., et al.** *Parallelization of the scatter search for the p-median problem*, Journal of Parallel Computing, Elsevier, 2003
- [34] **ELEKTRO.** *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária e Edificações Individuais – Norma ND.10*, 2014
- [35] **ELEKTRO.** *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição – Norma ND.20*, 2014
- [36] **GLOVER, F.** *A Template For Scatter Search And Path Relinking*, Universidade do Colorado, 1998
- [37] **GLOVER, F., LAGUNA, M., MARTÍ, R.** *Principles of Scatter Search*, 2003
- [38] **ELEKTRO.** *Relatório de Sustentabilidade 2013*, 2014
- [39] **GOOGLE.** *Google Fusion Tables*, website tables.googlelabs.com. Google, 2014
- [40] **GUJARATI, D.** *Econometria Básica*, Rio de Janeiro, Editora Campus, 4a. Edição, 2005
- [41] **STOCK, J., WATSON, M.** *Econometria*, São Paulo, Addison Wesley, 2004