

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Maria Clara Ferreira Almeida da Silva

**ABORDAGEM PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA
INCIDÊNCIA DE INTERRUPÇÕES DE LONGA DURAÇÃO EM
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Santa Maria, RS
2019

Maria Clara Ferreira Almeida da Silva

**ABORDAGEM PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA INCIDÊNCIA
DE INTERRUPÇÕES DE LONGA DURAÇÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

ORIENTADOR: Prof. Vinícius Jacques Garcia

Santa Maria, RS
2019

da Silva, Maria Clara Ferreira Almeida
ABORDAGEM PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA
INCIDÊNCIA DE INTERRUPÇÕES DE LONGA DURAÇÃO EM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Maria Clara Ferreira
Almeida da Silva.- 2019.
77 p.; 30 cm

Orientador: Vinícius Jacques Garcia
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Tomada de decisão 2. Confiabilidade 3. Sistema de
distribuição 4. Operação I. Jacques Garcia, Vinícius II.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MARIA CLARA FERREIRA ALMEIDA DA SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Maria Clara Ferreira Almeida da Silva

**ABORDAGEM PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA INCIDÊNCIA
DE INTERRUPÇÕES DE LONGA DURAÇÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 30 de agosto de 2019:

Vinícius Jacques Garcia, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)

Lynceo Falavigna Braghirolli, Dr. (UFSC)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à todos que, de alguma forma, contribuíram na construção do caminho e conhecimento que hoje se apresenta com este documento.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Dr. Vinícius Jacques Garcia por toda contribuição e exemplo que me deu ao longo da pesquisa e que, incansavelmente apoiou e guiou ao longo desta jornada, sendo um ser humano admirável no âmbito pessoal e profissional.

Ao professor Daniel Pinheiro Bernardon, pela oportunidade de me juntar à equipe do projeto que desencadeou este estudo e à RGE Sul por financiar e prover o material necessário para beneficiar a abordagem aqui apresentada.

Aos meus colegas da sala 411, que contribuíram nas discussões e em pontos pertinentes ao trabalho e dividiram ao longo deste período as incertezas e angústias da pós graduação.

Aos meus pais, que me orientaram e trouxeram até aqui, com muita luta e me deram uma irmã que além de servir de exemplo de superação, incansavelmente apoiou e persistiu na construção deste caminho que hoje eu trilho. Sou muito grata em dividir a minha existência com vocês!

Ao meu companheiro Vinicius Coelho, que apoiou e elucidou pontos muito importantes deste trabalho e que divide comigo um caminho comum de muito respeito e amor.

E de toda esta jornada, o mais valoroso foi o caminho, que se cruzou com tantos outros que engrandeceram e enriqueceram esta caminhada.

A principal característica da natureza selvagem é a persistência. A perseverança. Isso não é algo que se faça. É algo que se é, em termos naturais e inatos. Quando não temos condição de vicejar, seguimos adiante até podermos voltar a vicejar.

(Clarissa Pinkola Estés - Mulheres que correm com os lobos)

RESUMO

ABORDAGEM PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA INCIDÊNCIA DE INTERRUPÇÕES DE LONGA DURAÇÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTORA: Maria Clara Ferreira Almeida da Silva

ORIENTADOR: Vinícius Jacques Garcia

A melhoria da confiabilidade do sistema elétrico de distribuição é um tópico recorrente em se tratando dos investimentos de uma concessionária de energia elétrica. Relacionado diretamente à resposta do centro de operações, a manutenção e correção das ocorrências de interrupções no sistema de distribuição tem papel fundamental na melhoria dos indicadores de confiabilidade e satisfação do usuário da rede. A abordagem proposta neste estudo apresenta resultados de cenários possíveis, capazes de auxiliar na construção de mapas de importância das áreas que, estocasticamente, apresentam maior probabilidade de ocorrências emergenciais e, por este motivo, geram situações de contingência e impacto nos indicadores de confiabilidade. Medido através da relação dos consumidores atingidos, a duração das faltas e a frequência de cada interrupção longa, o impacto causado pelas interrupções é passível de priorização, visto que a relação de áreas atingidas apresenta diferentes sinistros. Esta pesquisa visa contribuir tanto no processo de tomada de decisão quanto ao despacho das ocorrências para as equipes de manutenção, uma vez que analisa o impacto dos cenários de interrupções passadas, relacionando “espaço x tempo” e projetando possíveis futuros eventos. A pontuação de locais que apresentam maior propensão aos eventos que geram interrupções no mapa de atuação das empresas de distribuição tende a facilitar a orientação dos centros de operação e na priorização de locais e ordens. A aplicação desta abordagem tem como direcionamento garantir então maior assertividade ao reconhecer cenários possíveis e localizações predispostas à interrupção do fornecimento de energia, contribuindo tanto no viés cognitivo do operador quanto ao cenário e impacto de suas ações, além das possibilidades de solucionar mais rapidamente problemas cotidianos do setor de manutenção.

Palavras-chave: Tomada de decisão. Confiabilidade. Sistema de distribuição. Operação.

ABSTRACT

APPROACH TO PRIORITIZE CRITICAL AREAS FOR LONG-TERM OUTAGES IN THE ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEM

AUTHOR: Maria Clara Ferreira Almeida da Silva

ADVISOR: Vinícius Jacques Garcia

The reliability improvement of the electricity distribution system is a recurring topic when it comes to the investments of an electric utility. Directly related to the response of the operations center, the maintenance and correction of occurrences of interruptions in the distribution system plays a fundamental role in improving reliability and user satisfaction indicators of the network. The approach proposed in this study presents the results of possible scenarios, which may help in the construction of maps of importance of the areas that stochastically present a higher probability of emergency occurrences and, therefore, generate contingency situations and impact on reliability indicators. Measured through the ratio of consumers reached, the duration of the faults and the frequency of each long outage, the impact caused by the outages can be prioritized, as the list of affected areas has different claims. This research tends to contribute to the decision-making process for dispatching occurrences to maintenance teams, as it analyzes the impact of past interruption scenarios, relating space x time and projecting possible future events. The scoring of locations that are more prone to events that generate interruptions in the distribution companies' operating map tends to facilitate the orientation of operation centers and the prioritization of locations and orders. The application of this approach aims to ensure greater assertiveness by recognizing possible scenarios and locations predisposed to interruption of power supply, contributing both to the operator's cognitive bias and the scenario and impact of their actions, as well as the possibilities to solve problems faster everyday.

Keywords: Decision-making. Reliability. Distribution system. Operation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ranking Brasileiro de DEC e FEC	17
Figura 2.2 – Índices de confiabilidade DEC e FEC anuais na área estudada	18
Figura 2.3 – Classificação dos dados de entrada para métodos de localização de falhas e interrupções	22
Figura 2.4 – Estrutura hierarquica do método AHP	31
Figura 3.1 – Níveis de operação do Sistema de Distribuição	36
Figura 4.1 – Etapas da abordagem proposta	40
Figura 4.2 – Agrupamento das áreas e interrupções	42
Figura 5.1 – Comportamento da amostra apra o número de ocorrências	47
Figura 5.2 – Área de abrangência	48
Figura 5.3 – Mapa de Calor da quantidade de ocorrências para particionamento de 400m	50
Figura 5.4 – Mapa de Calor da quantidade de ocorrências para particionamento de 1km	51
Figura 5.5 – Mapa de Calor da quantidade de ocorrências para particionamento de 5km	52
Figura 5.6 – Histograma das áreas de ocorrência de interrupção	53
Figura 5.7 – Mapa de Calor da quantidade de consumidores afetados para particionamento de 400m	54
Figura 5.8 – Áreas selecionadas para análise de priorização	56
Figura A.1 – Ocorrências de 2014	64
Figura A.2 – Ocorrências de 2015	65
Figura A.3 – Ocorrências de 2016	66
Figura A.4 – Ocorrências de 2017	67
Figura B.1 – Mapa de ocorrência da quantidade de clientes afetados para particionamento de 1km	68
Figura B.2 – Mapa de ocorrência do DEC para particionamento de 1km	69
Figura B.3 – Mapa de ocorrência do FEC para particionamento de 1km	70
Figura B.4 – Mapa de ocorrência do Tempo de Interrupção para particionamento de 1km	71
Figura B.5 – Mapa de ocorrência do Tempo de Serviço para particionamento de 1km ...	72
Figura B.6 – Mapa de ocorrência da quantidade de clientes afetados para particionamento de 5km	73
Figura B.7 – Mapa de ocorrência do DEC para particionamento de 5km	74
Figura B.8 – Mapa de ocorrência do FEC para particionamento de 5km	75
Figura B.9 – Mapa de ocorrência do Tempo de Interrupção para particionamento de 5km	76
Figura B.10 – Mapa de ocorrência do Tempo de Serviço para particionamento de 5km ..	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características dos modelos de previsão.....	26
Tabela 2.2 – Escala fundamental de Saaty	31
Tabela 2.3 – Índice de Randômico de consistência (IR) em relação ao número de critérios comparados.....	33
Tabela 5.1 – Ocorrências mensais da amostra	46
Tabela 5.2 – Média dos indicadores analisados para o período da amostra.....	48
Tabela 5.3 – Teste para particionamento	49
Tabela 5.4 – Priorização dos critérios de análise	55
Tabela 5.5 – Critério de análise e priorização.....	55
Tabela 5.6 – Cálculo do autovalor máximo.....	56
Tabela 5.7 – Áreas priorizadas após análise dos critérios	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AHP</i>	Analytic Hierarchy Process
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>DEC</i>	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
<i>FEC</i>	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
<i>GIS</i>	Sistema de Informações Geográficas
<i>GPS</i>	Sistema de Posicionamento Global
<i>NIE</i>	Número de Ocorrências Emergenciais com registro de Interrupção de Energia Elétrica
<i>PRODIST</i>	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
<i>SD</i>	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	ESTRUTURA	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	DESEMPENHO DO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO QUANTO À CONFIABILIDADE	14
2.1.1	A análise do impacto das interrupções no sistema de distribuição	18
2.2	A LOCALIZAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	20
2.2.1	Métodos de localização de falhas e interrupções	21
2.3	PREVISÃO DA DEMANDA DE OCORRÊNCIAS	24
2.3.1	A previsão de eventos orientada ao sistema de distribuição	27
2.4	SUORTE À TOMADA DE DECISÃO	29
2.4.1	Processo de Análise Hierárquica	30
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	33
3	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DAS INTERRUPÇÕES DE FORNECIMENTO DE ENERGIA	35
4	ABORDAGEM PROPOSTA	39
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	39
4.2	VARIÁVEIS ANALISADAS E A QUALIDADE DA INFORMAÇÃO	40
4.3	AGRUPAMENTO E SELEÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS	41
4.4	IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS	43
4.5	AVALIAÇÃO DO IMPACTO PARA A TOMADA DE DECISÃO	44
5	ESTUDO DE CASO	45
5.1	ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS E A DEMANDA DE OCORRÊNCIAS	45
5.2	ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DA AMOSTRA	46
5.3	LOCALIZAÇÃO E NÍVEL DE OCORRÊNCIA DE INTERRUPÇÕES	49
5.4	ESTUDO DO IMPACTO E PRIORIZAÇÃO DAS LOCALIZAÇÕES	49
5.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
6	CONCLUSÃO	58
6.1	TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTOCÁSTICA ANUAL	64
	APÊNDICE B – MAPAS DE OCORRÊNCIA	68

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem essencial no mundo contemporâneo para os mais diversos tipos de usuários. Em se tratando de um usuário convencional, o conforto e a satisfação do consumidor ao usufruir do serviço prestado pelas distribuidoras de energia é o ponto alto da comercialização de energia. Entretanto existe a indispensabilidade dos usuários comerciais e industriais quanto às suas atividades comerciais e produtivas, tal que uma interrupção no fornecimento de energia implica na interrupção da atividade ou produção industrial (BERNARDON et al., 2015).

Para a distribuidora de energia elétrica, a garantia do fornecimento, continuidade e qualidade do serviço e produto entregue ao consumidor é escopo permanente na busca por melhorias contínuas, não apenas em relação à satisfação do consumidor final ou pela necessidade dos mesmos, mas também pela responsabilidade dadas as resoluções normativas específicas em relação às condições de fornecimento de energia e aos níveis de continuidade e qualidade da energia elétrica expedidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (ANEEL, 2010, 2018c)

No intuito de satisfazer os índices de desempenho definidos pela ANEEL no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, o qual define os indicadores de qualidade e continuidade, as concessionárias de energia precisam dispor de uma estrutura para a operação do sistema, assim como estratégias de planejamento que contribuam com a execução das atividades diárias relacionadas à manutenção, correção e avarias diversas que ocorrem no sistema de distribuição. (ANEEL, 2018c)

Em se tratando de problemas que causem interrupção no fornecimento de energia, ainda que a modernização do sistema de distribuição de energia considere o engrandecimento dos níveis de automação do sistema elétrico como um todo e as diversas pesquisas acerca das redes inteligentes prometem trazer soluções eficazes, alguns problemas, tais como interrupções no fornecimento e sinistros da rede, e aspectos funcionais, construtivos e operacionais do sistema são, atualmente, inevitáveis. (ARIF et al., 2017)

A inevitabilidade da interrupção do fornecimento de energia, seja esta devido à segurança necessária para a realização de atividades de manutenção e expansão do sistema de distribuição ou pela atuação ou defeito de componentes da rede que coloquem essa em situação de contingência, torna a intervenção humana necessária e imprescindível em diversos casos, dos mais críticos aos mais triviais. (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009)

O centro de operações de uma concessionária de distribuição de energia trabalha com o dinamismo do despacho das ordens de serviço diariamente, direcionando equipes no atendimento das ordens comerciais, agendadas previamente, e das ordens emergenciais, geradas aleatoriamente (GARCIA et al., 2012). Devido a caracterização dinâmica da entrada

de ordens de serviço, a resposta do centro de operações é necessária e deve ser imediata e, como o impacto de cada ocorrência é incógnito, a priorização é relativa à natureza da ordem, seja ela de aspecto emergencial ou comercial, e à solicitação de atendimento, desconsiderando a quantidade e perfil dos consumidores afetados, entre outros fatores de importância no impacto da falta de energia. (SCHMITZ et al., 2017)

Dentro do contexto de busca pela melhoria da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia, com viés no centro de operações e despacho de ordens de serviço emergenciais, esta dissertação busca contribuir com a tomada de decisão no planejamento e resposta às perturbações do sistema. Promovendo a antecipação dos pontos de maior impacto e que demandam mais atenção das equipes de manutenção, permitindo assim que o centro de operações distribua melhor seus recursos para que o tempo de resposta às perturbações diminua, promovendo então a melhoria dos índices de confiabilidade e, conseqüentemente, da qualidade do serviço prestado pela concessionária.

1.1 OBJETIVOS

De modo geral, este trabalho investiga, através da análise das faltas de energia do sistema de distribuição, a relação do impacto causado por estas interrupções, de maneira a sugerir possíveis melhorias para o atendimento e mitigação dos cenários de contingência e falta de energia. A intenção é definir pontos de atenção, considerando a otimização das equipes de manutenção quanto à logística e restabelecimento do serviço, contribuindo assim para a minimização do tempo do sinistro e, por consequência, melhoria nos indicadores de confiabilidade da rede de distribuição.

A metodologia desenvolvida busca tornar-se um facilitador na tomada de decisão em relação ao planejamento do centro de operações na distribuição geográfica e quantitativa das equipes de manutenção, visando contribuir na redução do tempo e conseqüentemente dos impactos causados pelas falhas do sistema, melhorando o tempo de resposta das equipes.

Para isto, definiu-se algumas etapas do estudo que se apresentam como objetivos específicos deste trabalho, sendo estes:

- i. Analisar o comportamento das ordens emergenciais em relação à localização destas no sistema de distribuição de energia elétrica;
- ii. Quantificar o impacto das faltas em relação à confiabilidade do sistema de distribuição, projetando impactos a partir da análise do histórico de demandas e o cálculo dos indicadores de duração e frequência equivalentes das interrupções das unidades consumidoras, assim como o número de consumidores impactados por estas ocorrências.
- iii. Contribuir no processo de tomada de decisão relacionando o resultado das análises na

priorização de locais do mapa de abrangência da concessionária, priorizando áreas de maior impacto nos indicadores de confiabilidade do sistema baseado na análise histórica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a ANEEL (2018a), as concessionárias brasileiras tiveram um déficit de cerca de R\$480 milhões no ano de 2017, creditado às compensações relacionadas aos índices de confiabilidade do sistema de distribuição. A partir da análise feita pela ANEEL sobre os índices de qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras de energia, calcula-se que a média de horas que um consumidor ficou sem energia no ano de 2017 é de 14,35 horas, com uma frequência média de 8,2 interrupções no mesmo período.

Ainda que os índices de confiabilidade apresentem diminuição em relação àqueles calculados em 2016, a melhoria da qualidade do serviço prestado é considerado uma questão de grande relevância para as concessionárias de energia, dado seu alto impacto orçamentário.

Dada a importância da manutenção dos índices de confiabilidade do sistema de distribuição e da qualidade do serviço, percebe-se a importância em otimizar o serviço prestado pelas concessionárias de energia, assim como o despacho das ordens, nos casos em que o impacto da interrupção seja maior, a fim de minimizar o tempo de resposta e de solução para tais casos. (ARIF et al., 2017)

A eficiência e qualidade do serviço prestado pelas concessionárias é mensurado a partir da quantidade de ocorrências emergenciais e o tempo total de atendimento destas ordens para cada conjunto de unidades consumidoras (ANEEL, 2018d). Quando uma decisão acerca do atendimento de perturbações, ou ordens emergenciais, é aleatória ou reativa, sem o conhecimento das possíveis variáveis anteriores ou futuras e do impacto de cada ponto de falta, o resultado pode significar a perda da visão geral do problema, resultando então em decisões equivocadas quanto ao aspecto geral do problema (FERRUCCI; BOCK; GENDREAU, 2013).

A consequência da perda da visão geral do problema é o possível agravamento no impacto das interrupções mais críticas. Com essa premissa justifica-se a importância de antecipar incertezas e definir um comportamento provável para atender tais emergências.

A abordagem desenvolvida nesta dissertação tem como objetivo a contribuição na tomada de decisão quanto ao despacho de ocorrências emergenciais com interrupção de energia, representado pelo indicativo denominado Número de Ocorrências Emergenciais com Registro de Interrupção de Energia Elétrica (NIE), destacando os pontos do sistema que apresentam maior projeção de impacto das possíveis interrupções na distribuição por meio da previsão de ocorrência desses eventos, considerando assim o efeito das interrupções na determinação de uma possível causa da ocorrência.

1.3 ESTRUTURA

Almejando a obtenção dos objetivos propostos anteriormente, este trabalho está estruturado em seis capítulos, os quais buscam a construção do conhecimento necessário para o desenvolvimento e aplicação da metodologia proposta.

Primeiramente, apresenta-se esta introdução, contendo os objetivos do estudo e do desenvolvimento da metodologia, a justificativa da busca pela solução do problema apresentado e a estrutura desta dissertação.

O segundo capítulo compreende a revisão bibliográfica, a qual apresenta os estudos publicados anteriormente em relação ao tema abordado, subdividido em três tópicos. O primeiro tópico apresenta estudos referentes à confiabilidade do sistema de distribuição. O segundo tópico apresenta referências relacionadas à análise do impacto das interrupções e a localização destas no sistema de distribuição de energia elétrica, apresentando os métodos comumente utilizados com esta finalidade. Ainda neste capítulo apresenta-se estudos e técnicas de previsão de demanda, exemplificados por métodos orientados para ocorrências e serviços no sistema de distribuição e, por fim, um apanhado sobre ferramentas utilizadas como auxiliares da tomada de decisão, em especial a técnica utilizada por este estudo.

O capítulo 3 contém o objeto do estudo, apresentando o problema estudado de maneira prática, buscando o melhor entendimento do leitor quanto às especificações do mesmo e dissertando acerca de como este problema afeta tanto a distribuidora de energia quanto o usuário do sistema de distribuição. No capítulo 4 são apresentadas as etapas que constituem a abordagem do problema desenvolvida ao longo desta pesquisa.

No capítulo 5 encontra-se a aplicação da metodologia desenvolvida em um estudo de caso baseado no banco de dados referente à base operacional de Santa Maria-RS, composta por quatro subestações geridas pela concessionária de distribuição RGE Sul. Por fim, o último capítulo apresenta as considerações e contribuições estudadas a partir dos resultados obtidos no estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de construir uma base teórica para este trabalho, a revisão da literatura foi desenvolvida a partir dos trabalhos científicos que melhor se relacionam com o tema e os objetivos propostos e, assim, categorizadas para melhor organização e entendimento dos tópicos presentes.

Primeiramente será abordado a qualidade de serviço do sistema elétrico de distribuição, assim como os esforços relacionados aos indicadores adotados para estabelecer os limites da qualidade e confiabilidade do sistema de distribuição. Posteriormente serão apresentadas estudos relacionados aos impactos causados pelas faltas de energia no sistema de distribuição de eletricidade, assim como as técnicas utilizadas para localizar esses sinistros.

Seguindo este capítulo, apresentam-se estudos relacionados ao processo de previsão de demanda e as metodologias adotadas para esta finalidade que focam o sistema de distribuição de energia e, principalmente, as ocorrências de faltas e manutenção deste.

Por fim, apresentam-se estudos relacionados à tomada de decisão, os quais mostram a importância das técnicas desenvolvidas para suportar tal etapa em processos e decisões complexas, assim como a contribuição desta na avaliação de indicadores.

2.1 DESEMPENHO DO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO QUANTO À CONFIABILIDADE

Com a ascensão da tecnologia e automação de processos diários e indispensáveis, correlacionado a interdependência destes com a energia elétrica, a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia, assim como a confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica se tornou um recurso essencial e indispensável. Dada a importância da regulação e fiscalização das atividades de todos os setores do sistema elétrico de potência, foi instituída pela lei Nº 9.427/96. A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, responsável por mediar conflitos e garantir a universalização do serviço de qualidade. (BRASIL, 1996)

Dada tamanha importância da energia elétrica na sociedade, as políticas de confiabilidade e qualidade da energia que é entregue ao consumidor final têm se adequado ao cenário e as concessionárias de energia tem dado maior ênfase a este aspecto, retomando este tópico já recorrente na pesquisa científica com um viés mais moderno em relação aos recursos tecnológicos existentes e utilizando-se dos dados disponibilizados por tais recursos e equipamentos. Com isso, desde 2010 está em vigor as regras contidas no PRODIST - Procedimentos de Distribuição, manual redigido pela ANEEL que engloba em seus 11 módulos os procedimentos obrigatórios e os critérios para avaliação de todas as

concessionárias e agentes de distribuição do Brasil.(ANEEL, 2012a) (ANEEL, 2016)

Numa visão geral, o conceito de qualidade e produtividade são fatores essenciais para a competitividade de toda e qualquer empresa do setor produtivo, não sendo diferente para empresas do setor elétrico (LOBO, 2003). A busca de soluções que englobam a otimização dos recursos na melhoria do desempenho, considerando o custo/benefício dos processos e decisões tornaram-se ainda mais importante com a abertura do mercado de energia elétrica, através da normativa 482 da ANEEL (2012b). O mercado de energia está cada vez mais competitivo, dada a entrada dos consumidores ativos e a gama de opções que empresas do setor elétrico estão oferecendo aos usuários. Com isso mostrou-se pulsante a necessidade de adequação por parte das concessionárias em relação ao novo cenário e à garantia da qualidade do serviço prestado e da energia comercializada.

Kagan, Robba e Schmidt (2009) apresentam a busca pela melhoria do desempenho do sistema elétrico de distribuição como essencial para todos os agentes do sistema, tanto regulatórios como atuantes, devido à necessidade do equilíbrio do sistema e a diminuição dos prejuízos causados pela baixa confiabilidade e problemas de qualidade no serviço prestado e na energia entregue ao consumidor.

Considera-se como confiabilidade do sistema de distribuição a habilidade de operação do sistema em fornecer energia ininterruptamente ao consumidor final. A fim de avaliar esse desempenho, a ANEEL optou pela adoção de limites operativos, definindo parâmetros e indicadores de qualidade e continuidade do serviço prestado pelas distribuidoras, estabelecidos no módulo 8 do PRODIST(ANEEL, 2018c) que, de maneira individual e coletiva em relação à unidades consumidoras, visam manter um padrão no serviço prestado pelas distribuidoras, adotando para cada limite transgredido uma compensação para a agência e para o próprio consumidor.

Fundamentalmente ao falarmos em confiabilidade no sistema de distribuição, nos deparamos com as inevitáveis interrupções no fornecimento de energia, remetendo diretamente à duração e frequência de tais sinistros. Sendo assim, a ANEEL (2012a) define alguns conceitos importantes na definição dos tipos de interrupções que acometem o sistema de distribuição, assim como os tipos de ocorrência atendidos pelas distribuidora. Dentre os conceitos necessários para o estudo desenvolvido, os seguintes são descritos pelo PRODIST:

- i. Interrupção de emergência: A interrupção é caracterizada pela descontinuidade do atendimento a uma unidade consumidora ou ponto de conexão. Considerando a emergência, define-se como o desligamento de um equipamento ou linha sem tempo de comunicar o centro de operações, evitando danos ao equipamento, linha e risco para a integridade física de pessoas, do meio ambiente ou do sistema.
- ii. Interrupção de longa duração: Toda interrupção que apresenta duração igual ou superior a três minutos contínuos.
- iii. Interrupção temporária ou momentânea: São as interrupções que têm duração inferior a 3

minutos e superior a 3 segundos.

- iv. Ocorrência emergencial: refere-se ao atendimento de ocorrências provocadas por um evento emergencial e não programado, o qual gera deslocamento de equipes de manutenção.
- v. Número de ocorrências emergenciais com interrupção de energia (NIE): Corresponde à quantidade de ocorrências emergenciais que apresentaram registro de interrupção de energia elétrica em um conjunto de unidades consumidoras determinado, o qual necessita de deslocamento de equipes de atendimento.

Além dos conceitos acima, definidos no primeiro módulo do PRODIST, a avaliação do desempenho do sistema conta com índices, os quais são apresentados no módulo 8 do PRODIST, que abrange de modo geral aspectos da qualidade de serviço e da energia elétrica como produto, assim como os indicadores individuais e coletivos de confiabilidade do sistema.(ANEEL, 2018c). Utilizados estrategicamente pela ANEEL e pelas distribuidoras de energia, os indicadores coletivos definem o comportamento do sistema em relação às interrupções, reportando a duração e a frequência equivalente destes eventos por unidade consumidora do sistema.

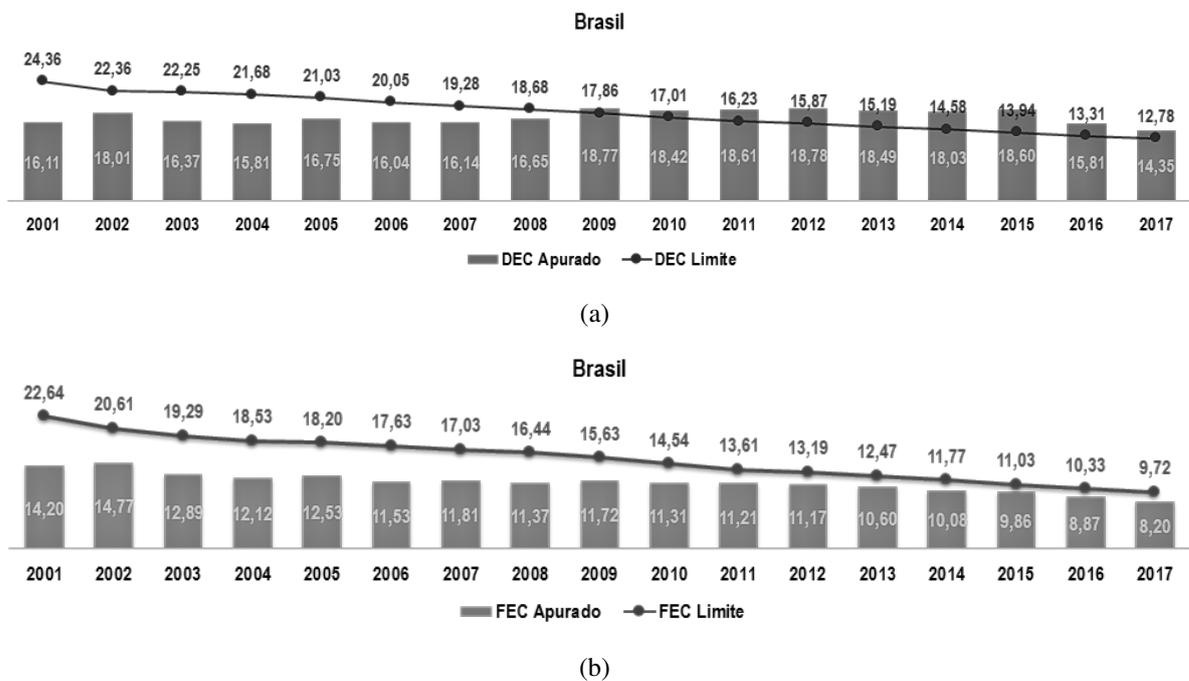
O índice denominado DEC - Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora, exprime o período de tempo em que cada unidade consumidora de um conjunto determinado permaneceu, em média, sem o fornecimento de energia elétrica. Este indicador está intimamente relacionado à operação do sistema e à resposta do centro de operações quanto às interrupções ocorridas. Já o índice referente à frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora - FEC, considera a quantidade de interrupções que, em média, acometeu cada unidade consumidora do conjunto para um período determinado de observação. Por sua vez, o FEC está relacionado à confiabilidade do sistema em relação à falta de manutenção ou fragilidade do sistema. (ANEEL, 2016)

Segundo o relatório anual realizado pela ANEEL (2018d) acerca do desempenho das concessionárias de energia em relação aos índices de confiabilidade e qualidade do sistema de distribuição de energia, o número de ocorrências emergenciais registradas em decorrência de interrupção no fornecimento de energia elétrica (NIE), verificado no período de apuração até a chegada de uma equipe de emergência, para o ano de 2017 na área de abrangência da concessionária analisada neste trabalho foi de 121.515, para as mais de 225 mil ocorrências emergenciais relatadas no mesmo ano. O registro de ocorrências caracterizadas por NIE em 2017 fez com que este represente, até então, o ano com maior número de interrupções decorrentes de ordens emergenciais registrado pela ANEEL desde 2009.

Contrapondo os dados referentes à ocorrências emergenciais com registro de interrupção, a tecnologia e os investimentos aplicados no setor de distribuição e os avanço relacionados à confiabilidade e ao atendimento dessas ocorrências, associado às novas regras

de fornecimento nos contratos das distribuidoras contribuiu no decréscimo dos índices coletivos de duração e frequência equivalentes de interrupções por unidade consumidora (DEC e FEC), como mostra a Figura 2.1(ANEEL, 2018d).

Figura 2.1 – Ranking Brasileiro de DEC e FEC



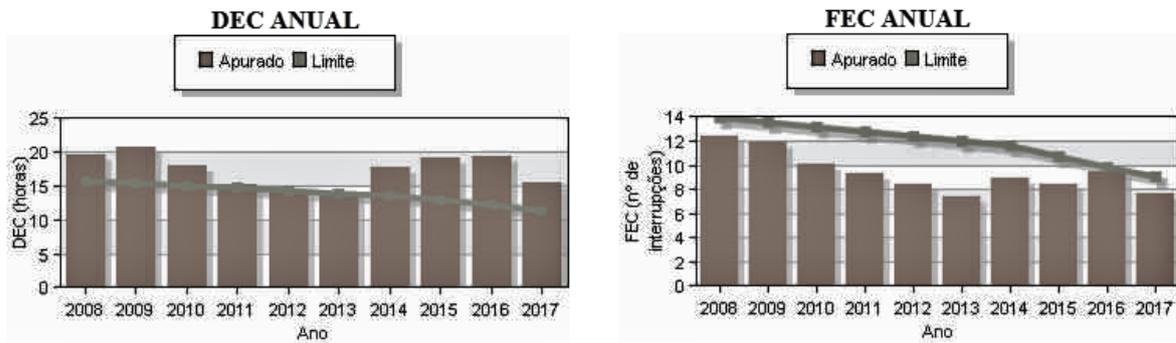
Fonte: ANEEL (2018b)

Contudo, a duração equivalente das interrupções longas (DEC) ultrapassa o limite exigido pela ANEEL desde 2009 no cenário nacional, enquanto o indicador de frequência das interrupções longas (FEC) se mantém em decréscimo, respeitando o limite imposto. A Figura 2.2. mostra a semelhança do comportamento analisado também na área da concessionária estudada, com os índices de duração e frequência das interrupções ocorridas nesta área extratificados anualmente desde o ano de 2008.

Para os analistas da ANEEL (2016), este comportamento se dá pela dicotomia nos planos de investimento das empresas do setor, que focam na modernização progressiva da rede de distribuição, promovendo a instalação de novos equipamentos que garantem a segurança e servem de base aos planos de expansão do sistema, e deixam de lado a manutenção do centro de operações e a contratação de novas equipes técnicas para garantir a rapidez da resposta na resolução das interrupções.

É importante reiterar que a análise completa da confiabilidade de um sistema é composta por diversos tipos de indicadores, não apenas a Duração, frequência e quantidade de consumidores afetados pelos eventos que causam interrupção no fornecimento de energia. Segundo Kagan, Robba e Schmidt (2009), a topologia da rede, as características dos alimentadores que compõe a subestação, os equipamentos de proteção e seccionamento, a área

Figura 2.2 – Índices de confiabilidade DEC e FEC anuais na área estudada da área estudada FEC



Fonte: Adaptado de ANEEL (2018d).

de cobertura de cada um dos dispositivos citados, assim como a quantidade de consumidores e o tipo de cargas de cada um deles, considerando a energia absorvida pelos mesmos devem fazer parte de análises mais completas, garantindo resultados mais assertivos em relação aos tópicos estudados.

Assim, diversas metodologias de avaliação do impacto das interrupções e níveis de confiabilidade são encontradas na literatura, considerando os mais diversos indicadores e características dos equipamentos que compõem o sistema de distribuição.

2.1.1 A análise do impacto das interrupções no sistema de distribuição

O impacto das interrupções de fornecimento de energia na rede de distribuição têm como parâmetros de estudo os indicadores de confiabilidade coletivos e individuais, assim como as características topográficas e equipamentos da rede de distribuição, como analisado anteriormente neste capítulo.

Diversos métodos são propostos para analisar os estados do sistema de distribuição como um todo, considerando equipamentos ou informações obtidas acerca do estado de operação do sistema. O objetivo geral do estudo de impacto das interrupções no fornecimento de energia permeiam o aperfeiçoamento da rede na melhoria dos índices de confiabilidade, encarados como uma possível minimização do impacto destas faltas, assim como a contribuição no processo decisório em relação ao planejamento estratégico a curto e longo prazo no orçamento das empresas do setor elétrico.

Os efeitos causados pelas interrupções no sistema de distribuição, normalmente, são quantificados por um conjunto de índices e informações, baseados principalmente nas informações acerca da quantidade de consumidores afetados pelo sinistro, na energia não suprida (ENS), duração do sinistro e a frequência de ocorrências do sistema. A análise deste

índices demanda recursos e pesquisas na busca por atenuação dos mesmos, visto que a interpretação desses índices demonstram a confiabilidade e a eficiência do sistema de distribuição, assim como a efetividade dos recursos destinados à proteção e manutenção da continuidade da distribuição.(KAGAN; ROBBIA; SCHMIDT, 2009; ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017; BANERJEE et al., 2017)

Os métodos de análise do impacto das faltas no sistema de distribuição são construídos utilizando dois tipos de abordagem, podendo conter a avaliação do histórico de ocorrências de falhas nos equipamentos ou pontos da rede, ou a avaliação preditiva dos equipamentos da rede a partir da inspeção e acompanhamento dos mesmos.

Sabe-se que, para fins de estudo, podemos considerar a ocorrência de apenas dois estados na operação de todos os componentes do sistema de distribuição, o de operação normal e o de falha (WANG et al., 2011). Esse conceito aplicado aos componentes do sistema é traduzido como a taxa de falha de um equipamento, que é calculada a partir do histórico de ocorrências de faltas ou falhas no período de um ano por unidade de comprimento da rede. (KAGAN; ROBBIA; SCHMIDT, 2009)

Considerando os estados da rede como componentes estocásticos de uma análise, Wang et al. (2011) analisa de forma integrada o desempenho do sistema de distribuição e a confiabilidade do mesmo utilizando Modelos de Markov para a obtenção da taxa de falha do sistema de distribuição analisado, baseado nos fatores dinâmicos que influenciam na mudança de estado na operação dos componentes da rede.

Utilizando a taxa de falha dos equipamentos de uma rede conhecida no cálculo dos índices de confiabilidade e qualidade da distribuição, o método proposto por Tirapong e Titti (2014) oferece soluções baseadas na manutenção preventiva e corretiva nos pontos de maior vulnerabilidade da rede estudada, considerando características como severidade, frequência e impacto dos possíveis eventos previstos. O método é baseado na análise das interrupções, manutenções e aperfeiçoamentos do sistema de distribuição na melhoria dos índices de confiabilidade e desempenho do sistema contribuindo a longo prazo na atenuação dos impactos causados pelas interrupções.

Agüero et al. (2009) consideram em seu estudo a melhoria da confiabilidade do sistema de distribuição a partir de um modelo preditivo, utilizando a análise da taxa de falha e do tempo médio de reparo de cada tipo de equipamento que compõe a rede de distribuição estudada. A melhoria nos índices de confiabilidade se deram a partir da implementação de planos de aquisição e aperfeiçoamento da rede de distribuição, fazendo um paralelo entre o impacto dos índices de confiabilidade e o custo da implementação dos equipamentos, traçando assim um planejamento estratégico de investimentos.

O método proposto por Banerjee et al. (2017) baseia-se nas técnicas de meta-heurística e algoritmos genéticos para propor uma otimização na alocação de comutadores e dispositivos de proteção visando contribuir na redução dos impactos causados pelas faltas de energia nos índices de confiabilidade do sistema que consideram a duração e a frequência equivalente das

interrupções considerando o custo operacional de um sistema de distribuição para áreas urbanas. Rosendo et al. (2008) fazem uma análise estatística das taxas de falha da rede de distribuição, considerando cada componente individual do sistema e os dados históricos dos mesmos, na melhoria dos índices de qualidade, focando principalmente no tempo de reparo e manutenção destes equipamentos em um cenário de interrupção. As soluções sugeridas para minimizar os impactos das interrupções no sistema são sugeridas a partir da análise dos índices de confiabilidade, podendo caracterizar de uma manutenção preventiva, a alocação de dispositivos e até modificações na topologia do alimentador.

Gui, Pahwa e Das (2011) analisam os impactos das interrupções de energia no sistema de distribuição de energia, com foco nas faltas causadas por intervenções animais na rede aérea. As sugestões para melhoria da confiabilidade do sistema ficam em torno da análise dos resultados desta prospecção de possíveis faltas, a fim de fazer parte do planejamento estratégico de obras e melhorias da empresa de distribuição.

Considerando um cenário de geração distribuída e a entrada de consumidores ativos na rede de distribuição, tratando a possibilidade de anexar microgrids no sistema de distribuição, Farzin, Firuzabad e Aghtaie (2018) utilizam um modelo de avaliação da confiabilidade baseada no método de simulação sequencial de Monte Carlo. Dividindo a área estudada em redes menores a partir dos dados obtidos sobre a topologia da rede, a localização dos dispositivos de proteção e de medição e as restrições da operação são simulados diferentes cenários de operação para avaliar a eficiência e confiabilidade da rede de distribuição, com o objetivo de contribuir no planejamento estratégico e no gerenciamento do desempenho da rede em cenários de contingência e interrupções no fornecimento.

2.2 A LOCALIZAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

A ocorrência de interrupções no abastecimento de energia da rede de distribuição são inevitáveis, considerando que essas falhas ocorrem devido a diversas causas incontrolláveis, como adversidades climáticas, agentes externos e até mesmo avarias nos equipamentos que compõe o sistema. Contudo o impacto causado por essas faltas é relativamente controlável, dada a necessidade de intervenção humana direta ou indireta. Com isso, a reação da central de operações na solução dos problemas que ocasionam tais faltas é de extrema importância na redução do impacto causado por elas.

A principal motivação de analisar e investigar as interrupções na distribuição de energia elétrica está relacionada à velocidade da reação e à escolha do plano de ações para minimizar e solucionar um cenário de contingência. Com isso é possível justificar a necessidade dos investimentos em relação à manutenção e melhoria da rede de distribuição, assim como na busca por novas soluções no suporte de campo. Para isso as concessionárias de distribuição de energia

não medem esforços na busca por metodologias mais eficazes em prever, localizar e solucionar as falhas do sistema de distribuição.(REICHL; SCHMIDINGER; SCHMIDTHALER, 2013)

Para investir no planejamento estratégico e garantir a confiabilidade da rede, diversos pesquisas acerca da análise das faltas são feitas ao longo dos anos, mirando metodologias mais assertivas na resolução do problema e minimização dos impactos. Das pesquisas que tendem a esse objetivo, verifica-se a importância da localização das interrupções de fornecimento no sistema de distribuição de energia elétrica e a quantificação do impacto dessas interrupções.

A importância da localização dos pontos da rede de distribuição que mais apresentam falhas e interrupções está, principalmente, na reação do centro de operações quanto à solução da falta. A previsibilidade dos locais de maior importância contribuem na formulação de estratégias para ter-se uma resposta mais rápida ao problema, em contraponto podendo prever as possíveis ocorrências do sistema, e assim definindo os pontos de maior impacto no sistema. Com isso é possível direcionar os esforços e recursos para os pontos mais críticos.

2.2.1 Métodos de localização de falhas e interrupções.

Existem diversos estudos realizados e métodos de análise e localização das faltas do sistema de distribuição. Algumas técnicas buscam localizar o ponto exato da interrupção, outros a abrangência deste no sistema de distribuição.

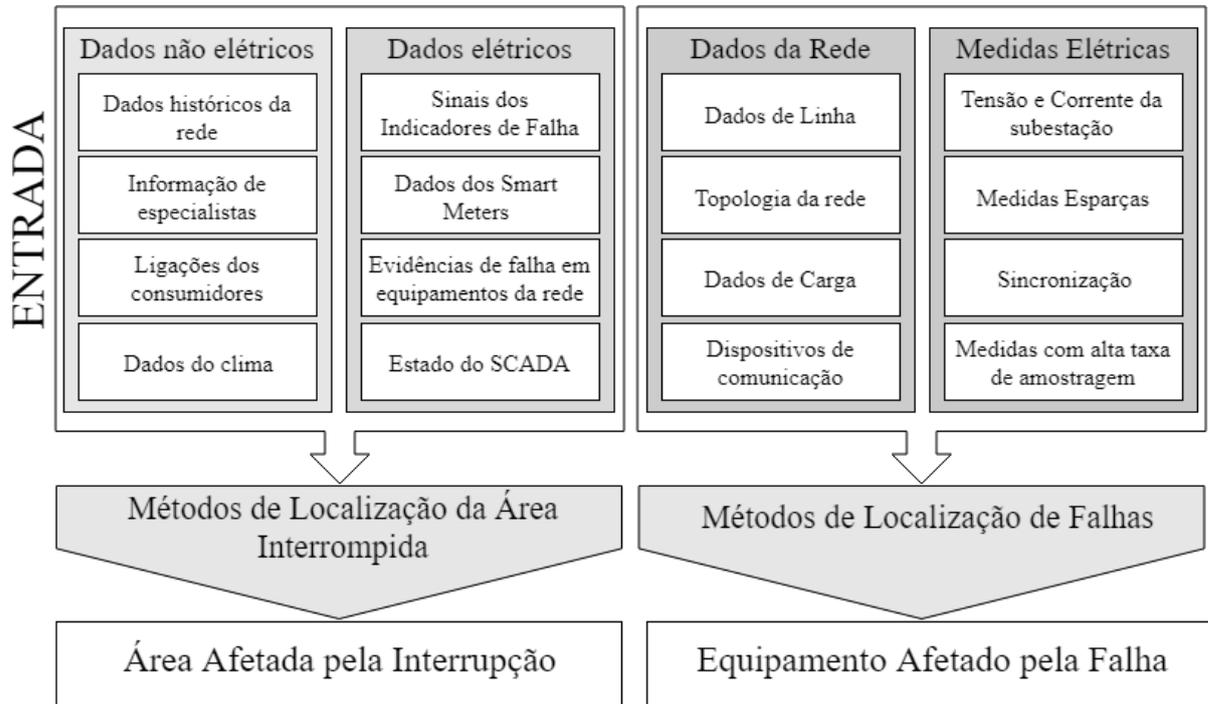
Dentre as inúmeras tarefas dos centros de operações do sistema de distribuição, a localização desses locais é uma das tarefas mais importantes, pois garante agilidade e assertividade na manutenção e restauração do cenário normal de distribuição de energia.

Segundo Bahmanyar et al. (2017), as técnicas envolvendo metodologias de localização das interrupções do abastecimento de energia podem ser classificadas a partir dos critérios de entrada e saída utilizados pelos algoritmos de processamento dos métodos, como mostra a Figura 2.3.

Quanto às informações que alimentam os métodos de localização das faltas, podemos dividi-las em quatro principais grupos. O primeiro grupo utiliza-se de dados que não tem interação direta com a rede de distribuição, entretanto carregam dados que são correspondentes ao comportamento dela, como banco de dados alimentados pelos operadores e dados históricos de medições e manutenções, reclamações dos consumidores afetados pelas interrupções, dados históricos e atuais do clima e informações e o conhecimento de especialistas. O segundo, por sua vez, utiliza-se de dados elétricos da rede, obtidos a partir de evidências e a sinalização dos equipamentos quanto à falta de energia. O terceiro grupo utiliza-se de informações e dados obtidos na rede de distribuição, relacionados à carga, topologia e equipamentos telecomandados. Por fim temos os métodos que utilizam medidas de tensão, corrente e fasores para diagnosticar a falha e a localização da mesma. (BAHMANYAR et al., 2017)

A grande diferença entre os quatro tipos de dados que alimentam os métodos está na

Figura 2.3 – Classificação dos dados de entrada para métodos de localização de falhas e interrupções



Fonte: Adaptado de Bahmanyar et al. (2017).

origem destes. Enquanto alguns utilizam-se do banco de dados das concessionárias de distribuição de energia elétrica para confeccionar um mapa de interrupções, combinando técnicas de aproximação e busca da área (*data source*) a fim de prever e projetar as possíveis interrupções futuras do sistema, outros dependem de informações de equipamentos do sistema de distribuição com o objetivo de localizar os sinistros do sistema de distribuição a partir da comparação dos sinais antes e depois da falha nesses dispositivos.

Podemos classificar os métodos a partir da resposta da interação dos dados de entrada em dois grandes grupos: O primeiro retorna a área afetada pela interrupção, ou seja, a área em que os dispositivos de proteção atuaram para isolar o defeito e, devido à configuração radial da rede de distribuição, sofre interrupção no abastecimento. O segundo grupo de métodos retorna com informações acerca da área ou equipamento afetado pela falha, seja ela de qualquer natureza, através das informações dos equipamentos instalados no sistema.

Quanto aos métodos que reconhecem a localização da área interrompida, leva-se em consideração a análise de dados elétricos e não elétricos do sistema de distribuição, como informações recebidas por equipamentos que reconhecem a evidência de falhas, informações de medidores inteligentes, e até mesmo de ligações de clientes atestando falta de energia em suas residências.

Os denominados ‘indicadores de falta’, instalados na rede primária com o intuito de

facilitar aos operadores do sistema manobras mais rápidas e assertivas quanto à localização das faltas no alimentador analisado, Jiang e Xia (2018) utilizam-se das informações obtidas através destes equipamentos para otimizar o tempo de localização da falta, promovendo a diminuição no tempo de resposta ao evento e contribuindo no gerenciamento de eventos que causam interrupções no sistema de distribuição.

Gabr et al. (2017) apresenta um método clássico de detecção de falta, o qual utiliza-se da diferença entre duas medidas para caracterizar a falta e, a partir da decomposição dos fasores de impedância acoplados a rede, calcula a distância entre a unidade de medição até a falta sem processos iterativos, considerando diversos aspectos da operação da rede de distribuição. Orozco-Henao et al. (2017) consideram a reatância de falha mínima, combinado à busca a partir do teorema de Fibonacci para aproximar-se da ocorrência e estimar a localização desta falta.

Existem métodos que integram mais de um tipo de análise, tornando o algoritmo mais assertivo e complexo, como por exemplo de método proposto por Bahmanyar et al. (2016), que alinha mecanismos de *self healing* e infraestruturas de medição na rede elétrica na localização e rápida restauração da distribuição em cenários de contingência severa e, a partir da evolução do conceito de internet das coisas (IoT) aplicadas nas redes elétricas inteligentes, o algoritmo de localização de faltas próximo ao tempo real, utiliza-se do monitoramento de *smart meters* para reconhecer e analisar interferências e mudanças nos fasores de tensão e corrente medidas e reportadas pelos medidores inteligentes ao sistema de distribuição e, então, localizar rapidamente as faltas na rede e realizar assim os protocolos de restauração.

Diferente dos métodos que utilizam-se das medidas e conhecimento acerca do sistema pós-interrupção, os métodos que fazem uso do conhecimento referente às redes neurais e *machine learning* apresentam-se como métodos baseados no conhecimento e treinamento da máquina prévia à falta, fazendo complexas análises e relações das informações de entrada e saída do algoritmo e, uma vez que treinados, reconhecem padrões de comportamento e resultados.(GANA et al., 2017; BAHMANYAR et al., 2017)

Utilizando a lógica fuzzy na tomada de decisão, Chen e Kezunovic (2016) desenvolveram um método para melhor gerenciamento das interrupções no sistema de distribuição, o qual a ocorrência da falta é identificada através de *data-driven*, orientados principalmente pelas previsões de eventos climáticos e o histórico da rede estudada. As áreas que apresentam maior risco de ocorrência destes eventos são agrupadas e, a partir deste mapa de risco, o sistema é analisado a fim de localizar pontos de maior destaque e probabilidade de ocorrências.

Petite, Santos e Asano (2017) utilizam os dados de medição do sistema de distribuição armazenados nos relés de proteção já existentes na rede, em duas diferentes redes neurais artificiais, a primeira para detectar a área afetada pela interrupção e a segunda para localizar o ponto de falta, considerando apenas as falhas monofásicas, que apresentam maior ocorrência no sistema de distribuição primário.

Entretanto, ao considerar a realidade de países como o Brasil, Falaghi et al. (2010)

reconhece que a automatização das redes de distribuição radiais não apresenta um nível considerável nos países em desenvolvimento, entretanto a maior parte dos métodos desenvolvidos pela comunidade científica atualmente utiliza informações fornecidas por equipamentos utilizados na automatização da rede. Para isso, é necessário que métodos alternativos sejam desenvolvidos, a fim de contribuir com a orientação das equipes de manutenção.

2.3 PREVISÃO DA DEMANDA DE OCORRÊNCIAS

A demanda de recursos e ações é recorrente na atividade das empresas, sejam elas do setor elétrico ou não. Para Makridakis (1988), a estratégia de realizar previsões de demanda é necessária e de extrema importância na determinação correta de recursos. Considerando o ambiente dinâmico do centro de operações das empresas responsáveis pela distribuição de energia elétrica, onde há constantemente problemas e ocorrências emergenciais que prejudicam o bom funcionamento e a confiabilidade do sistema, o gerenciamento de crises é diário e a assertividade das decisões diárias quanto à priorização de serviços é extremamente importante para garantir o sucesso das operações e minimizar o impacto das ocorrências emergenciais.

A complexidade das decisões demonstra a importância de uma orientação correta, baseada na análise de todo o cenário em curto, médio e longo prazo. Sendo assim, a tomada de decisão deve ser orientada para o futuro, considerando os fatores que integram o planejamento estratégico individual e organizacional. Para isso se torna necessária a previsão acurada e a correta utilização dos resultados na tomada de decisão mais inteligente (MAKRIDAKIS, 1988).

Armstrong (1983) distribui as técnicas de previsão em duas categorias distintas: as técnicas qualitativas e as técnicas quantitativas. A primeira categoria envolve métodos que podem ser definidos como intuitivos ou subjetivos, pois utilizam-se de informações obtidas através do estudo e experiência acumulados de um grupo de especialistas para definir a previsão, sustentados ou não por uma análise mais formal do todo.

A subjetividade da técnica é oriunda da parcialidade e da tendência dos entrevistados ou especialistas, que detém a informação ou a experiência necessária para a efetividade do método, pois cada indivíduo tende a analisar e interpretar fenômenos de uma dada forma, a partir do conhecimento técnico e teórico, julgamento, intuição, pesquisas e até mesmo na expectativa dos entrevistados. Devido a essa característica subjetiva, os métodos qualitativos são estruturados e utilizados para desenvolver novos produtos e estratégias de mercado que apresentem longo prazo, assim como para ajustar previsões de curto prazo que utilizam outras técnicas de previsão (ARMSTRONG, 1983; DAKIN; ARMSTRONG, 1989; SPEDDING; CHAN, 2000).

A segunda categoria envolve métodos quantitativos ou objetivos. Essa categoria utiliza-se de modelos matemáticos e estatísticos para definir o comportamento de uma série de

dados e, com isso, definir a previsão seguindo uma composição mais rígida e exata. Analisando séries históricas de dados, a definição de padrões de comportamento acontecem de forma mais consistente, visto que mesmo explorado por diversos especialistas, com informações e vivências distintas, o resultado obtido utilizando métodos objetivos é o mesmo (ARMSTRONG, 1983). Dentro desta categoria, ainda podemos classificar os métodos causais e os de séries temporais, onde os primeiros envolvem análises estatísticas de eventos predecessores de variáveis que se relacionam com a variável de interesse preditivo, enquanto as séries temporais analisam o passado da variável de interesse. (ARCHER, 1980)

A estrutura do processo de previsão é composta a partir de três componentes principais: as variáveis de entrada, que compreendem a base de dados obtida através do histórico presente e passado do processo a ser analisado, o modelo ou método de previsão e estimação, que baseia-se nas técnicas que serão apresentadas, e as variáveis de saída, que compreendem a previsão futura. (DEBNATH; MOURSHED, 2018)

De maneira sucinta e compacta, Fitzsimmons e Fitzsimmons (2011) apresentam uma comparação entre as características mais marcantes dos diferentes tipos de métodos de previsão de demanda, conforme Tabela 2.1. A escolha do método de previsão deve ser realizada considerando o objetivo da análise e a multiplicidade das informações contidas nos bancos de dados.

Em geral, os métodos de previsão de modelos causais e séries temporais apresentam um banco de dados de padrão relativamente estável e coerente ao longo da amostra de tempo. Contudo a previsão realizada pode exibir reação e padrões entre os dados em apenas uma parte da amostra, o que resulta em previsões de prazos mais curtos. Em contrapartida os métodos subjetivos são utilizados quando a base de dados não apresentam correlações ou não são suficientes para uma análise e utilizam informações qualitativas sobre o objeto de análise. (FITZSIMMONS; FITZSIMMONS, 2011)

Sobretudo, a modelagem matemática do comportamento realizada nos métodos causais e temporais, carrega a suposição da continuidade do comportamento passado, podendo assim, ao ser aplicado por qualquer tipo de especialista retorna com os mesmos resultados para a amostra analisada e, ainda que os resultados da previsão sejam obtidos através da reprodução de padrões comportamentais da amostra de dados analisada, as previsões realizadas a partir dos métodos quantitativos não se limitam apenas a reproduzir uma tendência passada, mas também consideram as demais informações relacionadas à variável prevista. (PELLEGRINI; FOGLIATTO, 2001)

Segundo Archer (1980) os métodos baseados em séries temporais trabalham com a análise estatística dos dados do passado de uma variável a ser prevista enquanto os resultados do método causal são construídos a partir da análise estatística de realizações passadas de variáveis relacionadas à variável de interesse.

A previsão realizada a partir de métodos que envolvem análise de séries temporais se apoiam no histórico de demanda da variável a ser prevista e, a partir dos processos preditivos e

Tabela 2.1 – Características dos modelos de previsão.

Método	Dados Necessários	Horizonte de Previsão	de	Aplicação
Subjetivos - Qualitativos				
Delphi	Resultados de Pesquisa	longo		Previsões tecnológicas
Análise de impacto cruzado	Correlação entre Eventos	longo		Previsões tecnológicas
Analogia histórica	grande amostra de dados de uma situação similar	médio e longo		Demanda de projeção de ciclo de vida
Objetivos - Quantitativos Causais				
Regressão Linear	Passado de todas as variáveis	médio		Previsão de demanda
Econométrico	Passado de todas as variáveis	médio e longo		Condições econômicas
Séries Temporais				
Média Móvel	N-mais recentes observações	curto		Previsão de demanda
Suavização Exponencial	valores prévios de suavização e mais recentes observações	curto		Previsão de demanda

Fonte: Adaptado de Fitzsimmons e Fitzsimmons (2011).

da construção dos comportamentos e padrões, projetam a demanda futura da dita variável através dos elementos que determinam a tendência da série ao longo do tempo da amostra, o ciclo comportamental que tende a ser periódico, a sazonalidade do caso e a variabilidade intrínseca que não entra na modelagem dos dados e que pode ser denominado como erro. (MAKRIDAKIS, 1988; ARMSTRONG, 1983)

Os métodos causais consideram um comportamento histórico de variáveis, através da análise estatística, para prever uma variável de interesse relacionada à estes históricos, procurando estabelecer uma relação intensa entre a demanda prevista, representada pela variável dependente do modelo, e os demais dados independentes da amostra.

Sistematicamente, alguns fatores relacionados à amostra de dados podem influenciar a previsibilidade de um modelo matemático. A quantidade de observações que contém na amostra, a homogeneidade dos dados, a elasticidade da procura e a competição entre variáveis do modelo são alguns fatores colocados por Makridakis (1988) como observáveis para uma previsão mais assertiva considerando também que os demais dados analisados permanecem constantes ao longo da amostra.

2.3.1 A previsão de eventos orientada ao sistema de distribuição

A aplicação dos modelos de previsão pode ser realizada em empresas de qualquer setor, tanto de serviços quanto de bens de consumo. O reconhecimento do cenário futuro é de grande valia na definição de estratégias e do planejamento para alcançar metas e melhorar os resultados, determinando a probabilidade de determinados cenários ocorrerem em resposta à planos de ações.(ARMSTRONG, 1983)

Nas empresas que compõem o setor elétrico não é diferente, e a busca por melhores resultados passa diretamente pela acurácia dos modelos de previsão e planejamento. No escopo dos serviços das empresas de distribuição de energia, a possibilidade de aplicação de previsões orientadas ao planejamento ou à tomada de decisão também se torna bastante ampla, podendo desempenhar papéis de grande importância no despacho de serviços, na diminuição do impacto das ações do centro de operações na rede, melhorar os índices de confiabilidade do sistema, investigar a localização de ocorrências, entre outros.

Na busca por melhorias nos índices de confiabilidade do sistema de distribuição, Agüero et al utilizam o histórico de 5 anos de ocorrências de interrupções de uma concessionária real para definir o modelo preditivo da confiabilidade. Analisando as taxa de falha e do tempo médio de reparo de cada tipo de equipamento que compõe a rede de distribuição estudada, a metodologia propõe melhorias relativas à evolução do sistema de distribuição, considerando a comparação entre instalação de equipamentos, tais como indicadores de falta e religadores, e pequenas obras.

A fim de suavizar os impactos das interrupções no sistema de distribuição, Chen e Kezunovic (2016) propõem uma metodologia facilitadora da tomada de decisão baseada na lógica difusa(Fuzzy). A abordagem permite que os operadores do sistema de distribuição obtenham informações prévias a fim de otimizar a manutenção do sistema através de mapas de risco orientadas pela previsão climática histórica e futura, dados do sistema de informações geográficas GIS, assim como os dados históricos, fasoriais e medições da rede de distribuição analisada.

Utilizando um modelo de rede bayesiana, Gui, Pahwa e Das (2011) investigaram os impactos da ocorrência de interrupções na distribuição de energia elétrica especificamente causadas por animais. A análise de probabilidade condicional é realizada a partir dos dados históricos de concessionárias, a fim de minimizar o erro da previsão e estimar as interrupções semanais. O modelo híbrido adotado analisa os impactos causados pelo tempo de interrupção e o clima previsto a partir de um modelo de rede bayesiana que faz uso do histórico de interrupções para prever os eventos futuros e, assim, reduzir o erro das estimativas e garantindo um resultado mais assertivo.

A abordagem estatística de Vaccaro, Martins e Menezes (2011) analisa a qualidade dos níveis de tensão no sistema de distribuição, estabelecidos pela ANEEL, a partir de uma abordagem estatística que considera os dados de medição obtidos através de equipamentos de

medição de uma rede de baixa tensão. A pesquisa realizada é de caráter exploratório e quantitativo, com resultados obtidos através de um estudo de caso para uma estrutura de rede real, o qual compara os valores obtidos através da predição dos níveis de qualidade aos procedimentos de controle de qualidade vigentes.

Guimarães et al. (2017) utiliza-se da previsão da demanda de serviço a partir da metodologia de suavização exponencial para analisar a demanda de serviços emergenciais no dia a dia dos centros de operações do sistema de distribuição para casos críticos como eventos climáticos severos. A previsão é utilizada para definir o comportamento dinâmico do despacho de ordens de serviço para equipes de campo, garantindo um melhor planejamento deste serviço e, conseqüentemente, a melhoria do tempo de resposta do centro de operações quanto aos serviços emergenciais.

Li et al. (2015) apresentam um método de previsão a curto prazo de eventos climáticos que geram interrupções e visa a redução da duração e dos custos relacionados à manutenção e reparos originados pela interrupção estudada, baseando-se no agrupamento de áreas das subestações analisadas e na susceptibilidade da rede em relação aos danos causados anteriormente através da análise dos históricos de ocorrências. O método proposto é composto por duas etapas concomitantes, que combinam dados entre si buscando maior assertividade na previsão dos danos possíveis causados por futuros eventos climáticos. Em estudo prévio, Li, Treinish e Hosking (2010) fazem uso da previsão de demanda para o gerenciamento das possíveis faltas do sistema causadas por eventos climáticos extremos no nordeste dos Estados Unidos. Analisando o histórico de interrupções do banco de dados de uma concessionária real, a metodologia utiliza um modelo de regressão de Poisson para prever os danos causados ao sistema em mapas geográficos, considerando no modelo projetado a perspectiva de incertezas quanto aos dados climáticos, determinando múltiplas resoluções espaciais. Concomitante à previsão, o método utiliza o modelo de redes bayesianas na priorização dos locais de maior risco.

Singhee et al. (2016) propõe a otimização da resposta à interrupções causadas por eventos climáticos a partir do planejamento realizado considerando a análise preditiva dos possíveis danos causados. Para isso, o método utiliza diversas informações, como previsão personalizada do clima da região estudada, a previsão dos danos históricos causados devido ao cenário climático, os pontos críticos históricos da rede e o pré posicionamento das equipes de reparo para sugerir um resposta otimizada para cada tipo de problema, analisando pontos mais prováveis de ocorrência de fenômenos climáticos severos e mapas de risco associados à topologia da rede de distribuição estudada.

2.4 SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

O processo de tomada de decisão se trata de uma seleção, dentre diversas opções, da resposta a uma determinada situação. Este processo pode seguir técnicas clássicas de otimização ou mesmo procedimentos heurísticos. Seja qual for a escolha, o suporte à tomada de decisão contribui para respostas mais assertivas em sistemas complexos e em processos que envolvam muitas variáveis.(TARAPANOFF, 1995)

Dentro das organizações, o processo decisório produz uma escolha final relativa a planos de ação, baseada nas circunstâncias do ambiente através da análise das variáveis e fatores que compõem o todo, sugerindo assim o caminho mais adequado a se seguir dado um cenário específico.

Segundo Gigerenzer e Gaissmaier (2011), qualquer decisão tomada em uma organização poderá afetá-la a curto e longo prazo, podendo também se espalhar para os demais setores da empresa. Com isso mostra-se de extrema importância da análise das variáveis que constituem o problema. Tung (1979) disserta sobre os problemas causados pela instabilidade dos ambientes empresariais devido ao dinamismo das variáveis e a incerteza da prospecção, prejudicando a relação entre alternativas e soluções.

Para as empresas do setor elétrico não é diferente, a tomada de decisão, seja qual for o problema enfrentado, é uma situação crucial que demanda análise e entendimento do problema como um todo. A busca por melhores índices e decisões fez com que os processos que contribuem com a escolha das alternativas para a solução e planejamento se tornassem essenciais à organização.(WANG et al., 2009)

No sistema de distribuição, as análises para a tomada de decisão estão tanto no planejamento estratégico da expansão do sistema quanto na operação diária do sistema. O avanço no desenvolvimento de metodologias que contribuem com a tomada de decisão dos centros de operações têm sido mais frequentes na pesquisa e desenvolvimentos da última década, segundo Perrier et al. (2013b). Isso se dá devido a complexidade do gerenciamento de cenários tão múltiplos e instáveis, que demandam pluralidade na avaliação dos critérios e prioridades.

A gama de métodos desenvolvidos para a assistência à tomada de decisão apresentam diversas maneiras de tratamento da informações dentro dos objetivos buscados, como apresentado na pesquisa de Wang et al. (2009). Quando aplicados às necessidades dos sistemas de energia, podem contribuir desde o gerenciamento de serviços até ao planejamento de expansão do sistema e priorização de obras.(BERNARDON et al., 2015)

Diversas metodologias de restauração e gestão de interrupções utilizam-se de métodos e abordagens que suportam a tomada de decisão do operador ou do sistema em si. Por se tratarem de problemas que apresentam múltiplos critérios de análise, as abordagens comumente utilizadas se concentram na seleção desses critérios e no peso distribuído para os mesmos, podendo ambos serem subjetivos ou objetivos na análise do problema. (WANG et al., 2009)

Os critérios escolhidos geralmente rodeiam as metas requeridas na solução do problema tratado. Enquanto o suporte da tomada de decisão se mostra como uma ou mais soluções para um dado cenário, os critérios podem traduzir o cunho técnico, econômico, social ou ambiental do problema, assim como definir o posicionamento do responsável pela tomada de decisão quanto ao cenário pretendido. (BATAGLIA; YU, 2008)

De modo geral, os critérios utilizados para suportar a decisão relativa a um problema ou cenário necessitam de tradução. A tradução dos critérios permite a avaliação destes no cenário estudado de maneira justa e equivalente, considerando o impacto de cada um destes no problema analisado, ponderando-os de forma igualitária. Entretanto, a natureza dos critérios pode ser diferentes entre si, com isso é necessário classificá-los seguindo determinados parâmetros.

Com a disponibilidade de informações cada vez mais abundantes devido à utilização da tecnologia na retenção e geração de dados, o processo de tomada de decisão tem apresentado performances cada vez mais assertiva e analisado problemas mais complexos. Com isso a confiabilidade das abordagens que fazem uso de métodos computacionais na tomada de decisão apresentam-se como boas escolhas na resolução de problemas complexos, como a gestão das interrupções do sistema de distribuição de energia. (CHEN; KEZUNOVIC, 2016)

2.4.1 Processo de Análise Hierárquica

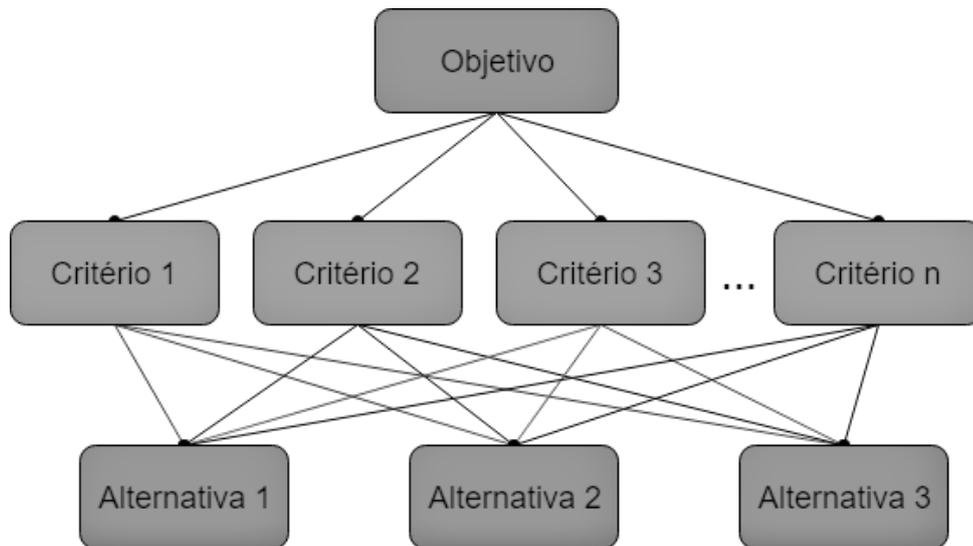
Apresentando uma abordagem simples e intuitiva para decisões complexas, o método de análise hierárquica AHP, desenvolvido por Saaty (1990) em meados dos anos 70, particiona um problema decisório complexo em facetas menores do mesmo que são analisadas separadamente e, posteriormente, agrupadas para chegar na decisão final selecionada dentre um conjunto de alternativas. Esta abordagem contribui na compreensão da escolha e permite a avaliação das demais alternativas como também sendo viáveis na solução do objetivo inicial.

Permitindo o uso de critérios qualitativos e quantitativos, o AHP é um método subjetivo que tem como premissa básica a estrutura do problema. Para analisar um cenário, o método subdivide-o em objetivo ou meta, critérios e subcritérios ou atributos decisórios e, por fim, alternativas para análise e alcance da meta.

Esta estrutura, mostrada na figura 2.4, têm por objetivo ilustrar o processo de análise do método, que individualmente avalia, sob a ótica dos critérios e subcritérios adotados, cada uma das alternativas possíveis. Sendo assim, é importante ressaltar a ligação de todos os critérios adotados e todas as alternativas propostas. Via de regra, a busca pela alternativa que melhor se encaixa na busca pelo resultado preterido é dada a partir da análise e correlação dos critérios adotados.

Para tanto, a aplicação do método AHP utiliza-se do conceito de modelagem de preferência, que se dá a partir da adoção de parâmetros e critérios que são obrigatoriamente convertidos em pesos, permitindo assim o julgamento comparativo dos critérios. Assim cada

Figura 2.4 – Estrutura hierarquica do método AHP



Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

critério é avaliado com o seu grau de importância em relação aos demais, demonstrando uma grande vantagem em comparação a outros métodos, já que o decisor tem poder de expressar suas preferências, definindo pesos maiores ou menores para os critérios analisados.

A fim de estabelecer uma relação quantitativa para definir a importância de critérios qualitativos, Saaty (1990) desenvolveu uma escala numérica que contribui com o entendimento do usuário do método em definir suas prioridades em relação aos critérios analisados. Esta escala é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Escala fundamental de Saaty

Escala numérica	Grau de importância
1	Mesma importância
3	Moderada
5	Forte
7	Muito Forte
9	Extremamente importante
2,4,6,8	Valores intermediários

Fonte: Saaty (2012).

A partir da definição dos critérios e dada a escala numérica do grau de importância de cada um dos parâmetros do projeto, seja ele qual for, é construída a matriz de comparação dos critérios, também denominada matriz de prioridades. O julgamento é realizado através da avaliação de um ou mais especialistas, para que os índices de priorização sejam coerentes à realidade do caso estudado. Ao fazer o julgamento o especialista reflete acerca das questões que definem a motivação de um critério ser mais importante ou superior em relação ao outro e por consequência a matriz a seguir é construída.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Onde:

M - matriz de comparação dos critérios

C_n - número de critérios de avaliação

a_{ij} - grau de importância do critério i sobre o critério j

O particionamento do problema a partir da observação da importância ou hierarquia dos critérios qualifica-se como a principal característica do método AHP. Ao processar as comparações, após a definição da matriz M, calcula-se o peso de cada critério, indispensável no julgamento para a tomada de decisão. Entretanto, para dar sequência ao método, é necessário normalizar a matriz M. (SAATY, 2008)

A normalização das matrizes do método é necessária para trazermos todos os dados para uma escala comum e, assim, termos uma comparação significativa. Para o método AHP, orienta-se a normalização a partir da divisão de cada termo de uma coluna pela soma dos termos dessa coluna. (SAATY, 2008)

Com a matriz M normalizada, calcula-se o peso de cada critério a partir da média aritmética de cada linha da matriz M normalizada, para então encontrarmos o vetor W, calculado conforme equação 2.2.

$$w_k = \sum_{i=1}^n \frac{a_{ij}^*}{n} \quad (2.2)$$

Onde:

w_k - peso do critério k

a_{ij}^* - grau de importância do critério i sobre o critério j normalizado

n - número de critérios

A partir dos resultados dos pesos de cada critério, os valores são organizados em um vetor que, posteriormente, terá o papel de decisor, visto que este representa a prioridade estabelecida através da análise do especialista ou, neste caso, da união das referências aqui estudadas.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Para além, como a metodologia se utiliza da opinião de especialistas, pode-se ocorrer inconsistência no julgamento realizado, geralmente resultantes da complexidade do problema

ou de pouco reconhecimento do especialista para com o tema. Com isso o método define, ao longo do processo, testes que calculam a razão de consistência (RC), apresentado na equação 2.4, e o índice de consistência (IC), apresentado na equação 2.3, utilizando também do índice randômico de consistência (IR), definido por Saaty (1990) e que se relaciona diretamente com o número de critérios adotados para a análise, conforme Tabela 2.3.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \quad (2.4)$$

Onde:

λ_{max} - somatório dos elementos da matriz resultante entre a multiplicação da matriz de critério pela matriz de ponderação, ambas normalizadas

n - número de critérios

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2.5)$$

Tabela 2.3 – Índice de Randômico de consistência (IR) em relação ao número de critérios comparados

Quantidade	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0	0.52	0.89	1.12	1.25	1.35	1.40	1.45

Fonte: Saaty (1990)

A Razão de consistência (RC) deve respeitar o critério de ser menor que 0,1. Caso contrário as avaliações devem ser reconsideradas e a matriz de julgamentos reformuladas, pois o método se torna inconsistente para valores maiores que 10% .

O objetivo setado pelo método AHP vai de encontro ao objetivo deste estudo, que busca a redução do impacto causado pelas interrupções no fornecimento de energia elétrica. A utilização desta abordagem irá facilitar a tomada de decisão quanto à priorização das ocorrências de interrupções.

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A revisão da literatura contida neste capítulo mostrou que a integração dos objetivos desta pesquisa, com os métodos trabalhados de forma independente na literatura, contribuem para uma abordagem colaborativa de um problema corriqueiro.

Na visão geral de estudos, há duas vertentes comumente trabalhadas correlatas à abordagem proposta por este estudo. A primeira considera a localização das interrupções, independente do impacto destas interrupções e da prospecção de futuras ocorrências. A outra vertente trabalha com a previsão de demanda de serviços e com o impacto dos eventos

analisados particularmente, geralmente considerando eventos críticos de grande porte e localizações específicas às quais sofrem com estes cenários.

Além disso, como pilar de apoio à contribuição proposta neste estudo, a tomada de decisão orientada aos serviços referentes à retomada da distribuição de energia, é uma vertente de estudo bastante abrangente. Direcionada ao dia a dia do centro de operações das distribuidoras de energia, esta abordagem trata a operação como um objeto de estudo para o planejamento de suas atividades.

Contudo, ainda que haja uma gama de estudos e métodos que analisem as interrupções do sistema de distribuição quanto à localização e o impacto, assim como diversas abordagens que utilizam-se de métodos estatísticos na análise do comportamento do sistema de distribuição, a integração destes somada ao suporte na tomada de decisões para o centro de operações tornam-se o ponto principal deste estudo.

Com isso, o principal viés de contribuição na abordagem proposta por este trabalho está na tomada de decisão orientada ao centro de operações e serviços, considerando as ordens de serviço imprevistas, que geram interrupções longas e necessitam de intervenção humana na solução destas.

3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DAS INTERRUPÇÕES DE FORNECIMENTO DE ENERGIA

O sistema de distribuição é a última etapa do longo caminho o qual a energia elétrica faz, desde a sua geração até o consumidor final. Dada a importância deste sistema, é de extrema necessidade que o funcionamento correto do mesmo seja garantido, respeitando os limites aceitáveis de tensão e confiabilidade. Para tanto, o sistema deve ser continuamente monitorado, ajustado e, quando necessário, reparado.

Além do controle diário, a rede de distribuição passa por constantes expansões e é corriqueira a necessidade de manutenções em trechos antigos do sistema. Não obstante, há ainda a ocorrência de eventos imprevistos e emergenciais, causados pelas mais diversas situações, que demandam atendimento das equipes de campo, orientadas pela distribuidora.

Todas essas atividades citadas são de responsabilidade do centro de operações, sendo assim, cabe a este setor planejar e gerir o funcionamento e atendimento de todas as atividades relacionadas à operação e bom funcionamento da rede, incluindo àquelas originadas de sinistros imprevistos e não planejados no dia a dia do atendimento.

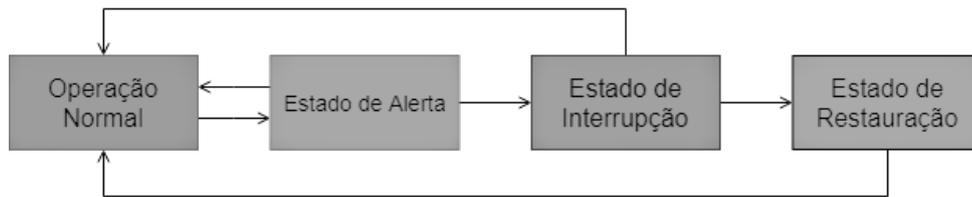
Quando o sinistro resulta numa interrupção, é necessário o diagnóstico de motivo e local do ocorrido, de maneira que o centro de operações realize as rotinas necessárias para o retorno do estado de operação normal da rede. Quando a interrupção se estende por mais de 3 minutos, esta é classificada como uma interrupção longa. Com isso, o centro de operações deve lidar com os processos de diagnóstico da falta, localização do trecho interrompido, isolação da falha, restauração da distribuição e, por fim, o reparo do equipamento ou trecho alterado, quando necessário.

Dessa forma, sabe-se que o problema envolvendo as interrupções de fornecimento de energia ocasionadas no sistema de distribuição está centralizado na restauração da operação normal do sistema, ou seja, no restabelecimento do fornecimento a níveis de operação e qualidade satisfatórios.

Os estados de operação do sistema de distribuição, apresentados na Figura 3.1 e determinados por Čurčić et al. (1995), permeiam entre a operação normal, estado de alerta e de interrupção. Para cada um desses estados, o centro de operações da concessionária segue os procedimentos internos determinados pelos planos de confiabilidade e de contingência. A distinção entre os estados de operação do sistema está, entre outros critérios de análise, nos níveis da tensão de operação no sistema de distribuição, sendo determinados ANEEL os valores aceitáveis, tanto de operação normal quanto de cenários críticos. (ANEEL, 2018c)

Tradicionalmente, as concessionárias de energia mantêm as atribuições no centro de operações independentes dos demais setores da organização, dividindo assim as informações e tarefas em microssetores, cada qual com as suas atribuições e informações. Segundo Chen e Kezunovic (2016), o compartilhamento de informações ocorre depois da análise dos dados de

Figura 3.1 – Níveis de operação do Sistema de Distribuição



Fonte: Adaptado de Ćurčić et al. (1995).

cada setor, sendo cada etapa da gestão das interrupções analisada individualmente.

Ao analisar um problema de cada vez, o planejamento estratégico operacional perde seu foco principal, que é considerar o cenário completo e suas nuances comportamentais, incluindo todos os setores operacionais, para sugerir respostas mais assertivas no dia a dia da operação. A falta de previsibilidade é um dos fatores causadores deste fenômeno da perda de visão geral, dada a importância de reconhecer o comportamento típico dos eventos de um dado cenário para projetar um plano viável e correto.(FERRUCCI; BOCK; GENDREAU, 2013)

Para além, a metodologia de localização da interrupção varia de acordo com a estratégia da distribuidora e da topologia da rede de distribuição. No entanto, as diferentes técnicas aplicadas neste processo apresentam variação na velocidade da localização e da resposta para o problema. Dada a falta de integração referente à informação dos setores funcionais, manifestada por Perrier et al. (2013b), a celeridade no diagnóstico da falta não acusa, necessariamente, a sua melhor solução e gestão correta.

Ademais, o impacto das ocorrências se dá de forma variável, de modo que algumas situações apresentem um número maior de consumidores afetados ou de potência não suprida em relação à outras, porém não são priorizados por não apresentarem consumidores classificados com nível maior de prioridades. Para tanto, a priorização do nível de impacto é desconsiderada e, apenas analisada após o ocorrido.

A consideração da resposta à interrupção no planejamento operacional apresenta um crescimento lento, porém constante, nas metodologias desenvolvidas com foco na confiabilidade do sistema de distribuição. Segundo Perrier et al. (2013b) o problema da gestão destes serviços está na complexidade e na imprevisibilidade dos eventos que desencadeiam a mudança dos estados de operação do sistema de distribuição. Somada à perda de visão geral do problema quando acompanhado de uma resposta reativa do centro de operações dada uma interrupção ou cenário crítico, como Ferrucci, Bock e Gendreau (2013) apresenta, o impacto de um evento emergencial nos indicadores de confiabilidade pode ser bastante considerável.

Além da complexidade da operação de um sistema que apresenta tantas variáveis como o de distribuição de energia, é correto considerar as particularidades regionais de cada concessionária e rede, tornando assim a gestão do sistema e as atribuições do centro de operações ainda mais desafiadoras.(PERRIER et al., 2013a)

Cada sistema de distribuição, mesmo que geridos por uma mesma empresa, apresenta diferenças na sua topologia, tanto relacionada à localização das cargas e equipamentos, quanto na utilização de dispositivos operacionais que contribuem com a recuperação e localização da falta. Ainda deve-se considerar os recursos necessários para restauração da distribuição, entre outros fatores singulares para cada rede de distribuição analisada, tornando ainda mais complexo o trabalho de planejar.

Não obstante, a gestão da operação, quando considera além das atividades corriqueiras e a rotina administrativa, a gestão e tratamento das interrupções tende a alcançar elevados índices de confiabilidade do sistema. Isto alinhado à capacidade e resiliência das equipes responsáveis pelo atendimentos, contribui ativamente na minimização dos impactos causados pelas interrupções no fornecimento. (CHEN; KEZUNOVIC, 2016)

Para isto, é necessário que se considere a localização das interrupções, o impacto que estes eventos causam no sistema de distribuição e nos indicadores de confiabilidade do sistema e, além disso, os recursos disponíveis para o atendimento das ocorrências que, inevitavelmente, necessitam de intervenção humana no restabelecimento da operação normal.

Dentre as pesquisas desenvolvidas dentro deste tema, existem diversas abordagens que promovem a programação da resposta aos eventos que causam interrupções na distribuição, considerando a previsão destes eventos e de cenários de contingência, assim como a localização destas interrupções.

Pautado na localização espaço temporal das ocorrências, Li et al. (2015) propõe a utilização de diversos dados orientados ao objetivo de melhoria do desempenho do sistema de distribuição através do gerenciamento das ocorrências de interrupções. Pautado principalmente nas interrupções resultantes de eventos climáticos que acometem o sistema, São utilizados dados relacionados à previsões meteorológicas, ao histórico de danos da rede, informações geográficas das regiões analisadas e históricos meteorológicos, na construção do modelo.

Buscando a redução da duração das interrupções no fornecimento, minimização dos custos do processo de restauração da operação e otimização do trabalho das equipes, Singhee et al. (2016) propõe uma abordagem também baseada na localização espaço temporal dos eventos que caracterizam ocorrências emergenciais.

A abordagem proposta por Chen e Kezunovic (2016) também faz uso de multiplas fontes de dados, propondo um sistema de gerenciamento de interrupções baseado na lógica Fuzzy. Orientado por dados climáticos históricos e previstos, geográficos de GPS e GIS, informações referentes à vegetação das áreas estudadas, assim como imagens de satélites, na reprodução de mapas de risco da rede para eventos climáticos críticos. O objetivo da abordagem é mitigar os impactos e otimizar a resposta aos eventos que causam interrupção no fornecimento de energia. O processo de tomada de decisão, que utiliza-se da lógica fuzzy, ainda conta com a análise de dados de campo da concessionária, provenientes de equipamentos

Entretanto, os casos citados têm foco na previsão de eventos para cenários críticos, diretamente relacionados a eventos climáticos. Com isso a previsão da demanda de

ocorrências emergenciais é realizada a curto prazo, com cerca de 3 dias a uma semana de antecedência e, por consequência, os planos de contingência e atendimento têm caráter pontual para o cenário analisado.

Na abordagem proposta nesta dissertação, a identificação da localização e a previsão das interrupções no sistema de distribuição são orientadas para a interrupção que causa impacto nos indicadores de qualidade e, conseqüentemente, perda da confiabilidade do sistema. Independente do evento que a ocasionou a interrupção, busca-se diminuir o impacto destas ocorrências, considerando uma otimização no planejamento do serviço e assertividade na resposta das ocorrências emergenciais.

4 ABORDAGEM PROPOSTA

A abordagem proposta neste trabalho tem como objetivo contribuir na tomada de decisão do centro de operações de uma distribuidora de energia elétrica. Essa tomada de decisão será pautada na resposta às ocorrências emergenciais que causam longas interrupções e grandes impactos aos usuários do sistema de distribuição. Considerando os pontos mais críticos para o sistema, estudou-se a previsão do comportamento dos eventos na eficácia de um plano de operações pontuado no posicionamento espaço temporal das equipes de manutenção e restauração do funcionamento da rede.

Conhecido o problema abordado neste estudo, pode-se classificar esta pesquisa científica como explicativa, aplicada e quantitativa. Conforme Gil (2002), a busca pela identificação da interdependência das variáveis, onde a causa e o comportamento das interrupções está intimamente relacionado ao efeito que esta ocorrência causa no sistema, caracteriza o estudo explicativo, o qual a finalidade está em aprofundar o conhecimento do cenário real e a razão do impacto causado pelas interrupções, por exemplo. Quanto à abordagem proposta, este estudo se trata de uma pesquisa quantitativa, já que utiliza-se de técnicas estatísticas e matemáticas para traduzir o conhecimento gerado.

Buscando maior assertividade na prospecção das ocorrências e impactos futuros, assim como na sugestão da tomada de decisões, o método foi dividido em três principais etapas, como mostrado no fluxograma da Figura 4.1 e descrito posteriormente neste capítulo. Utilizou-se o procedimento de estudo de caso, baseado na coleta e análise de informações e dados reais de uma distribuidora de energia, para analisar e validar o método proposto neste estudo.

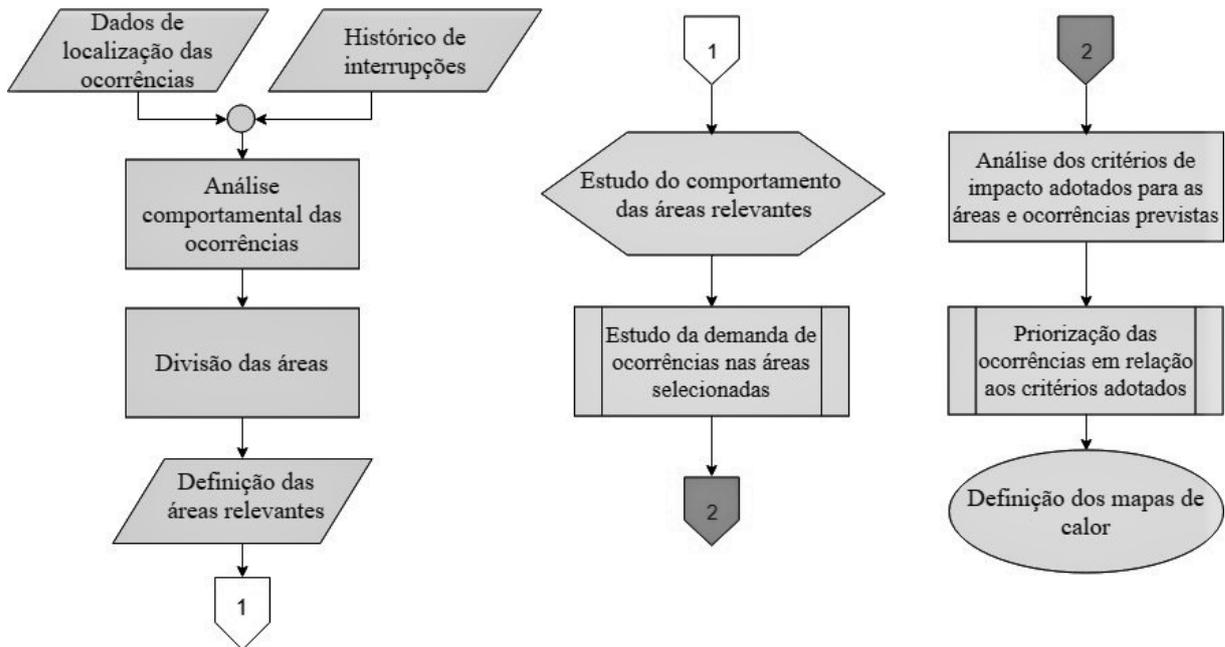
4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Tendo em vista o comportamento altamente dinâmico, caracterizado pela incerteza das interrupções, esta abordagem busca presumir a localização e o período de ocorrência de interrupções, baseando-se no banco de dados histórico de ocorrências.

Para isso definem-se fundamentais os atributos relacionados à localização das interrupções e ao impacto das ocorrências. A realização deste estudo e, conseqüentemente, a assertividade dos resultados obtidos por este se dão pela análise da amostra como um todo, mas também pela estratificação desta através das etapas definidas anteriormente.

Para isto, a abordagem considera os seguintes passos na solução do problema: i) o histórico da ocorrência de interrupções longas e os dados de localização destas para definir o agrupamento das áreas relevantes; ii) O estudo do comportamento estatístico da área agrupada e a previsão de demandas futuras para esta; iii) A análise dos critérios de impacto para a priorização do serviço prestado e, por fim; iv) a definição dos mapas de calor por área

Figura 4.1 – Etapas da abordagem proposta



Fonte: Desenvolvida pela autora

agrupada.

4.2 VARIÁVEIS ANALISADAS E A QUALIDADE DA INFORMAÇÃO

Como a finalidade desta abordagem é tratar do problema causado pela incerteza e impacto das interrupções de fornecimento que causem variação nos índices de confiabilidade da rede, o banco de dados de ordens da distribuidora é filtrado, a ponto de considerar apenas as ocorrências emergenciais, não previstas, com DEC maior que zero (caracterizando interrupções de longa duração).

Esta discriminação delimitou o cenário para caracterizar o perfil da amostra e, com isso, garantir maior assertividade na resposta ao problema analisado. Dentre os atributos que compõem a amostra completa, foram utilizados no desenvolvimento desta abordagem as seguintes informações:

1. Latitude da interrupção;
2. Longitude da interrupção;
3. Data da ocorrência (composta por dia, mês e ano);
4. Dia da semana da ocorrência;

5. Hora da ocorrência;
6. Tempo de serviço;
7. Tempo de Duração da Interrupção;
8. Frequência de Interrupções no local;
9. Número de consumidores afetados pela interrupção.

Investigar os hábitos e as reações de determinados eventos e o comportamento da amostra contribui na apuração e verificação da existência de tendências, ciclos e variações sazonais, aleatoriedades e o grau de dispersão das ocorrências.(MORETTIN; TOLOI, 2006)

Para realizar a projeção das ocorrências futuras de um determinado cenário, se faz necessário conhecer o comportamento da amostra que compõem o cenário passado. É necessário enfatizar a importância da previsão na tomada de decisão, a qual se mostra como um meio de fornecer informações para esta. De caráter quantitativo na metodologia adotada, a análise dos dados obteve o comportamento da amostra através dos cálculos de média, desvio padrão, e coeficiente de variação das principais características da amostra.

Todo o processamento destes dados foram feitos através de funções e diretórios contidos nos pacotes específicos de processamento de dados estatísticos do Octave.

O critério adotado para determinar o grau de dispersão e, conseqüentemente, a quantidade de dados expurgados também depende da análise do comportamento da amostra, e se dá a partir da faixa de controle adotada para o determinado comportamento. Nesta abordagem, a faixa de controle foi delimitada a partir do cálculo do desvio padrão superior dos dados da amostra.

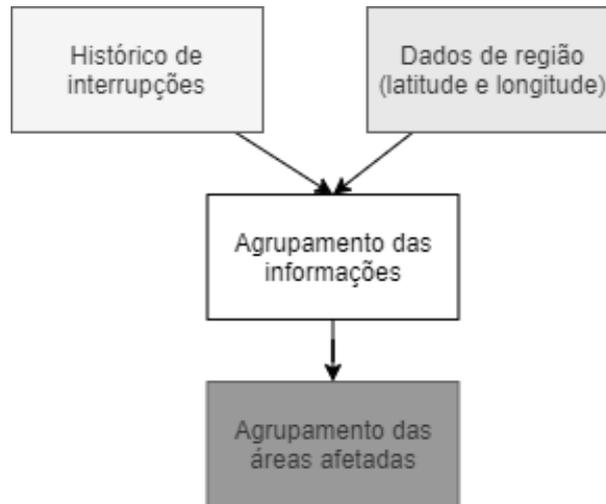
O parâmetro escolhido para esta delimitação do cenário foi critério de tempo de interrupção. Esta escolha se deu devido a alta variabilidade deste critério, que pode resultar em incoerências no estudo do comportamento. O expurgo dos dados mantém o banco enxuto para uma análise mais assertiva.

4.3 AGRUPAMENTO E SELEÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS

O estudo das áreas que apresentam ocorrências se deu a partir da análise estocástica das ocorrências históricas. Ao longo da abordagem foram testados valores limitantes à cada quadrante estabelecido, analisando assim o comportamento de cada um deles.

Sabe-se que quanto menor o valor do quadrante setado, maior é a variabilidade do comportamento das ocorrências nos pontos estudados, tornando assim a análise pouco assertiva em relação ao todo. Enquanto uma área mais abrangente torna a análise ineficaz devido à variabilidade dos resultados. (SINGHEE et al., 2016)

Figura 4.2 – Agrupamento das áreas e interrupções



Fonte: Desenvolvida pela autora

Para a definição do tamanho do quadrante e, conseqüentemente, o estudo do agrupamento das áreas, foi necessário realizar um processo de análise estocástica da área e dos quadrantes. Para isso calculou-se a média, o número máximo e mínimo de ocorrências para o quadrante e o coeficiente de variação das ocorrências em cada particionamento estudado.

Dada a análise é possível setar o tamanho do quadrante que apresenta variação aceitável dentro do padrão estabelecido, assim como a possibilidade de agregação de áreas correlatas. Com a constatação dos quadrantes relevantes foi possível avaliar as demais necessidades de cada área, além do impacto e conseqüentemente as informações necessárias para a tomada de decisão.

A realização do agrupamento se dá devido a necessidade de otimizar a área geográfica analisada, com o objetivo de contribuir com a resposta para a localização das ocorrências. O tempo de resposta e localização das faltas é crucial na minimização do impacto para cada cenário. (CHEN; KEZUNOVIC, 2016)

Quando agrupadas, as áreas que apresentam comportamentos semelhantes são tratadas de maneira análoga, simplificando assim a análise e contribuindo com a assertividade de uma determinada resposta aos eventos que ali ocorrem. A divisão da área geográfica, somada à análise temporal da ocorrência contribui com a estratificação do tempo de serviço, assim como na localização das zonas de maior ocorrência de interrupções, que demandam maior cuidado do centro de operações.

Assim assume-se que esta etapa contribui para o tratamento de ocorrências de interrupções, aumentando a precisão da tomada de decisão quanto ao planejamento diário das equipes de manutenção, minimizando o reticulado da área analisada e garantindo a confiabilidade da previsão, na medida que considera na solução a importância de cada interrupção no aspecto global do problema apresentado.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS

Os pontos críticos são aqueles que apresentam um número superior de interrupções para um mesmo período. A consequência do número mais significativo de ocorrências é o aumento do impacto da interrupção para aquelas áreas e, conseqüentemente, para os usuários ali alocados e indicadores de qualidade da rede.

A combinação da quantidade de ocorrências e do impacto causado por essas em um determinado quadrante de área torna esta localização um ponto crítico na análise e, sendo assim, passível de análise para o centro de operações do sistema de distribuição.

A previsão e identificação de um ponto crítico é crucial no planejamento prévio das equipes de restauração no sistema de distribuição. Além disso, é de extrema importância na minimização do impacto causado pelas ocorrências inevitáveis e na diminuição do tempo de restauração. (SINGHEE et al., 2016)

Ao antecipar as incertezas, o centro de operações e, conseqüentemente a distribuidora de energia, estão construindo uma ação próativa na administração dos possíveis riscos e danos causados pelas interrupções de energia. Nesta abordagem, a ação é realizada através do planejamento prévio dessas ações, orientadas pela antecipação das incertezas, ou seja, do reconhecimento do histórico e comportamento da rede.

Neste processo, a delimitação dos espaços físicos, realizado a partir do agrupamento das áreas, é de extrema importância devido à variabilidade de ocorrências em pontos distintos da rede de distribuição. A causa ou motivação de uma ocorrência pode apresentar a raiz do problema em um mesmo ponto ou região, normalmente em um determinado equipamento que compõe a rede, área arborizada ou de barreiras físicas para a rede de distribuição. No entanto o endereçamento de uma ocorrência pode não se limitar a determinados pontos de solução, e sim em um ponto aleatório da rede. (SCHMITZ et al., 2017)

O centro de operações funciona como uma base que determina a logística das equipes de manutenção e restabelecimento de energia. Para endereçar uma determinada equipe para ocorrência, o gestor da logística considera os pontos conhecidos da rede de distribuição, o qual considera o ponto de solução para a interrupção analisada. A identificação dos pontos críticos analisa uma determinada área de dimensão determinada a partir do estudo de variabilidade das ocorrências, conforme apresentado no item anterior sobre o agrupamento das áreas.

Nesta abordagem, a identificação dos pontos críticos leva à priorização das ocorrências a partir da avaliação do impacto de cada uma das áreas setadas como pontos de atenção, a partir dos parâmetros de criticidade e importância avaliados no item a seguir.

4.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO PARA A TOMADA DE DECISÃO

Devido aos diversos critérios que envolvem a avaliação do desempenho do sistema de distribuição, a tomada de decisão relacionada à resposta do centro de operações se mostra como um problema de análise multicriterial. A prioridade no atendimento de uma ordem emergencial em relação às demais ordens que compõe o conjunto de atendimentos planejados para o período.

Em se tratando de sistemas de distribuição de energia, os critérios atribuídos à análise de priorização podem ser de natureza econômica, técnica, social ou relacionado ao cenário e meio ambiente (WANG et al., 2009).

Considerando o cenário do problema analisado e o objetivo desta metodologia, adotou-se o processo de hierarquia analítica (AHP) como técnica para a tomada de decisão e priorização das ordens estudadas, por este apresentar sensibilidade às mudanças do cenário e, por isso, refletir maior adaptabilidade ao planejamento diário.

Os critérios de avaliação adotados para a estruturação do método utilizado refletem aos respectivos parâmetros contidos no banco de dados:

1. Tempo de interrupção;
2. Quantidade de consumidores afetados pela ocorrência;
3. Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC);
4. Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC);
5. Tempo de serviço das equipes de manutenção.

Essa classificação dos critérios se deu a partir da análise do impacto de cada um dos parâmetros em relação

5 ESTUDO DE CASO

5.1 ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS E A DEMANDA DE OCORRÊNCIAS

Para o desenvolvimento deste estudo de caso foram utilizados dados históricos das ocorrências registradas pelo centro de operações da área de concessão da RGE Sul.

A amostra analisada composta pelas ocorrências somadas entre as subestações Santa Maria 1, Santa Maria 2, Santa Maria 4 e Santa Maria 5 no período registrado entre 01 de janeiro de 2014 e 31 de dezembro de 2017, conforme disponibilizado pela concessionária analisada por este estudo, é formada por 29.754 registros de ocorrências. As ocorrências foram segmentadas em relação ao ano e mês de ocorrências e apresentadas na Tabela 5.1 deste capítulo.

O cenário foi delimitado a partir das características necessárias para a abordagem, filtrando assim as ocorrências emergenciais, imprevistas e com DEC representativo e maior que zero.

Estratificada a partir do período de ocorrência, a Figura 5.1 mostra o comportamento da amostra estudada, com a quantidade de ocorrências que a compõem nos meses analisados, assim como a média de ocorrências para este cenário.

A Tabela 5.2 a seguir apresenta a média dos indicadores analisados para o período da amostra, considerando as 27.493 ordens emergenciais com DEC superior à zero. Este parâmetro contribui para o reconhecimento do comportamento normal da amostra, o que serve para comparação dos parâmetros das áreas mais críticas.

Afim de garantir a qualidade estatística da amostra, ainda analisou-se especificamente cada parâmetro que compunha a mesma, considerando a importância dos indicadores na qualidade do resultado. Percebeu-se que a maior variância ocorria no indicador de tempo total de interrupção de fornecimento, o que poderia caracterizar uma variação considerável dentre os resultados e a análise das localizações.

Com isso, o expurgo foi realizado a partir da representação da variável do tempo de duração das interrupções. Este parâmetro foi escolhido devido à sua grande variabilidade e importância em relação aos demais dados que compõe as características de cada ordem de serviço analisada. Com isso foram analisadas 27.493 ordens do banco de dados, sendo assim excluídas 2.262 linhas de informação que extrapolavam o limite do expurgo.

Para além da análise geral, foram estratificadas anualmente as ocorrências de interrupções estudadas na amostra, apresentadas graficamente no apêndice A deste documento, com suas devidas médias anuais e desvio padrão superior para a amostra, considerando número de ocorrências.

Tabela 5.1 – Ocorrências mensais da amostra

Ocorrência de 2014		Ocorrência de 2015	
Janeiro	802	Janeiro	712
Fevereiro	666	Fevereiro	435
Março	448	Março	379
Abril	425	Abril	431
Maio	406	Maio	492
Junho	740	Junho	370
Julho	641	Julho	630
Agosto	519	Agosto	835
Setembro	842	Setembro	545
Outubro	758	Outubro	1304
Novembro	798	Novembro	683
Dezembro	106	Dezembro	871
Média 2014	595,92	Média 2015	640,58

Ocorrência de 2016		Ocorrência de 2017	
Janeiro	443	Janeiro	548
Fevereiro	557	Fevereiro	400
Março	696	Março	491
Abril	773	Abril	524
Maio	559	Maio	1005
Junho	296	Junho	373
Julho	363	Julho	413
Agosto	345	Agosto	658
Setembro	479	Setembro	494
Outubro	579	Outubro	1361
Novembro	763	Novembro	626
Dezembro	485	Dezembro	444
Média 2016	528,17	Média 2017	611,42

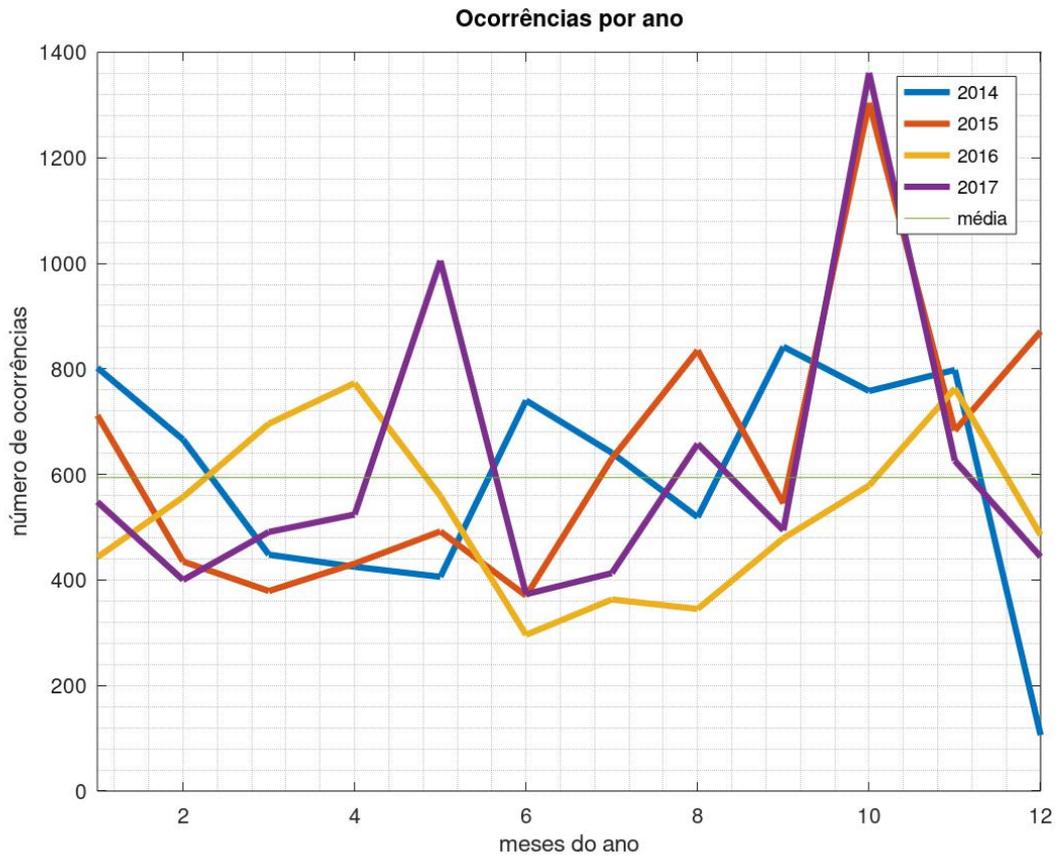
5.2 ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DA AMOSTRA

O estudo de caso foi realizado a partir dos dados históricos disponibilizados pela distribuidora. A área de abrangência do atendimento das 4 subestações analisadas compreende a região de Santa Maria e distritos adjacentes, dentre os pontos de latitude -30.345 a -29.36 e de longitude -54.301 a -51.364, conforme demarcados no mapa da Figura 5.2.

A determinação do tamanho do quadrante setado foi realizada a partir da análise dos indicadores avaliados após o particionamento da área total da amostra. Para isso, foi setado no processamento dos dados de localização diferentes valores para o tamanho do quadrante de particionamento, iniciando de 200m até 1km.

O particionamento da área foi calculado a partir da tradução dos pontos de latitude e longitude para um determinado mapa. A partir dessa tradução, o particionamento é realizado

Figura 5.1 – Comportamento da amostra apra o número de ocorrências



Fonte: desenvolvido pela autora.

considerando o tamanho em quilometro setado pelo operador. Cada um dos quadrantes resultantes do particionamento foi numerado e as ocorrências foram orientadas à área nomeada de sua localização.

Para determinar o tamanho do quadrante particionado, foram calculadas o coeficiente de variação médio das áreas, a quantidade de ocorrências e o comportamento estocástico da amostra para cada particionamento setado.

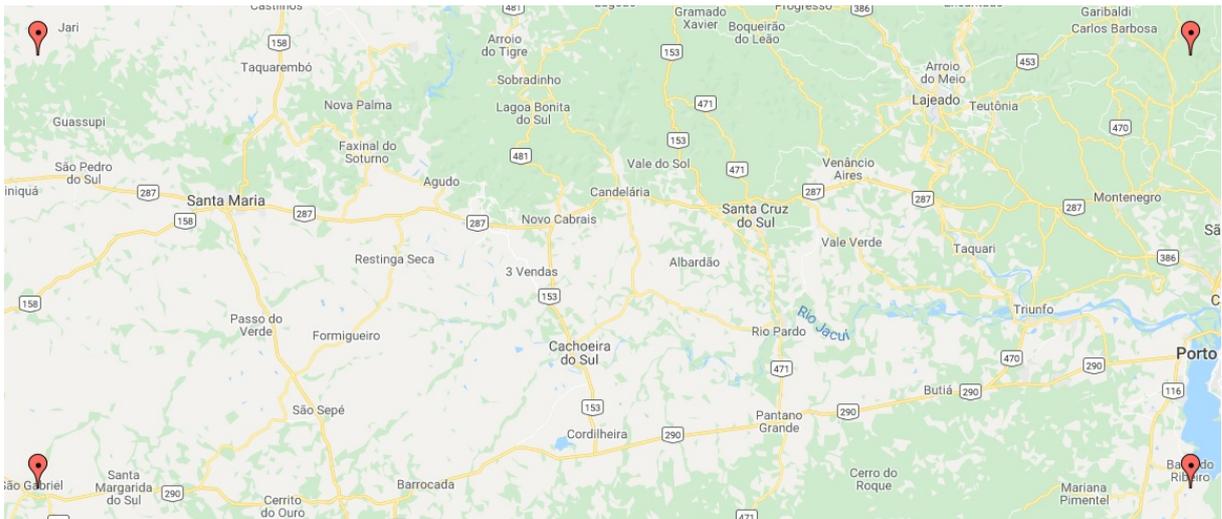
Na Tabela 5.3 são apresentados as medidas de quadrantes testados para a área total da concessionária e seus respectivos resultados de quantidades de quadrantes e variação da relevância dos mesmos. Estes testes precederam a escolha do particionamento da área e, para cada qual foram analisadas as relevâncias das áreas particionadas em relação à estes resultados e à análise estocástica de cada amostra. Por fim, adotou-se o quadrante de tamanho 400m para a análise dos demais comportamentos e priorização de áreas afetadas de acordo com os critérios adotados.

Ao agregarmos as ocorrências de acordo com a área que elas ocorrem, a análise se torna mais assertiva e completa. Entretanto a definição do tamanho é de extrema importância para a

Tabela 5.2 – Média dos indicadores analisados para o período da amostra

Indicador	média
DEC	0,014879
FEC	0,0058154
Consumidores afetados	229,69
Tempo de interrupção(h)	425,71
Tempo de Serviço(h)	0,12

Figura 5.2 – Área de abrangência



Fonte: desenvolvido pela autora.

análise estatística, visto que quando agregamos áreas maiores, a tendência de comportamento é que mais quadrantes sejam relevantes devido à quantidade de ocorrências e o agregado dos valores de cada um dos critérios de análise. O processo inverso ocorre quando analisamos quadrantes muito pequenos, que agregam poucas ocorrências e, conseqüentemente, os critérios são pouco críticos.

Observando os mapas de calor das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 é possível comparar essa diferença descrita, onde a variação entre as quantidades de áreas mais críticas para os particionamentos maiores e menores. O cálculo da variação percentual da quantidade de ordens que ocorrem em cada um dos quadrantes e apresentada na Tabela 5.3 é perceptível quando plotada na imagem.

A definição se deu devido à quantidade de áreas relevantes apresentadas além do coeficiente de variação de ocorrências em cada área particionada. A tomada de decisão se dá de forma mais assertiva quando analisadas as áreas que apresentam um maior número de ocorrências e de indicadores que se façam relevantes à análise e à manutenção.

Tabela 5.3 – Teste para particionamento

Tamanho (km)	Quantidade de quadrantes	Variação do n° de ocorrências(%)
0,2	724.217	15
0,4	181.545	30
0,6	80.850	48,6
0,8	45.632	62
1,0	29.106	73

5.3 LOCALIZAÇÃO E NÍVEL DE OCORRÊNCIA DE INTERRUPÇÕES

A distribuição geográfica das ordens previstas se deu a partir da análise dos dados disponibilizados. A partir da divisão da área de abrangência das subestações analisadas, foram alocadas todas as ocorrências históricas, com os devidos critérios de priorização, no quadrante que abrange os pontos de latitude e longitude da rede.

Conforme apresentado anteriormente, a área foi dividida em quadrantes de $400m^2$, totalizando então 181.545 quadrantes na área total analisada. As Figuras 5.6 e 5.7 a seguir apresentam, respectivamente, o histograma de ocorrências por quadrante da área analisada e o mapa de ocorrência definidos para o quadrante setado para o critério de clientes afetados.

Dentre o total de quadrantes resultante do particionamento, foram analisadas as áreas mais relevantes. Essa definição se deu a partir da quantidade de ocorrências e da investigação da qualificação dos indicadores de qualidade e critérios relevantes utilizados na verificação do impacto e priorização das áreas.

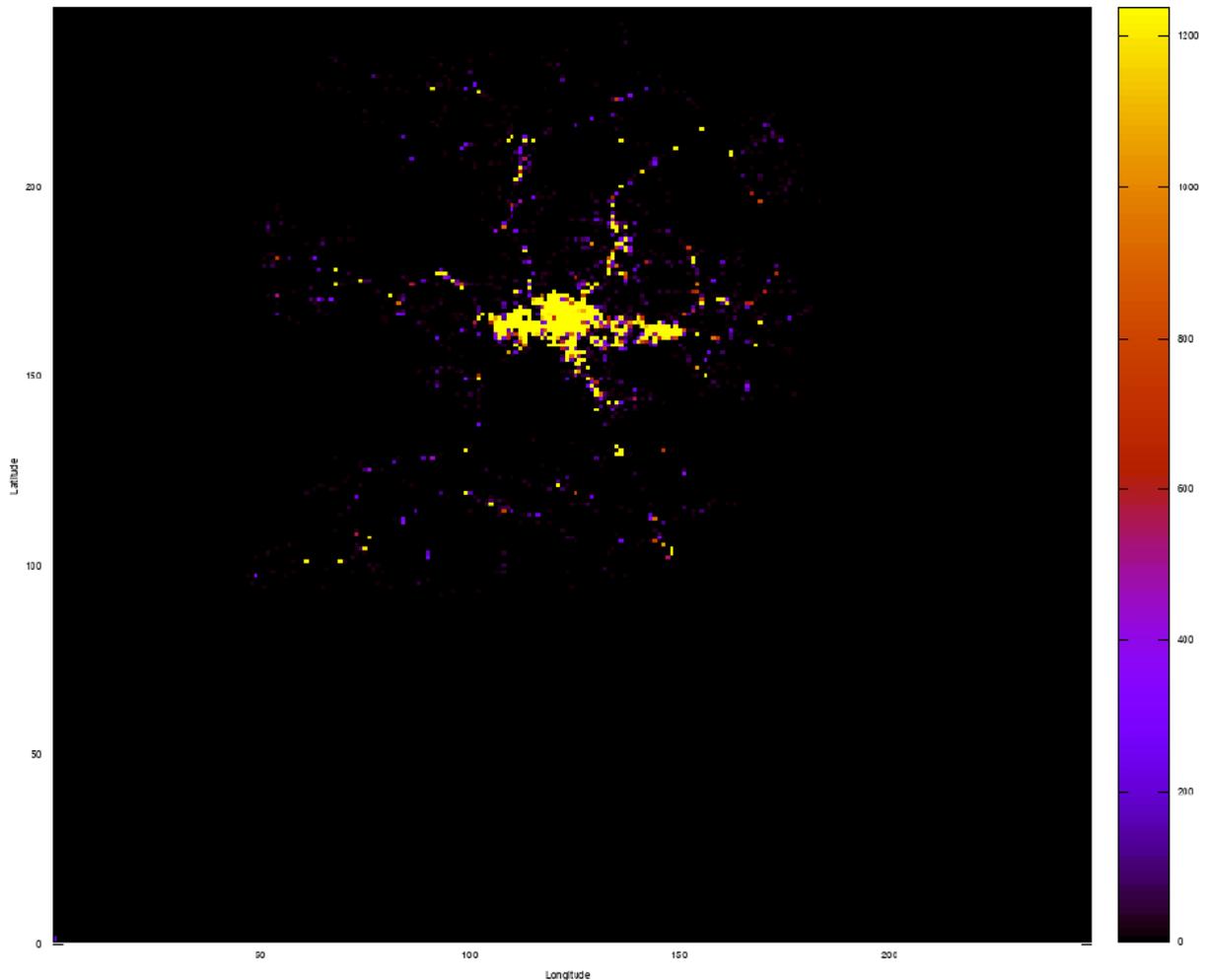
5.4 ESTUDO DO IMPACTO E PRIORIZAÇÃO DAS LOCALIZAÇÕES

O grande desafios de setores tão dinâmicos como a operação do sistema de distribuição e o despacho de equipes para manutenção em campo é a complexidade de gerenciar recursos e priorizar serviços. Elencar prioridades neste setor, muitas vezes, é uma tarefa nebulosa devido às emergências e ao gerenciamento do tempo das equipes.

Visando facilitar consideravelmente a tomada de decisão da priorização de serviços, os critérios adotados para a análise das ordens foram organizados a partir da ordem numérica apresentada na Tabela 5.2 a seguir. A avaliação das prioridades se deu considerando o impacto observado na confiabilidade do sistema, do mais influente ao menos influente.

Definida a priorização dos critérios a partir da bibliografia analisada no referencial teórico, analisou-se a importância de cada um dos critérios adotados em relação ao cenário como um todo e, comparando assim a importância de cada um desses critérios em relação ao outro. A partir desta comparação, definiu-se a matriz de julgamento através da compilação de informações e opiniões publicadas na revisão bibliográfica feita neste trabalho, que para este caso apresenta-se a seguir na Equação 5.1. Os índices utilizados seguem a escala numérica de

Figura 5.3 – Mapa de Calor da quantidade de ocorrências para particionamento de 400m



Fonte: desenvolvido pela autora.

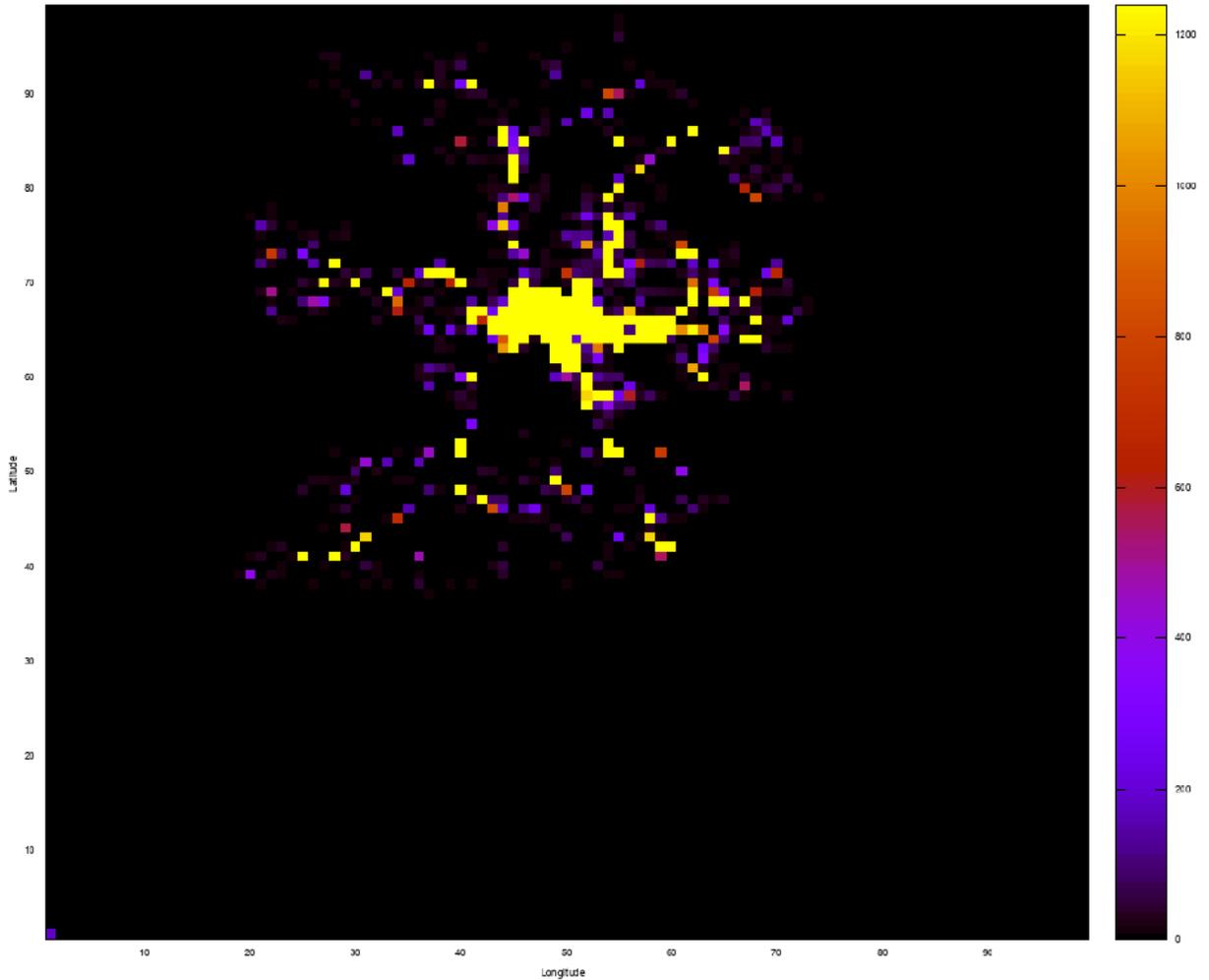
priorização e julgamento definida por Saaty (1990) no desenvolvimento da metodologia AHP.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Esta etapa do método é crucial para a definição dos pesos de cada um dos critérios, o que define a importância de cada cenário na tomada de decisão para a priorização das ordens, definindo então necessidade de privilegiar uma área ou local da rede que apresente maior impacto nos indicadores e nos usuários ao apresentar uma falta inesperada.

Construída a matriz de julgamento, é necessário normalizá-la, para prosseguir com a utilização do método e cálculo dos pesos de cada critério. Esse processo resultou na Tabela 5.4,

Figura 5.4 – Mapa de Calor da quantidade de ocorrências para particionamento de 1km



Fonte: desenvolvido pela autora.

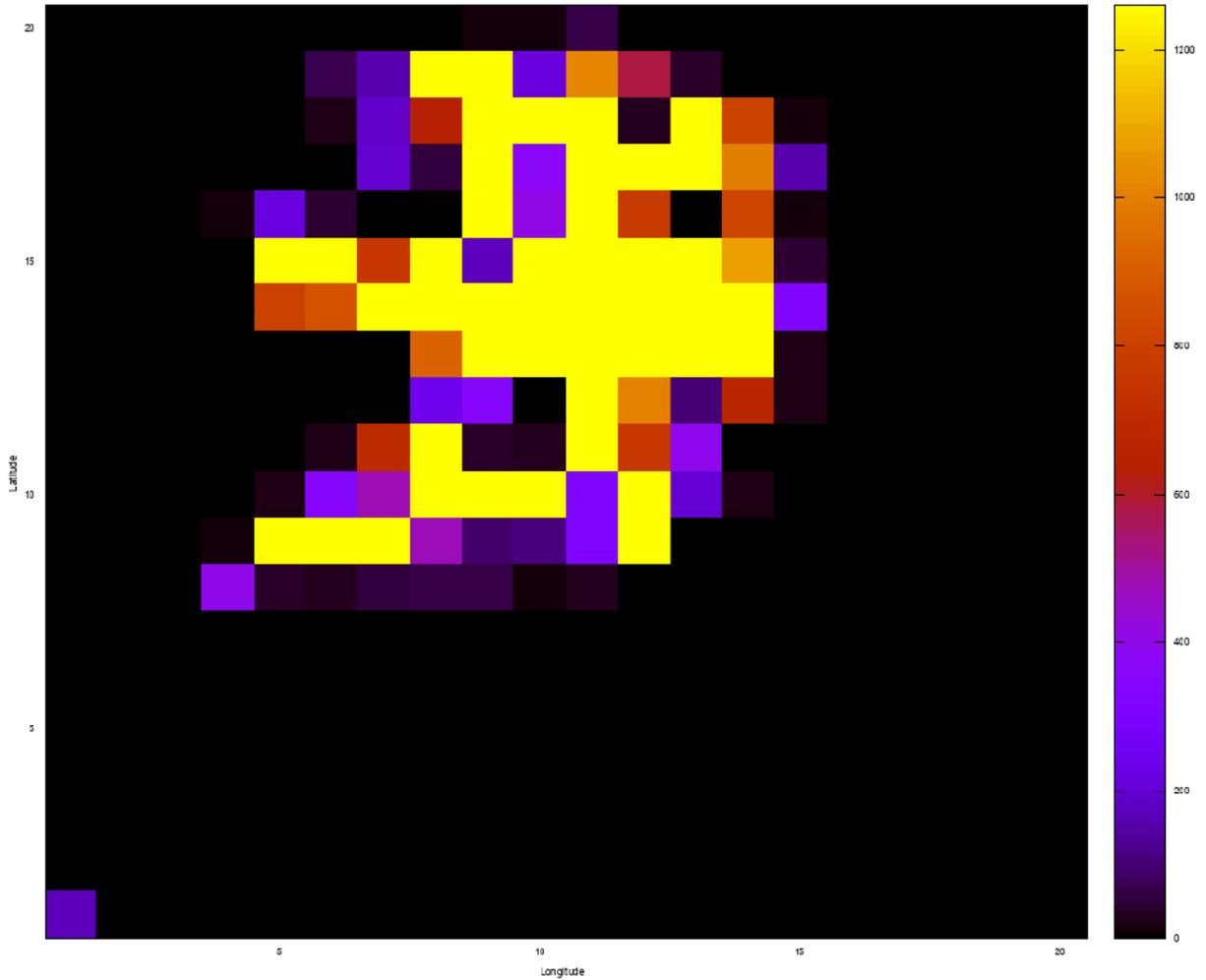
apresentada a seguir.

$$M_* = \begin{bmatrix} 0.38760 & 0.46189 & 0.33333 & 0.35294 & 0.38462 \\ 0.19380 & 0.23095 & 0.33333 & 0.23529 & 0.23077 \\ 0.19380 & 0.11547 & 0.16667 & 0.23529 & 0.15385 \\ 0.12791 & 0.11547 & 0.08333 & 0.11765 & 0.15385 \\ 0.096899 & 0.076212 & 0.08333 & 0.058824 & 0.076923 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Considerando então ambas as matrizes anteriores, calcula-se o valor médio de cada linha da matriz normalizada, de acordo com a equação 2.2 apresentada, obtendo assim a matriz de ponderação, com o peso de cada critério em análise. Com isso, definiu-se a ponderação para cada critério, conforme apresentado na Tabela 5.3, respeitando a definição de que o somatório de todos os itens seja igual a 1.

Para além, foi realizado os devidos testes de consistência dos índices de ponderação

Figura 5.5 – Mapa de Calor da quantidade de ocorrências para particionamento de 5km



Fonte: desenvolvido pela autora.

calculados e nos elementos da matriz de julgamento M. Conforme apresentado na Tabela 5.4, o fator λ_{max} é imprescindível para o cálculo do índice de consistência IC.

Reconhecido o fator λ_{max} , calculou-se o índice de consistência (IC) e a razão de consistência (RC), demonstrados nas equações a seguir.

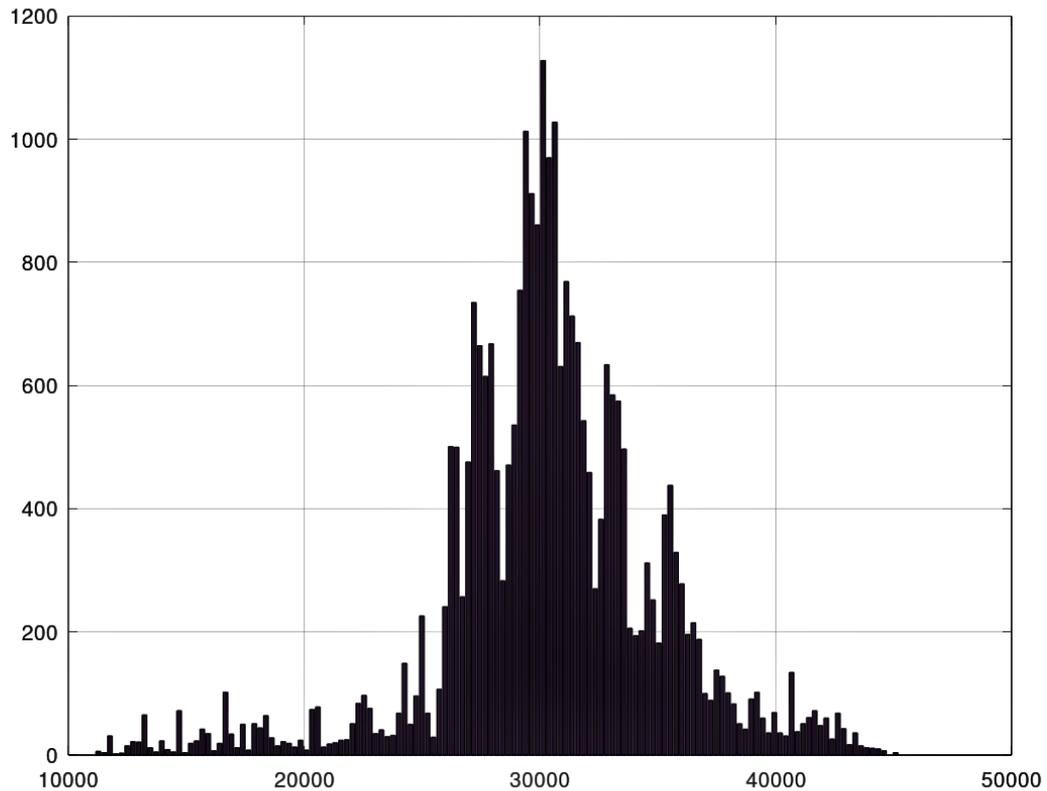
$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \quad (5.3)$$

$$IC = \frac{(5.1258 - 5)}{5 - 1}$$

$$IC = 0.031442$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (5.4)$$

Figura 5.6 – Histograma das áreas de ocorrência de interrupção



Fonte: desenvolvido pela autora.

$$RC = \frac{0.031442}{1.12}$$

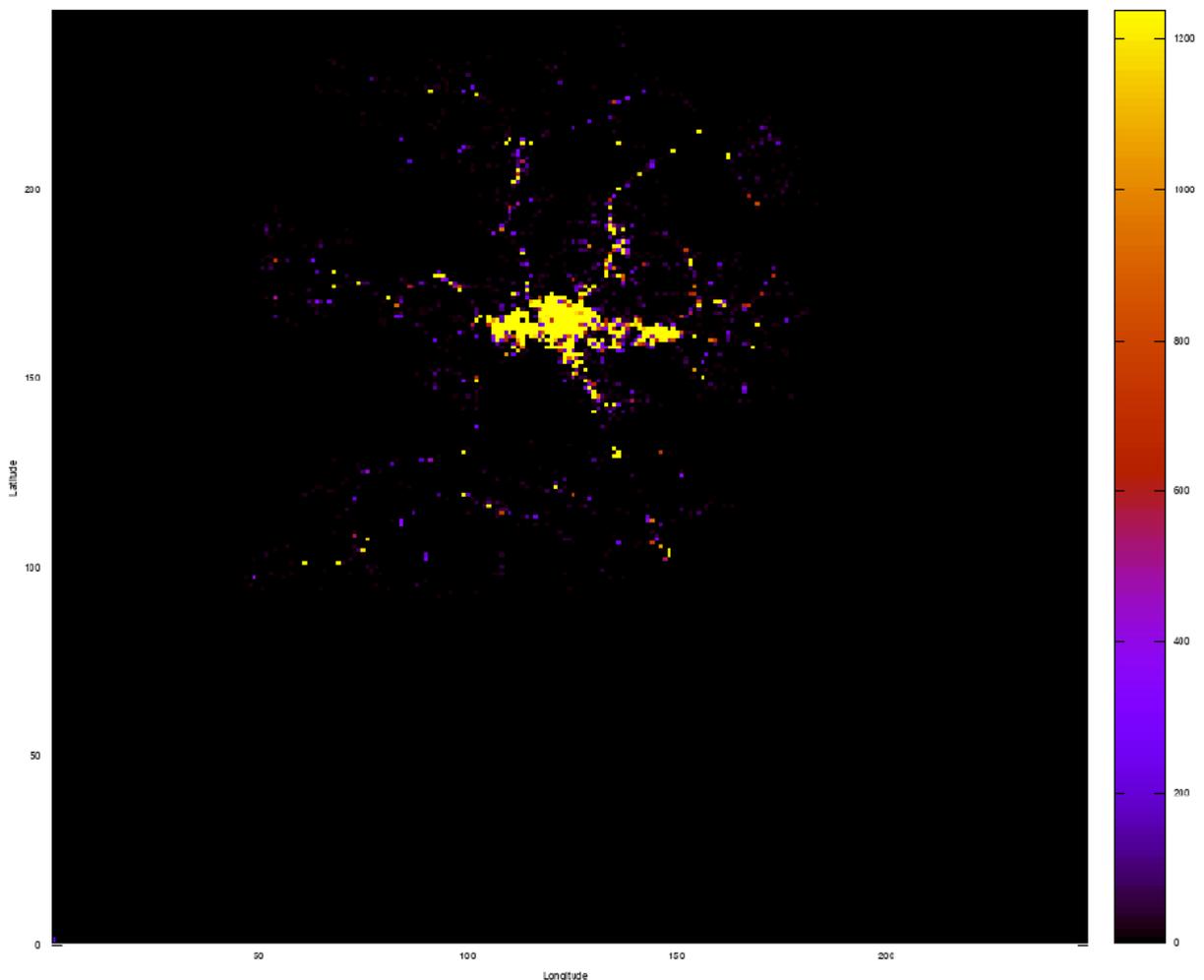
$$RC = 0.028073$$

Assim, definidos os pesos e testados os índices de consistência da ponderação, pode-se aplicar a análise nos índices normalizados, devidamente fragmentados em quadrantes específicos, coordenados a partir da otimização das áreas de abrangência da amostra, apresentados na seção 5.2 e 5.3 deste estudo.

Para isso, foi construída uma matriz com todos os critérios atribuídos às ocorrências e seus respectivos locais, e o peso de cada critério calculado a partir do método AHP foi aplicado aos critérios de confiabilidade atribuídos a cada uma das ocorrências. Esse processo se deu com o objetivo de selecionar as áreas de abrangência de ordens que apresentassem maior média de incidência de ocorrências, assim como maior impacto destes eventos.

Os pesos foram aplicados para que a relevância de cada critério, conforme apresentado na Tabela 5.3 de análise de ponderação, se fizesse aparente para a tomada de decisão. Além

Figura 5.7 – Mapa de Calor da quantidade de consumidores afetados para particionamento de 400m



Fonte: desenvolvido pela autora.

disso, a matriz foi normalizada, para que os critérios pudessem ser comparados de forma igualitária.

Foram então selecionadas as áreas apresentadas na Figura 5.8 a seguir, pois estas apresentaram as maiores médias de ocorrências e criticidade dos critérios de impacto considerando o comportamento das ordens.

Além das áreas que apresentaram maior quantidade de ocorrências previstas, foram selecionadas as áreas com os maiores índices de impacto, para cada indicador avaliado. Estas com o intuito de trazendo maior efetividade na priorização e aplicação do AHP, visto que algumas áreas apresentam poucas ocorrências de grande impacto para um ou outro indicador, mas não são priorizadas devido aos demais e ao peso de cada critério estipulado. A avaliação dos critérios é apresentada na Tabela 5.7, para cada área selecionada em questão.

Tabela 5.4 – Priorização dos critérios de análise

Critério	
C1	Quantidade de Consumidores Afetados
C2	Duração Equivalente DEC
C3	Tempo de Interrupção
C4	Tempo de Serviço
C5	Frequência Equivalente FEC

Fonte: desenvolvido pela autora, baseado em Saaty (2012).

Tabela 5.5 – Critério de análise e priorização

Critério	Ponderação
Quantidade de Consumidores Afetados	0.38408
Duração Equivalente DEC	0.24483
Tempo de Interrupção	0.17302
Tempo de Serviço	0.11964
Frequência Equivalente FEC	0.078438
Somatório	1

Fonte: desenvolvido pela autora, baseado em Saaty (2012).

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A aplicação da abordagem proposta por este estudo no banco de dados disponibilizado pela distribuidora de energia em questão resultou nas elucidações apresentadas no estudo de caso, e vieram de encontro aos objetivos setados pelo estudo. Representada pelos mapas de calor das áreas relevantes, juntamente do estudo do comportamento das ordens nessas áreas, foi possível sugerir medidas e indicadores para o planejamento mais assertivo do centro de operações quanto à resposta aos sinistros que ocasionam interrupções de energia.

Ao atribuir os pesos calculados no método de priorização aos critérios de análise, foram selecionadas as áreas apresentadas na Tabela 5.5 e Figura 5.7 como pontos críticos para o impacto das ocorrências de falta de energia.

Considerando os critérios analisados aos locais selecionados, encontramos coerência na literatura referenciada nesta pesquisa, que constatam que o maior número de ocorrências e a maior criticidade ocorrem, considerando redes radiais, nos centros urbanos e nas periferias mais afastadas. Estas constatações se dão a partir de estudos que consideram os centros urbanos com maior aglomeração de clientes que podem ser afetados pelas interrupções. Já nas periferias, é levado em conta a alta potência instalada das propriedades rurais, além do difícil acesso, que resulta no aumento da duração da interrupção visto em 3 dos 5 critérios avaliados.

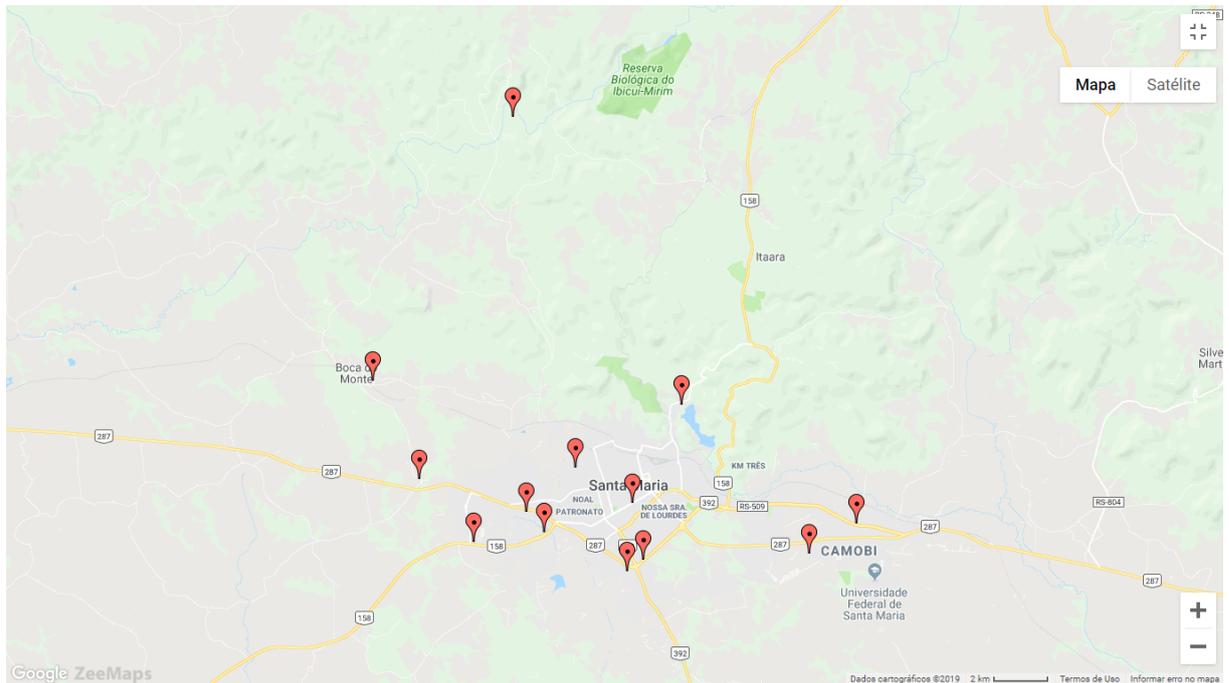
Em encontro com os objetivos do método, é de suma importância ao centro de operações estar atento a tais pontos, visto que estes são extremamente relevantes no estudo do impacto dos índices de confiabilidade e continuidade do serviço. Para além deve-se manter a

Tabela 5.6 – Cálculo do autovalor máximo

	M^*xw^*	Resultante
λ_{max}	1.9708	5.1258
	1.2575	
	0.88363	
	0.61219	
	0.40158	

Fonte: desenvolvido pela autora, baseado em Saaty (2012).

Figura 5.8 – Áreas selecionadas para análise de priorização



Fonte: desenvolvido pela autora.

atenção aos pontos que a rede apresenta maiores falhas, podendo-se adicionar ao planejamento de melhorias contínuas ações que contribuíssem com a redução ou mitigação dos riscos para os pontos citados.

Tabela 5.7 – Áreas priorizadas após análise dos critérios

Área Priorizada		Critério crítico	Peso atribuído
Latitude	Longitude		
-29.697	-53.852	C1	
-29.686	-53.893	C2	
-29.704	-53.845	C1	
-29.694	-53.811	C3	
-29.713	-53.807	C2	
-29.711	-53.743	C2	
-29.661	-53.792	C5	
-29.707	-53.872	C3	
-29.682	-53.833	C2	
-29.701	-53.725	C1	
-29.653	-53.911	C4	
-29.717	-53.813	C3	
-29.564	-53.857	C3	

Fonte: desenvolvido pela autora

6 CONCLUSÃO

Conforme os objetivos traçados no início deste documento, a análise das interrupções de energia foi realizada trazendo o viés da importância da localização geográfica e dos indicadores de qualidade. Aquém da rotina de priorização de atendimentos corriqueira, a abordagem proposta busca a melhoria da qualidade do serviço e a assertividade na tomada de decisão das equipes quanto ao seu posicionamento.

Ao quantificar e analisar o impacto das faltas do sistema de distribuição, quanto à qualificação dos indicadores e o tempo de serviço e interrupção, pode-se traçar um plano de ações que contribua com as áreas que apresentem maior risco e, conseqüentemente, eleve os indicadores de confiabilidade da distribuidora.

Assim se dá a principal contribuição desta abordagem, tomando a assertividade da tomada de decisão do centro de operações e manutenção da rede, para direcionar os esforços dos times de campo para áreas de maior impacto. A Redução dos riscos e índices, que aqui foram usados como critério de priorização, se dá a partir da efetividade das equipes em atender as ocorrências.

Ao reduzir o tempo de resposta das equipes de campo, considerando o direcionamento de recursos para as áreas de maior probabilidade de impacto, visamos uma melhor utilização de recursos financeiros e humanos. Essa redução é potencialmente direcionada ao tempo de duração dos eventos de interrupção, refletindo-se nos indicadores de qualidade.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Ao considerar o andamento desta pesquisa e as possibilidades viáveis de continuação dos estudos que a compõem, percebeu-se a possibilidade de dar continuidade à mesma, trabalhando com novos métodos e dando diferentes vieses à aplicação da mesma.

Ao considerar informações mais completas e complexas de cada falta e ordem ocorrida, sugere-se a análise da causa e do efeito das falhas do sistema que ocasionam interrupções no fornecimento de energia. Essa análise tornará mais assertiva e completa a resposta do centro de operações e do planejamento da operação, podendo também levar à metodologia de previsão do acontecimento considerando fatores decisivos da geração do sinistro e tempos mais curtos de resposta.

Tratando-se da previsibilidade das ordens e da alimentação constante do banco de dados, há ainda a possibilidade de se estender a pesquisa à previsão de demanda em tempo real, possibilitando o roteamento das equipes de acordo com os ocorridos de maior impacto na rede e nos usuários, direcionando assim a atenção da manutenção para pontos de maior impacto sócio-econômico para a distribuidora.

Além das análises a nível macro apresentadas neste documento, existe a possibilidade de evoluir estes resultados à nível micro, através de análises estocásticas e de probabilidades no reconhecimento do comportamento diário do sistema. Com esse estudo é possível analisar as melhorias que podem ser aplicadas ao sistema de distribuição para melhorar a performance do mesmo nos indicativos de confiabilidade e qualidade para o consumidor.

Para além, ponderando os objetivos desta pesquisa e a necessidade de modernização do setor de distribuição brasileiro, assim como a carência do sistema em se tratando da gestão da distribuição, acredita-se no potencial da continuação desta pesquisa para a melhoria dos serviços prestados pelas concessionárias e para o consumidor final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÜERO, J. R. et al. Distribution system reliability improvement using predictive models. In: 2009 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2009. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–7.

ANEEL, A. N. d. E. E. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414**. 2010. 205 p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ren-414>>.

_____. **Módulo 1 – Introdução**. 2012. 61 p.

_____. **Resolução Normativa nº 482**. 2012. 12 p.

_____. **Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica**. [S.l.], 2016. Acessado em: maio/2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-1/656831>.

_____. **Fornecimento de energia elétrica no país melhora em 2017**: Assessoria de imprensa. ANEEL, 2018. Acessado em: 24/maio/2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/fornecimento-de-energia-eletrica-no-pais-melhora-em-2017/656877?inheritRedirect=false>.

_____. **Fornecimento de energia elétrica no país melhora em 2017**. [S.l.], 2018. Acessado em: abril/2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/fornecimento-de-energia-eletrica-no-pais-melhora-em-2017/656877?inheritRedirect=false>.

_____. **Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**. 2018. 88 p.

_____. **Tempo de atendimento às ocorrências emergenciais**. [S.l.], 2018. Acessado em: abril/2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tempo-de-atendimento-as-ocorrencias>>.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Painel de desempenho das distribuidoras de energia elétrica**. [S.l.], 2017. 4 p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/painel-de-desempenho>>.

ARCHER, B. H. Forecasting demand. quantitative and intuitive techniques. **International Journal of Tourism Management**, v. 1, n. 1, p. 5–12, 1980.

ARIF, A. et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs , reconfiguration , and dg dispatch. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3053, n. 1, p. 1–10, 2017.

ARMSTRONG, J. S. Strategic planning and forecasting fundamentals. In: ALBERT, K. (Ed.). **The Strategic Management Handbook**. New York: McGraw Hill, 1983. cap. Strategic, p. 1–31.

BAHMANYAR, A. et al. Fast fault location for fast restoration of smart electrical distribution grids. In: **2nd International Smart Cities Conference: Improving the Citizens Quality of life**. IEEE, 2016. p. 1–6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7580741>>.

_____. A comparison framework for distribution system outage and fault location methods. **Electric Power Systems Research**, v. 145, p. 19–34, 2017.

BANERJEE, A. et al. Minimization of reliability indices and cost of power distribution systems in urban areas using an efficient hybrid meta-heuristic algorithm. **Soft Computing**, Springer Berlin Heidelberg, 2017.

BATAGLIA, W.; YU, A. S. O. A sincronização da tomada de decisão estratégica com o planejamento estratégico formal. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 9, n. 5, p. 82–111, 2008.

BERNARDON, D. P. et al. **Sistemas de distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes - uma abordagem para reconfiguração de redes**. [S.l.]: AGEPOC, 2015. 163 p.

BRASIL. **Decreto Lei n 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Diário Oficial da União de 27/12/1996, P. 28653, 1996. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil/_03/leis/L9427compilada.>

CHEN, P.-C.; KEZUNOVIC, M. Fuzzy logic approach to predictive risk analysis in distribution outages management. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 6, p. 2827 – 2836, 2016. Acessado em: março/2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7485829/>>.

DAKIN, S.; ARMSTRONG, J. S. Predicting job performance: A comparison of expert opinion and research findings. **International Journal of Forecasting**, v. 5, n. 2, p. 187–194, 1989.

DEBNATH, K. B.; MOURSHED, M. Forecasting methods in energy planning models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 88, p. 297–325, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.002>>.

FARZIN, H.; FIRUZABAD, M. F.; AGHTAIE, M. M. Role of outage management strategy in reliability performance of multimicrogrid distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 3, p. 2359–2369, 2018.

FERRUCCI, F.; BOCK, S.; GENDREAU, M. A pro-active real-time control approach for dynamic vehicle routing problems dealing with the delivery of urgent goods. **European Journal of Operational Research**, Elsevier B.V., v. 225, n. 1, p. 130–141, 2013.

FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. **Service management : Operations, Strategy, Information Technology**. 7th. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2011. 564 p. ISBN 9780073403359.

GABR, M. A. et al. A new impedance-based fault location scheme for overhead unbalanced radial distribution networks. **Electric Power Systems Research**, v. 142, p. 153–162, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.015>>.

GANAN, N. et al. A comprehensive review of fault location methods for distribution power system. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 6, n. 1, p. 185–192, 2017.

GARCIA, V. J. et al. Emergency work orders in electric distribution utilities: From business process definition to quantitative improvements. In: 47TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE - UPEC, 2012, London, UK. [S.l.]: UPEC, 2012.

GIGERENZER, G.; GAISSMAIER, W. Heuristic decision making. **Annual Review of Psychology**, v. 62, n. 1, p. 451–482, 2011. PMID: 21126183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120709-145346>>.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4th. ed. [S.l.]: Atlas SA, 2002. 173 p.

GUI, M.; PAHWA, A.; DAS, S. Bayesian network model with monte carlo simulations for analysis of animal-related outages in overhead distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 3, p. 1618–1624, 2011.

GUIMARÃES, I. G. et al. Exponential smoothing for emergency service forecasting in electric power distribution utilities. In: 51ST INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2016. [S.l.]: UPEC, 2017.

JIANG, Y.; XIA, Y. Smart fault indicators for advanced outage management of distribution systems. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2018., 2018. **2018 IEEE/PES (TeD)**. Denver, CO, USA: IEEE, 2018. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8440284>>.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica**. [S.l.]: Blucher, 2009. 240 p.

LI, H.; TREINISH, L.; HOSKING, J. A statistical model for risk management of electric outage forecasts. **IBM Journal of Research and Development**, v. 54, n. 3, p. 1–11, 2010.

LI, Z. et al. Spatio-temporal forecasting of weather-driven damage in a distribution system. In: 2015 IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2015, Denver, CO, USA. IEEE, 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7285788/>>.

LOBO, A. **Qualidade e produtividade**. 2003.

MAKRIDAKIS, S. Metaforecasting: Ways of improving forecasting accuracy and usefulness. **International Journal of Forecasting** 4, v. 4, n. 3, p. 467 – 491, 1988.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. [S.l.]: Blucher, 2006. 533 p.

OROZCO-HENAO, C. et al. Active distribution network fault location methodology: A minimum fault reactance and fibonacci search approach. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 84, p. 232–241, 2017.

PELLEGRINI, F. R.; FOGLIATTO, F. S. Passos para implantação de sistemas de previsão de demanda - técnicas e estudo de caso. **Revista PRODUÇÃO**, v. 11, n. 1, p. 43–64, 2001.

PERRIER, N. et al. A survey of models and algorithms for emergency response logistics in electric distribution systems. part i: Reliability planning with fault considerations. v. 40, n. 1, p. 1895–1906, 2013.

_____. A survey of models and algorithms for emergency response logistics in electric distribution systems. part ii: Contingency planning level. **Computers Operations Research**, v. 40, 2013.

PETITE, F. S. V.; SANTOS, R. C. dos; ASANO, P. T. L. A scheme based on anns for single-phase fault location in ds with gd. In: 2017 IEEE MANCHESTER POWERTECH. [S.l.]: IEEE, 2017.

REICHL, J.; SCHMIDINGER, S.; SCHMIDTHALER, M. The interdependencies of electricity market regulation and supply security. In: 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 2013. [S.l.]: IET, 2013. p. 10–13.

ROSENDO, J. et al. Evaluation and improvement of supply reliability indices for distribution networks. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION. [S.l.]: IEEE/PES, 2008.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9–26, 1990.

_____. The analytic hierarchy and analytic network measurement processes: Applications to decision under risk. **European Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 1, n. 1, p. 122–196, 2008.

_____. **Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World**. 3th. ed. [S.l.]: RWS Publications, 2012. ISBN 096203178x.

SCHMITZ, M. et al. Resource planning to service restoration in power distribution systems. In: VOLOSENCU, C. (Ed.). **System Reliability**. IntechOpen, 2017. cap. 17, p. 317 – 334. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/system-reliability/resource-planning-to-service-restoration-in-power-distribution-systems>>.

SINGHEE, A. et al. Opro : Precise emergency preparedness for electric utilities. **IBM Journal of Research and Development**, v. 60, n. 1, p. 1–15, 2016.

SPEDDING, T. A.; CHAN, K. K. Forecasting demand and inventory management using bayesian time series. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 11, n. 5, p. 311–339, 2000.

TARAPANOFF, K. **Técnicas para Tomada de Decisão nos Sistemas de Informação**. 2. ed. [S.l.]: Thesaurus, 1995. 163 p.

TIRAPONG, K.; TITTI, S. Reliability improvement of distribution system using reliability centered maintenance. In: 2014 IEEE PES T&D CONFERENCE AND EXPOSITION, 2014, Chicago, IL, USA. [S.l.]: IEEE, 2014. p. 0–4.

TUNG, R. Dimensions of organizational environments. **Academy of Management Journal**, n. 22, p. 672–693, 1979.

VACCARO, G. L. R.; MARTINS, J. C.; MENEZES, T. M. Análise estatística da qualidade de níveis de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. **Produção**, v. 21, n. 3, p. 539–552, 2011.

WANG, J. et al. Research on an integrated methodology of the dynamic performance and reliability evaluation. In: **9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety**. [S.l.]: ICRMS 2011, 2011. p. 122–128.

WANG, J.-J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 1, n. 13, p. 2263–2278, 2009.

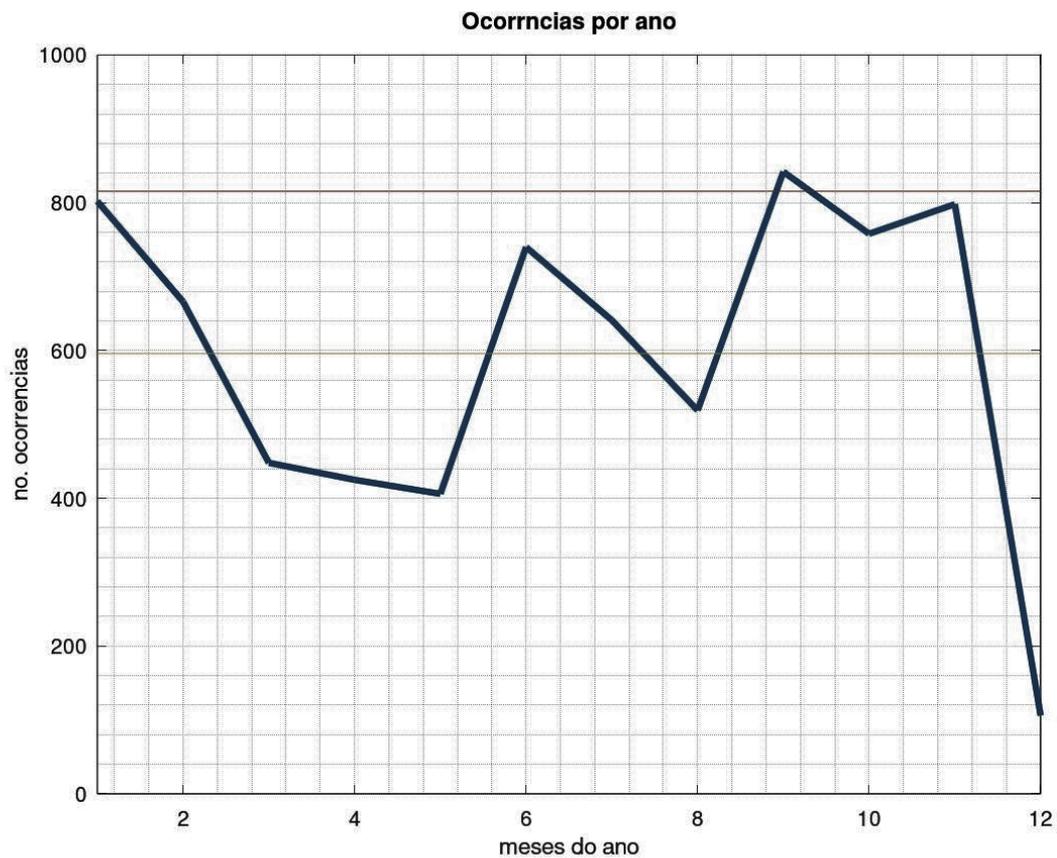
ĆURČIĆ, S. et al. Electric power distribution network restoration: a survey of papers and a review of the restoration problem. **Electric Power Systems Research**, v. 35, n. 2, p. 73–86, 1995.

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTOCÁSTICA ANUAL

Os gráficos apresentados neste apêndice foram desenvolvidos a partir da soma das ocorrências de cada mês e ano da amostra estudada. Também constituem as imagens as médias (linhas amarelas) e o desvio padrão superior da amostra (linhas vermelhas) para cada um dos anos apresentados e estudados.

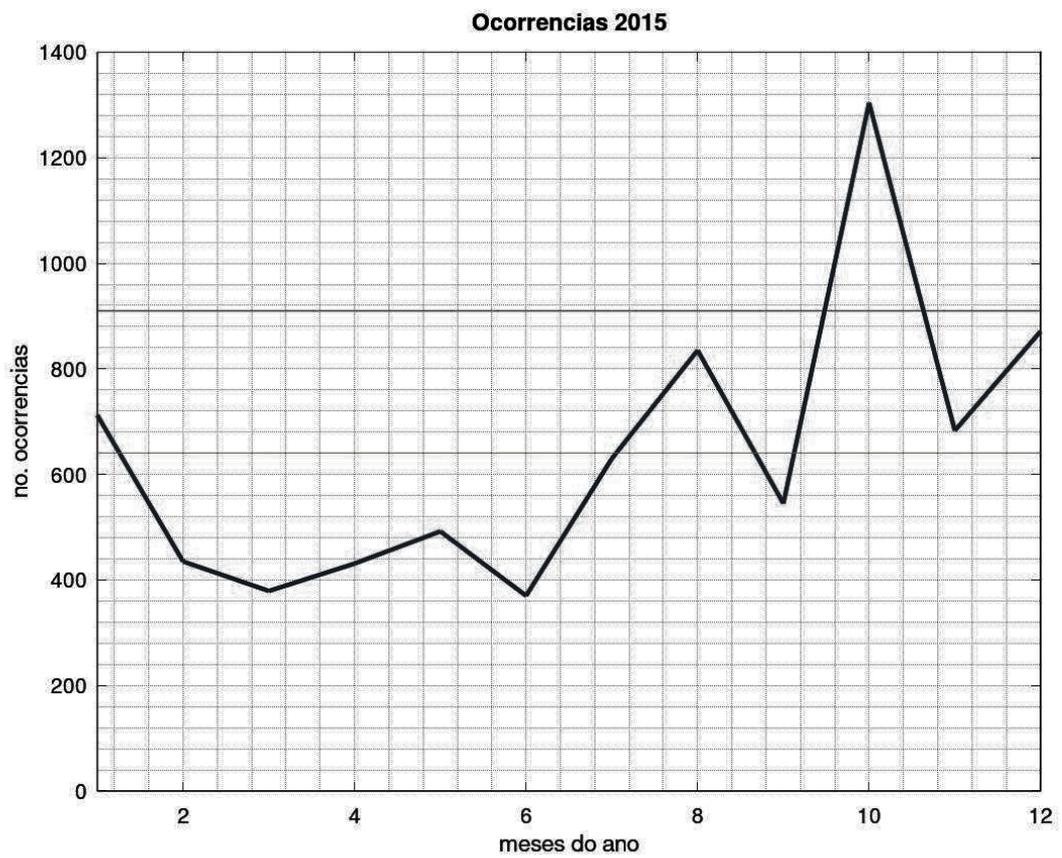
Os dados que compõem a amostra foram apresentados nesta dissertação na Tabela 5.1. da seção 5.1. deste documento.

Figura A.1 – Ocorrências de 2014



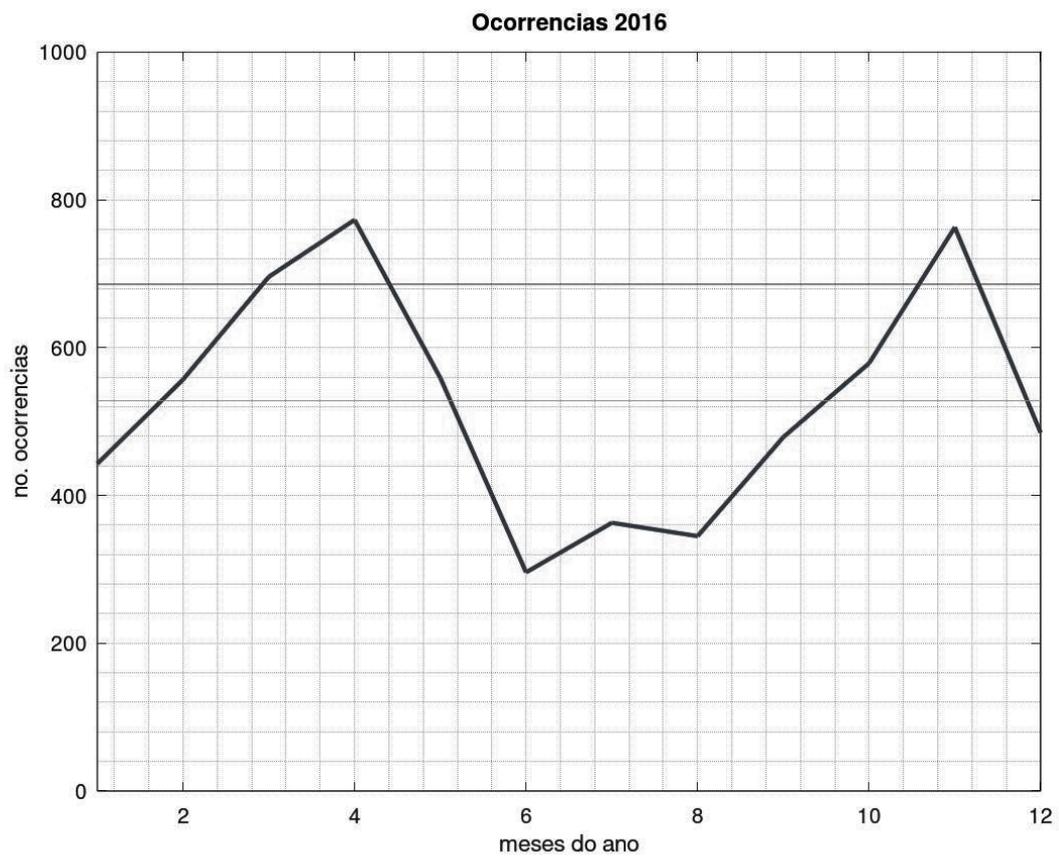
Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura A.2 – Ocorrências de 2015



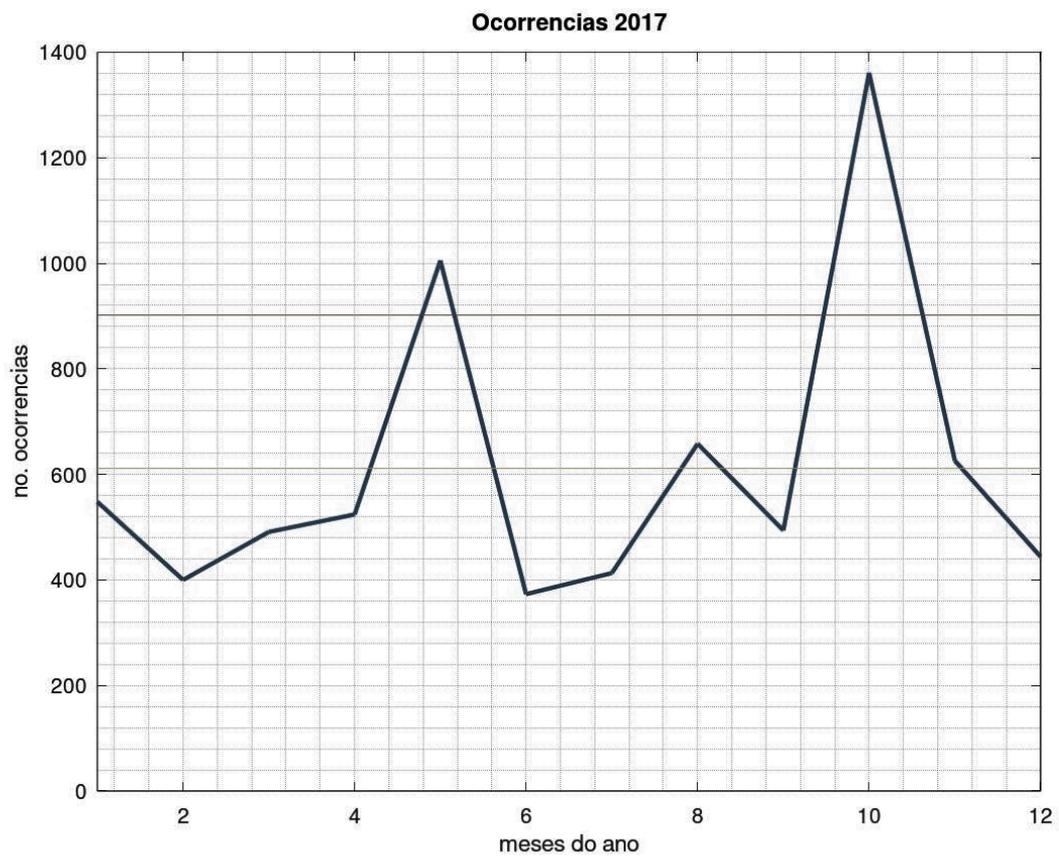
Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura A.3 – Ocorrências de 2016



Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura A.4 – Ocorrências de 2017



Fonte: desenvolvido pela autora.

APÊNDICE B – MAPAS DE OCORRÊNCIA

Figura B.1 – Mapa de ocorrência da quantidade de clientes afetados para particionamento de 1km

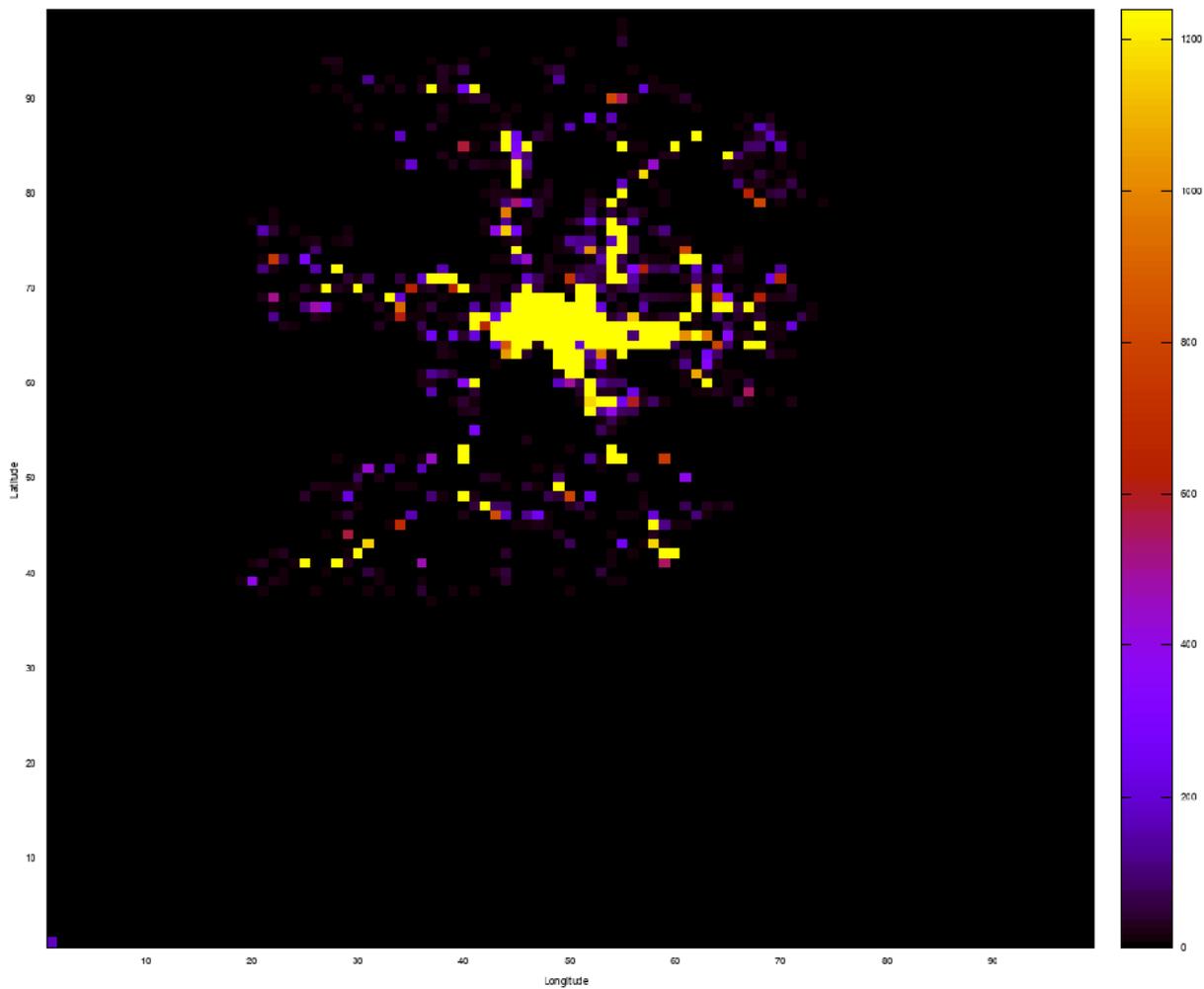


Figura B.2 – Mapa de ocorrência do DEC para particionamento de 1km

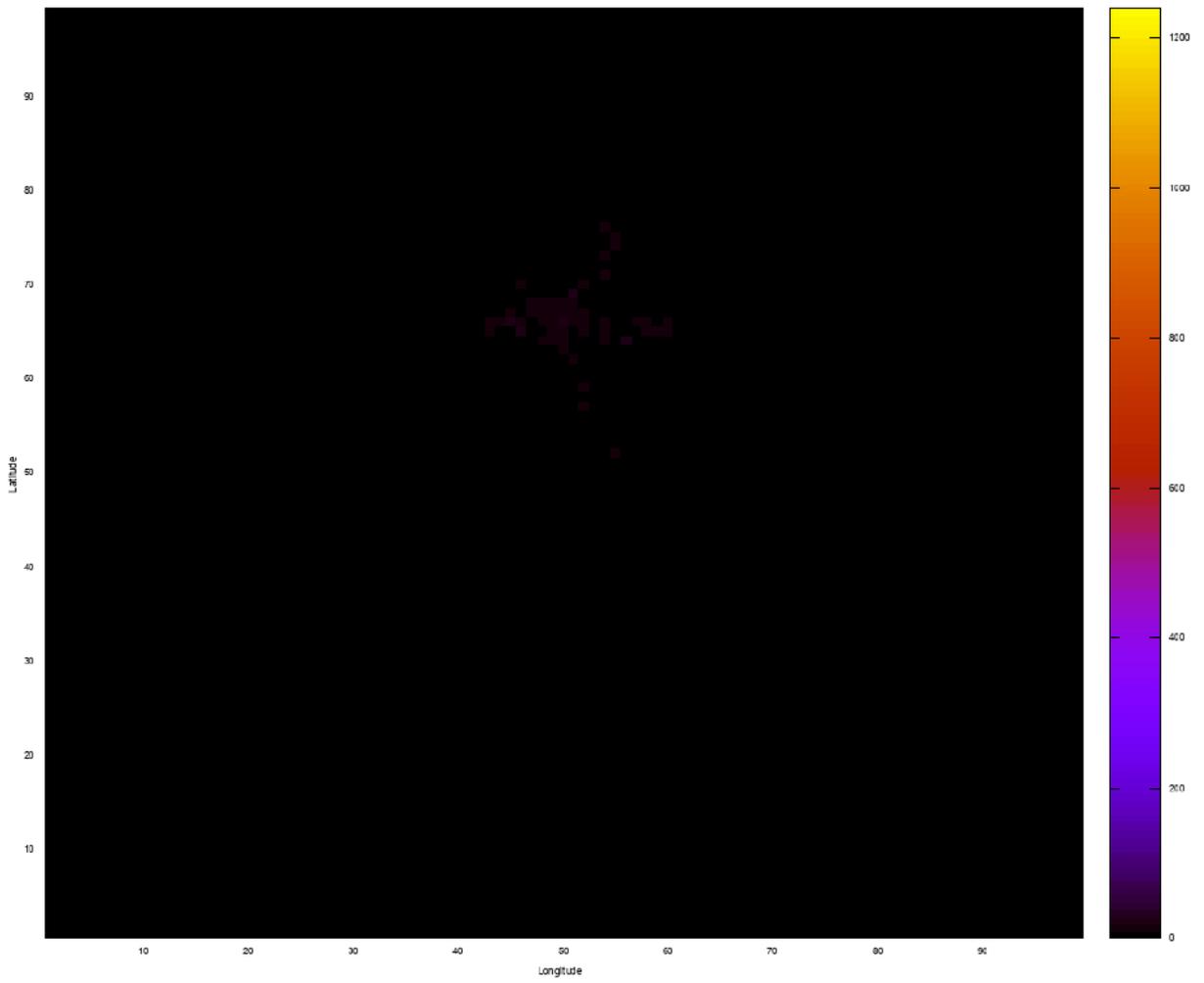


Figura B.3 – Mapa de ocorrência do FEC para particionamento de 1km

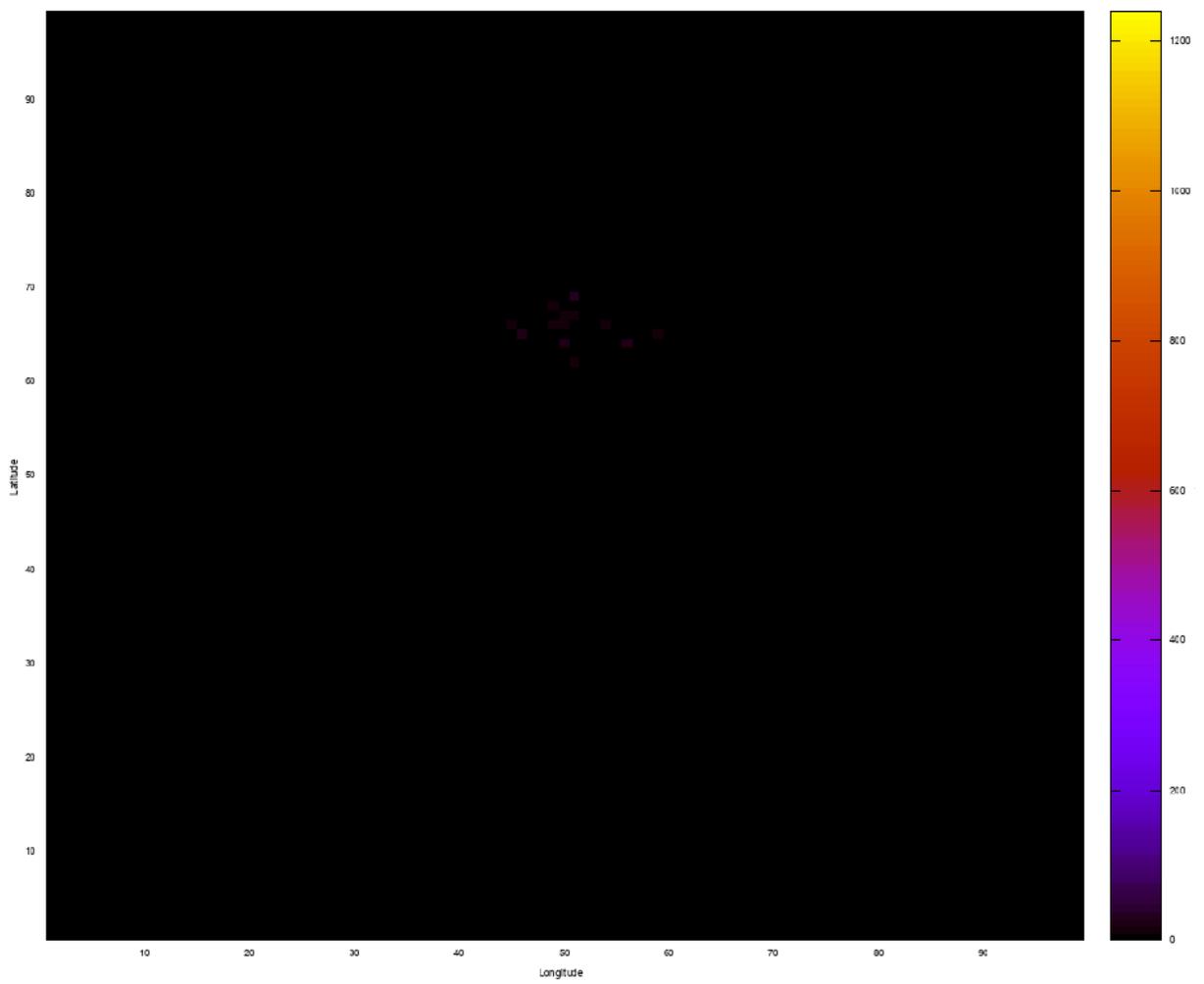


Figura B.4 – Mapa de ocorrência do Tempo de Interrupção para particionamento de 1km

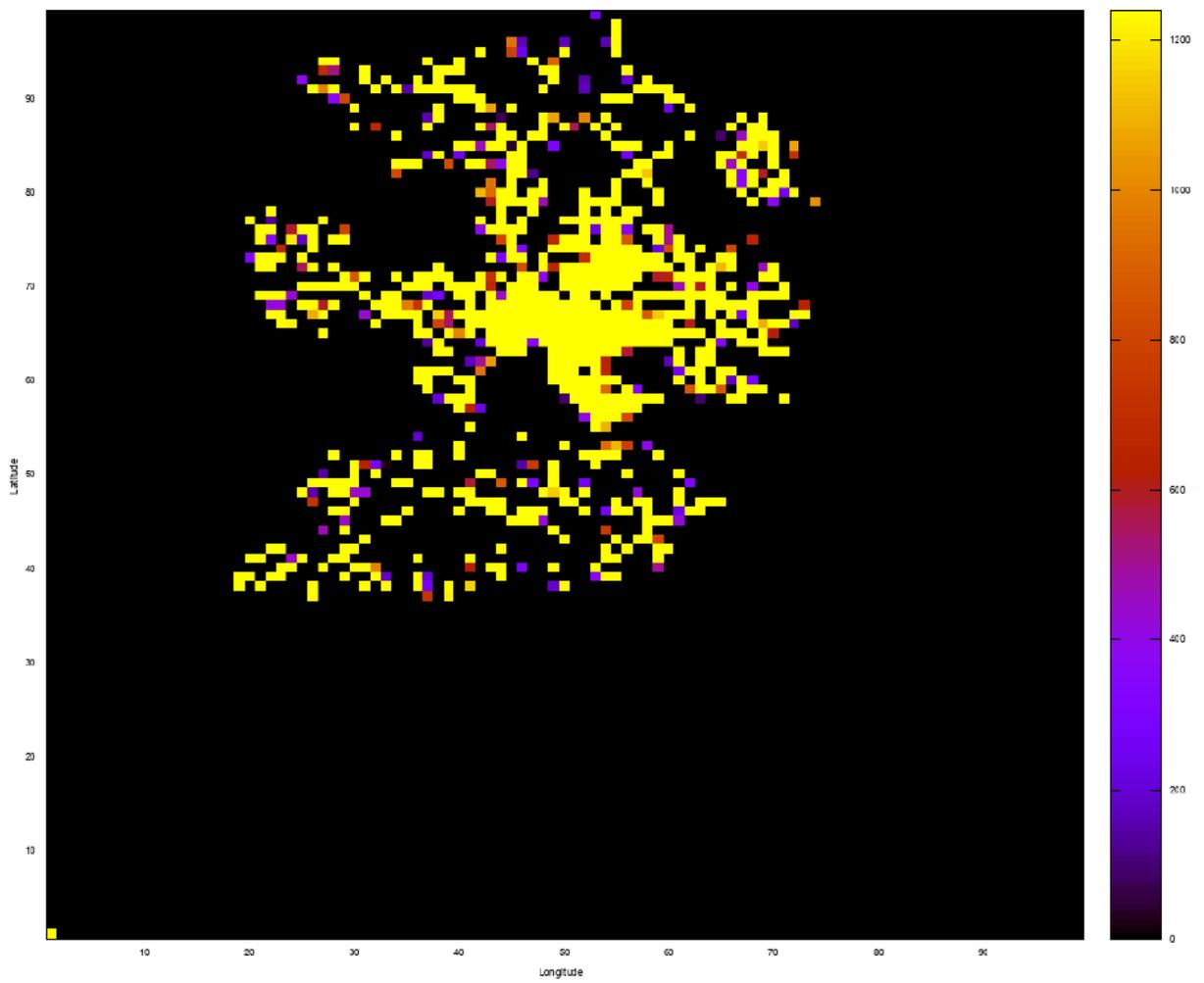


Figura B.5 – Mapa de ocorrência do Tempo de Serviço para particionamento de 1km

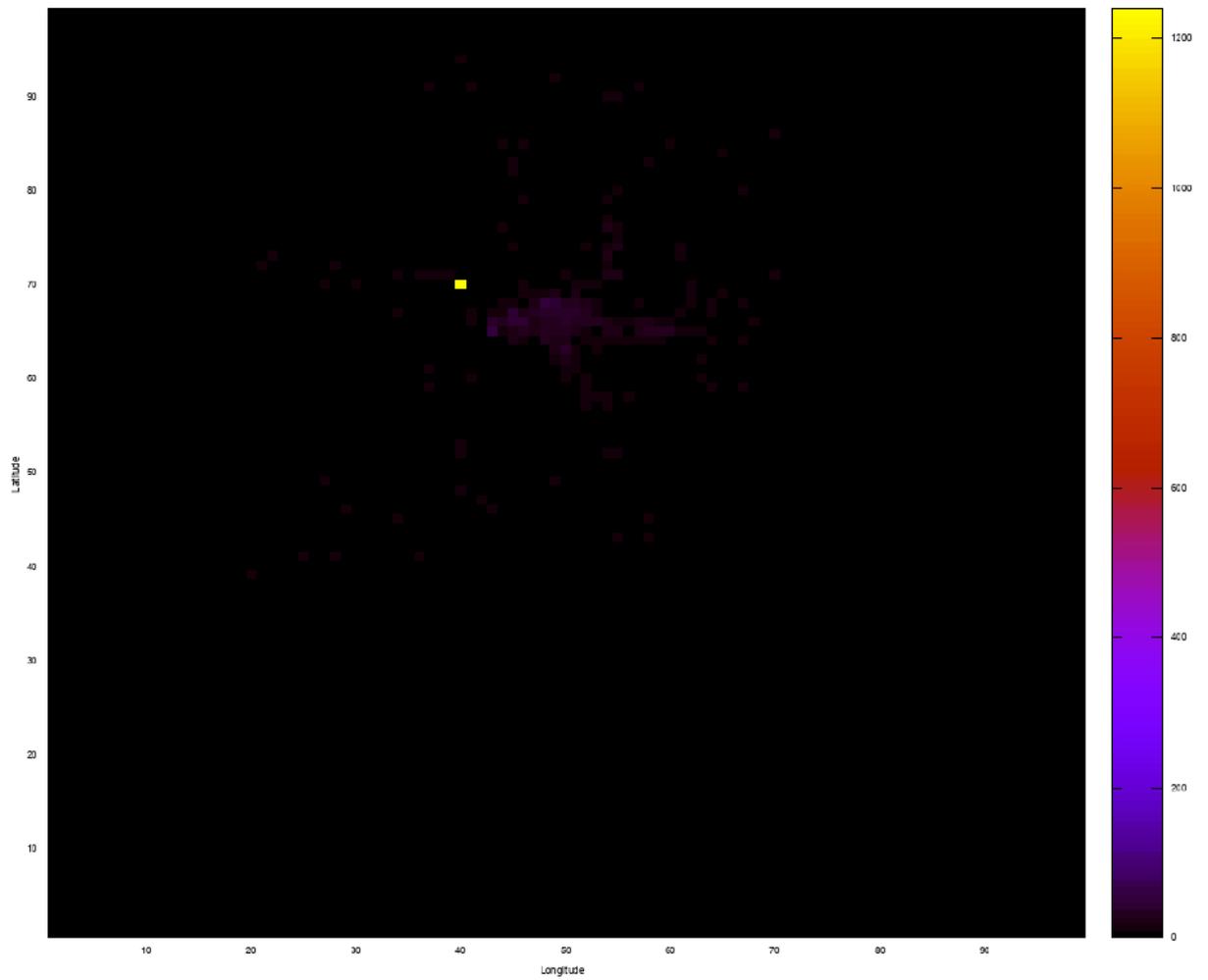


Figura B.6 – Mapa de ocorrência da quantidade de clientes afetados para particionamento de 5km

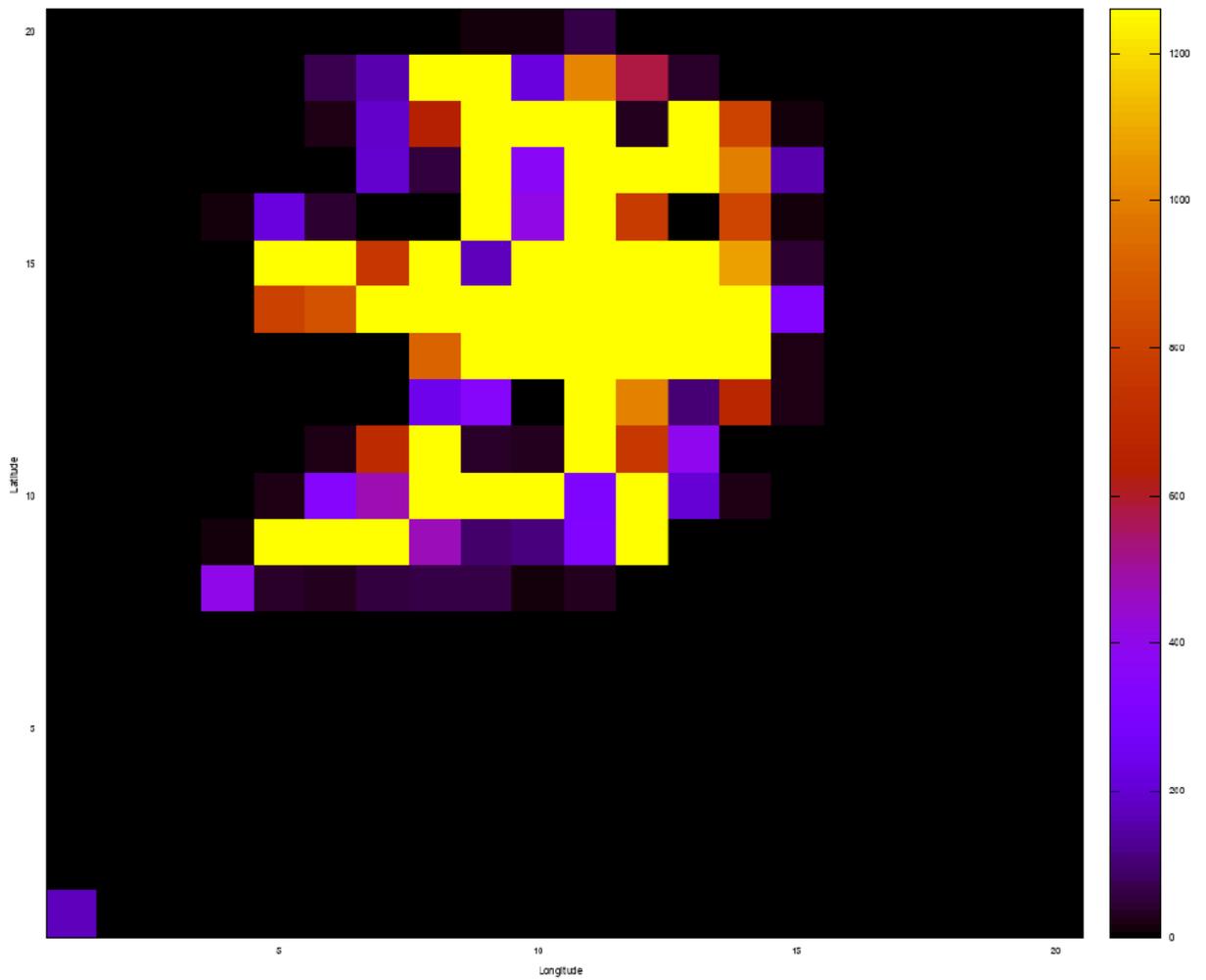


Figura B.7 – Mapa de ocorrência do DEC para particionamento de 5km

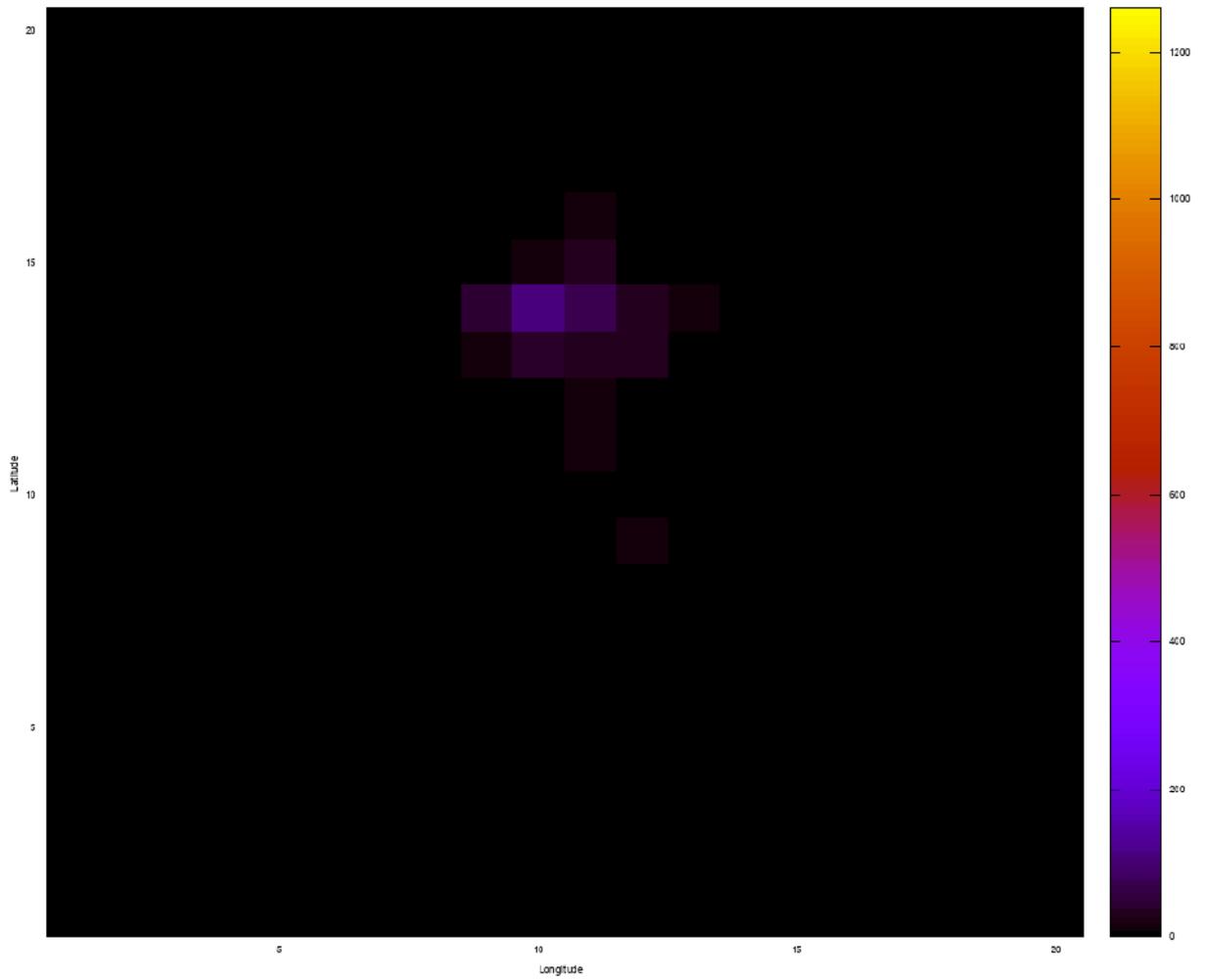


Figura B.8 – Mapa de ocorrência do FEC para particionamento de 5km

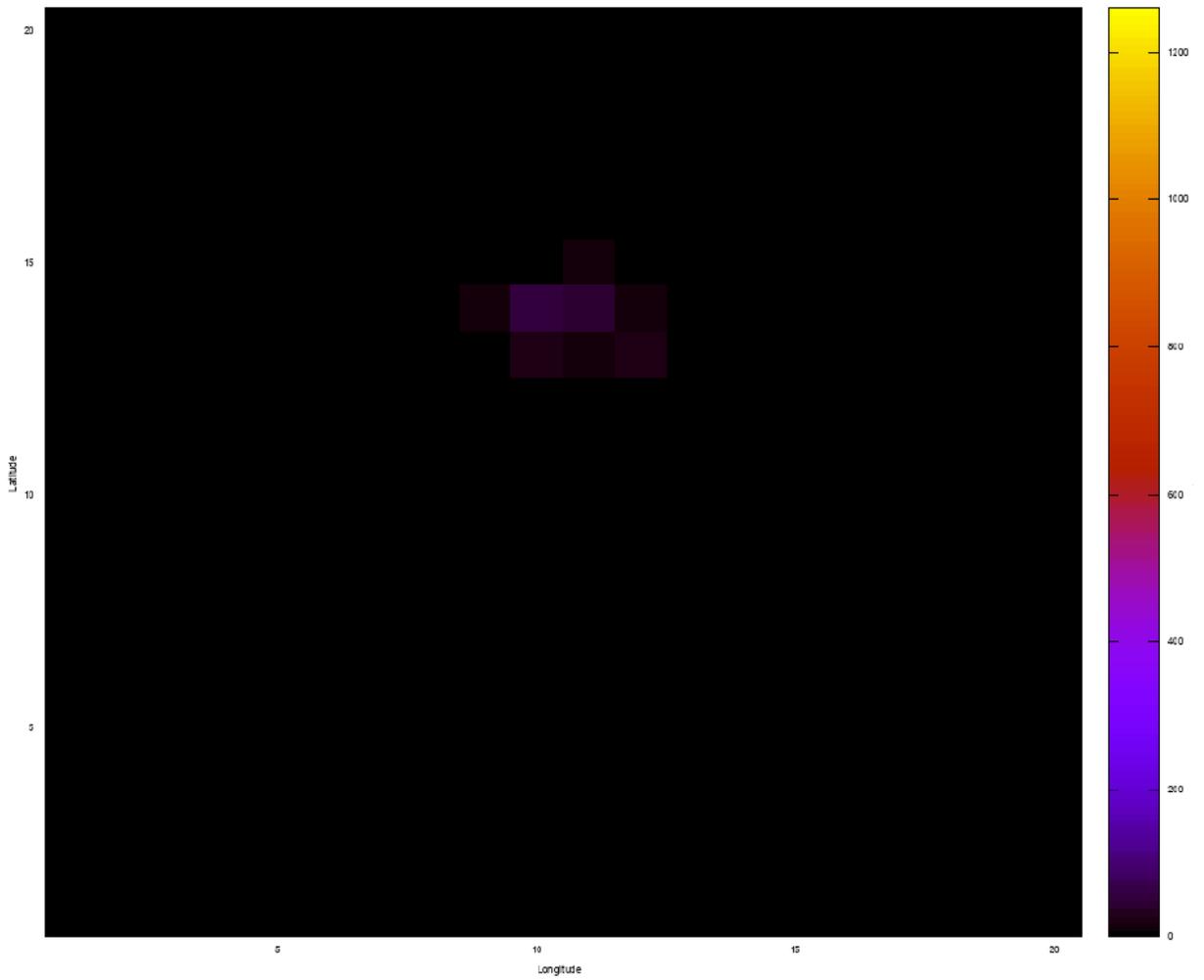


Figura B.9 – Mapa de ocorrência do Tempo de Interrupção para particionamento de 5km

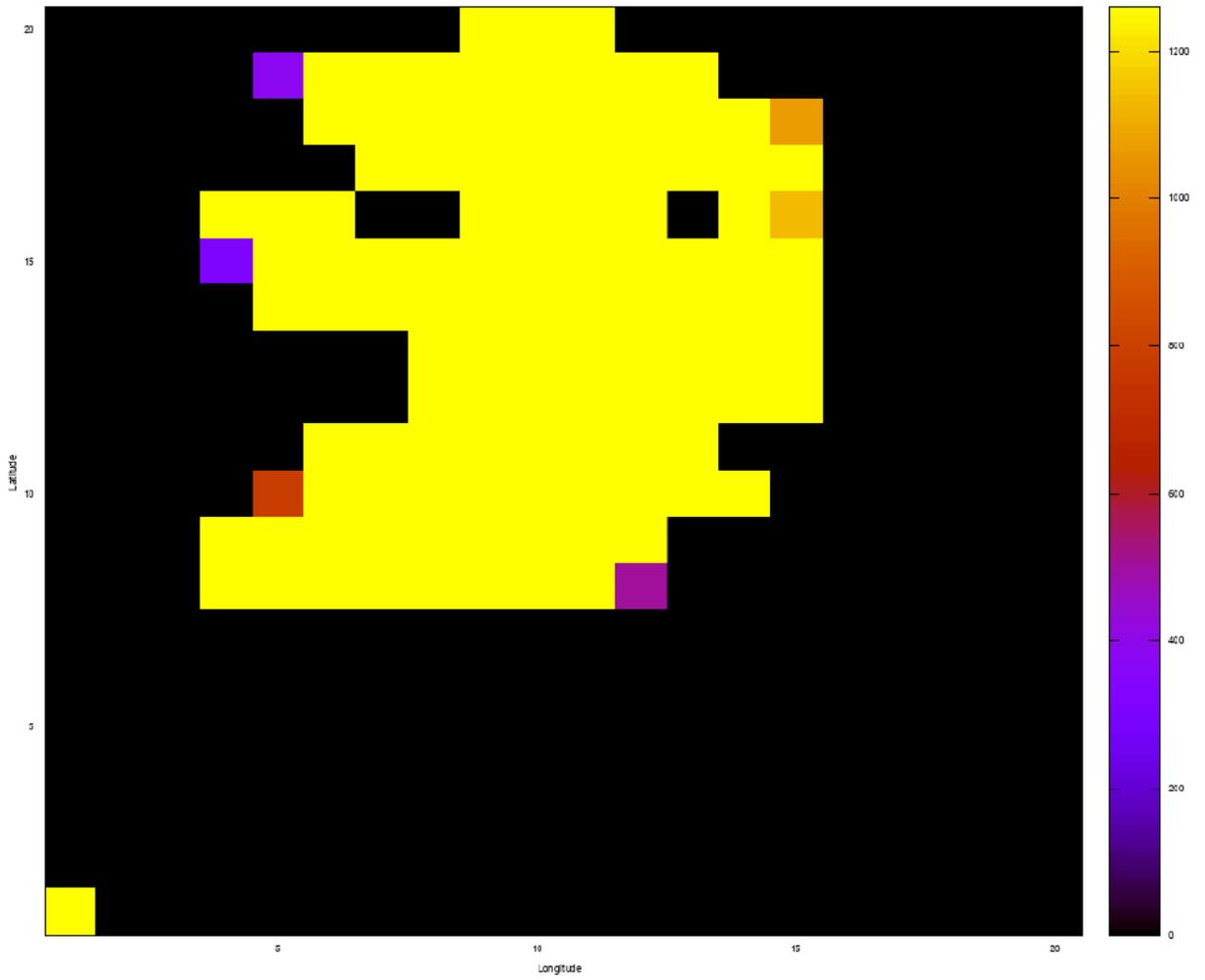


Figura B.10 – Mapa de ocorrência do Tempo de Serviço para particionamento de 5km

