

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

André Ross Borniatti

**ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA RECLASSIFICAÇÃO DE
CONJUNTOS DE CONSUMIDORES CONSIDERANDO QUALIDADE
DO SERVIÇO E COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS**

Santa Maria, RS
2023

André Ross Borniatti

**ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA RECLASSIFICAÇÃO DE CONJUNTOS DE
CONSUMIDORES CONSIDERANDO QUALIDADE DO SERVIÇO E
COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para o título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia

Santa Maria, RS
2023

Borniatti, André Ross

ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA RECLASSIFICAÇÃO DE
CONJUNTOS DE CONSUMIDORES CONSIDERANDO QUALIDADE DO
SERVIÇO E COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS / André Ross

Borniatti.- 2023.

91 p.; 30 cm

Orientador: Vinícius Jacques Garcia

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2023

1. Indicadores de continuidade 2. Qualidade do serviço
3. Compensações financeiras 4. Conjuntos de Unidades
Consumidoras 5. Subestações I. Garcia, Vinícius Jacques
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, ANDRÉ ROSS BORNIAATTI, 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.

André Ross Borniatti

**ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA RECLASSIFICAÇÃO DE CONJUNTOS DE
CONSUMIDORES CONSIDERANDO QUALIDADE DO SERVIÇO E
COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para o título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 27 de fevereiro de 2023:

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

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)
Por videoconferência

Paulo Ricardo da Silva Pereira, Dr. (UNISINOS)
Por videoconferência

Santa Maria, RS
2023

Dedico este trabalho à minha esposa
Fernanda e ao meu filho Pedro.
Também ao Nono “Angelin”, que nos
deixou no início desta caminhada

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à minha esposa Fernanda, por todo o apoio e paciência durante essa caminhada. Por compreender e também por me ajudar a entender, que a minha ausência se fazia necessária em alguns momentos, mas que seria por um determinado tempo. Sem você, com certeza tudo teria sido muito mais complicado. Você é uma pessoa incrível e admirável!

Ao meu filho Pedro, o qual tive de abdicar de diversos momentos e brincadeiras, tenho ciência que estes momentos não voltam e logo você vai crescer e não vai querer tanto assim a minha companhia, porém era um desafio a ser vencido. Agora vamos poder aproveitar mais ainda.

À minha família, pai Gilberto e mãe Sirlei, irmãos Sabrina e Gabriel, pelos ensinamentos referentes ao caráter, humildade e dedicação. Ter crescido num bom ambiente familiar e poder contar com vocês, é um facilitador em diversas etapas da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Vinícius Jacques Garcia, pela parceria e toda dedicação durante o período de orientação, não medindo esforços para direcionar o meu trabalho da melhor forma possível.

Aos Professores Daniel Pinheiro Bernardon e Paulo Ricardo da Silva Pereira, pela disponibilidade em participar da Comissão Examinadora da minha defesa e pelas valiosas considerações.

À Prof.^a Laura Lisiane Callai dos Santos e ao Prof. Nelson Knak Neto, por todas as contribuições no decorrer do trabalho, principalmente no início desta jornada.

Aos amigos e colegas: Bruno Hammerschmitt, Felipe Lucchese, Leonardo Fontoura, Robson Delavechia, Thiago Gomes e Wanderson Lombardy pelas conversas, dicas e todo o incentivo durante a realização do curso de mestrado.

À família da minha esposa, em especial ao Sr. Érico Machado, pelas palavras de incentivo e confiança que eu conseguiria concluir esta etapa.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de realizar essa qualificação de forma gratuita e com excelência. À Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) pela disponibilidade e eficiência.

RESUMO

ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA RECLASSIFICAÇÃO DE CONJUNTOS DE CONSUMIDORES CONSIDERANDO QUALIDADE DO SERVIÇO E COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS

AUTOR: André Ross Borniatti
ORIENTADOR: Vinícius Jacques Garcia

A regulação no serviço público de distribuição de energia elétrica considera indicadores de qualidade e continuidade, constantes no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Particularmente quanto à qualidade do serviço são definidos os indicadores de continuidade coletivos, Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), além dos indicadores de continuidade individuais que tratam sobre a interrupção por unidade consumidora, quanto à duração (DIC), frequência (FIC), duração máxima (DMIC) e ocorrida em dia crítico (DICRI). Cada um destes indicadores individuais tem um valor estabelecido como limite, que se caso ultrapassado, incide em compensação financeira a ser creditada diretamente na fatura dos consumidores. Dessa forma, este trabalho apresenta uma metodologia, aplicada em um algoritmo desenvolvido para a análise dos impactos nos indicadores e compensações financeiras com alteração da configuração dos atuais conjuntos de consumidores de uma concessionária, baseada no critério de contiguidade. Para aplicação da metodologia, inicialmente cada subestação é considerada como sendo um conjunto. Foram utilizados dados reais de histórico de consumidores, período de 2017 a 2020, sendo a área de estudo composta por quatro conjuntos e cinco subestações, onde são propostas 43 configurações, divididas em 5 cenários. As novas configurações propostas resultaram em uma redução de 1,80% no valor de compensações financeiras, referentes aos indicadores DIC, FIC e DMIC, período mensal. Além de redução de 45% no DEC e 26% no FEC, para os quatro anos em estudo. Destaca-se a possibilidade de ganhos futuros, realizando uma reconfiguração de conjuntos, sem necessidade de investimento.

Palavras-chave: Indicadores de continuidade. Qualidade do serviço. Compensações financeiras. Conjuntos de Unidades Consumidoras. Subestações.

ABSTRACT

HEURISTIC APPROACH FOR RECLASSIFICATION OF CONSUMER SETS CONSIDERING SERVICE QUALITY AND FINANCIAL COMPENSATIONS

AUTHOR: André Ross Borniatti
ADVISOR: Vinícius Jacques Garcia

The regulation in the public electric energy distribution service considers quality and continuity indicators, presented in Module 8 of the Electric Energy Distribution Procedures in the National Electric System (PRODIST), established by the National Electric Energy Agency (ANEEL). Collective continuity indicators are defined for measuring the distribution quality services, such as: System Average Interruption Duration Index (SAIDI) and System Average Interruption Frequency Index (SAIFI). Also, there are several individual indicators of continuity that deal with the single consumer unit interruption, such as: duration (CAIDI) and frequency (CAIFI). Each of these individual indicators has a established limit value, which, if exceeded, results in financial compensation by the utility directly to the consumer units. In this way, this paper presents a methodology applied in an algorithm developed with the purpose of analyzing these indicators impacts along with their financial compensation for modified configuration of the current sets of consumer units of an energy utility, based on the contiguity criteria. For the development and application of the methodology, initially each substation is considered as a unit of consumers combined. Real consumer history data were used, from 2017 to 2020, with the study area consisting of four sets and five substations, where 43 configurations are proposed, divided into 5 scenarios. The new proposed configurations resulted in a reduction of 1.80% in the total amount of financial compensation, referring to the indicators CAIDI and CAIFI, monthly period. In addition to a 45% reduction in the SAIDI and 26% in the SAIFI, for the four years under study. Meaning there is a possibility of future gains by carrying out a reconfiguration of sets without the requiring investment in the grid system.

Keywords: Continuity and quality indicators. Financial compensation. Substation reconfiguration method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Valores de compensações financeiras no Brasil - 2014 a 2021.....	17
Figura 2 - Combinações de Nível de Tensão e Localização para as Tabelas do PRODIST	30
Figura 3 - Exemplo de UC para definição de limites dos indicadores individuais.....	31
Figura 4 - Valores de compensações financeiras de uma concessionária - 2015 a 2019	33
Figura 5 - Discriminação de valores de compensações financeiras - 2015 a 2019	33
Figura 6 - Fluxograma da metodologia proposta para o cálculo das compensações e indicadores	36
Figura 7 - Mapa genérico para quatro conjuntos e cinco subestações	40
Figura 8 - Fluxograma com estrutura de algoritmo para cálculo das compensações, período mensal.....	44
Figura 9 - Função para definição do cenário de cada UC - Matlab	45
Figura 10 - Função para leitura do nível de tensão de cada UC - Matlab	46
Figura 11 - Função para leitura da localização de cada UC - Matlab.....	46
Figura 12 - Área de concessão da concessionária em estudo	48
Figura 13 - Representação geográfica dos conjuntos em estudo	49
Figura 14 - Representação geográfica das subestações em estudo.....	49
Figura 15 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 2 conjuntos	61
Figura 16 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 3 conjuntos	63
Figura 17 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 4 conjuntos	65
Figura 18 - Representação da melhor configuração de cada cenário - Compensações Financeiras	74
Figura 19 - Representação da melhor configuração de cada cenário – DEC médio.	75
Figura 20 - Representação da melhor configuração de cada cenário – FEC médio .	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Módulos do PRODIST	21
Tabela 2 - Dados de entrada e variáveis do modelo não-linear proposto	38
Tabela 3 - Exemplo de aplicação de matriz de contiguidade	41
Tabela 4 - Exemplo de definição de limites anuais de DEC e FEC para uma nova configuração	42
Tabela 5 - Cenários conforme combinações de Nível de Tensão e Localização das UCs.....	47
Tabela 6 - Descrição dos dados disponibilizado pela concessionária em estudo	50
Tabela 7 - Tratamento de dados dos históricos de consumidores	51
Tabela 8 - Número de UCs vinculadas às subestações e conjuntos, dados disponibilizados	51
Tabela 9 - Número de UCs vinculadas às subestações e conjuntos, dados normalizados	52
Tabela 10 - Valores de compensação mensal – anos de 2017, 2018 e 2019.....	53
Tabela 11 - Possibilidade de configuração, considerando 1 conjunto.....	54
Tabela 12 - Possibilidades de configurações, considerando 2 conjuntos	55
Tabela 13 - Possibilidades de configurações, considerando 3 conjuntos	56
Tabela 14 - Possibilidades de configurações, considerando 4 conjuntos	57
Tabela 15 - Possibilidade de configuração, considerando 5 conjuntos	57
Tabela 16 - Valores anuais de compensações financeiras considerando a configuração original	59
Tabela 17 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 1 conjunto.....	59
Tabela 18 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 2 conjuntos	60
Tabela 19 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 3 conjuntos	62
Tabela 20 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 4 conjuntos	64
Tabela 21 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 5 conjuntos	65
Tabela 22 - Valores anuais de DEC e FEC, configuração original	66
Tabela 23 - Valores anuais de DEC médio considerando 1 conjunto	66
Tabela 24 - Valores anuais de FEC médio considerando 1 conjunto.....	67
Tabela 25 - Valores anuais de DEC médio considerando 2 conjuntos.....	67
Tabela 26 - Valores anuais de FEC médio considerando 2 conjuntos	68
Tabela 27 - Valores anuais de DEC médio considerando 3 conjuntos.....	69
Tabela 28 - Valores anuais de FEC médio considerando 3 conjuntos	70
Tabela 29 - Valores anuais de DEC médio considerando 4 conjuntos.....	71
Tabela 30 - Valores anuais de FEC médio considerando 4 conjuntos	71
Tabela 31 - Valores anuais de DEC médio considerando 5 conjuntos.....	72

Tabela 32 - Valores anuais de FEC médio considerando 5 conjuntos	72
Tabela 33 - Melhores configurações de cada Cenário, Compensações Financeiras	73
Tabela 34 - Melhores configurações de cada Cenário, DEC Médio	75
Tabela 35 - Melhores configurações de cada Cenário, FEC Médio	76
Tabela 36 - Ordenação das melhores configurações considerando as compensações financeiras	78
Tabela 37 - Melhores configurações considerando as compensações financeiras, DEC e FEC.....	79
Tabela 38 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2017	81
Tabela 39 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2018	82
Tabela 40 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2019	82
Tabela 41 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2020	83
Tabela 42 - Comparação de valores de compensações financeiras por ano	83
Tabela 43 - Comparação de valores de DEC e FEC médios por ano	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDGD	Base de Dados Geográficos da Distribuidora
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
EUSD	Encargos do Uso de Sistema de Distribuição
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
<i>kei</i>	Fator de majoração
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SUB1	Subestação SUB1 – pertencente ao conjunto CONJ1
SUB2	Subestação SUB2 – pertencente ao conjunto CONJ2
SUB3	Subestação SUB3 – pertencente ao conjunto CONJ3
SUB4	Subestação SUB4 – pertencente ao conjunto CONJ4
SUB5	Subestação SUB5 – pertencente ao conjunto CONJ2
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SED	Subestação de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UC	Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST	20
2.2	FORMAÇÃO DE CONJUNTOS	22
2.3	INDICADORES DE CONTINUIDADE	25
2.3.1	Indicadores de Continuidade Coletivos	26
2.3.2	Indicadores de Continuidade Individuais	26
2.4	PROCESSO DE CÁLCULO DAS COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS	28
3	METODOLOGIA PROPOSTA	35
3.1	MODELO NÃO-LINEAR PROPOSTO	37
3.2	CRITÉRIO DE CONTIGUIDADE DE ÁREAS	40
3.3	DEFINIÇÃO DE LIMITES DOS INDICADORES COLETIVOS PARA OS NOVOS CONJUNTOS	42
3.4	MODELAGEM DO PROCESSO DE CÁLCULO DAS COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS	43
4	ESTUDO DE CASO	48
4.1	LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS	50
4.2	VALIDAÇÃO DE CÁLCULO COM SUBESTAÇÕES	52
4.3	MATRIZ DE CONTIGUIDADE: CONFIGURAÇÕES PARA CADA CENÁRIO	53
4.3.1	Cenário 1: Configuração considerando 1 conjunto	54
4.3.2	Cenário 2: Configurações considerando 2 conjuntos	54
4.3.3	Cenário 3: Configurações considerando 3 conjuntos	55
4.3.4	Cenário 4: Configurações considerando 4 conjuntos	56
4.3.5	Cenário 5: Configuração considerando 5 conjuntos	57
5	RESULTADOS	59
5.1	COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS	59
5.1.1	Cenário 1	59
5.1.2	Cenário 2	60
5.1.3	Cenário 3	61
5.1.4	Cenário 4	63
5.1.5	Cenário 5	65
5.2	INDICADORES COLETIVOS DEC e FEC	66
5.2.1	Cenário 1	66
5.2.2	Cenário 2	67
5.2.3	Cenário 3	69

5.2.4	Cenário 4	71
5.2.5	Cenário 5	72
5.3	SÍNTESE DOS RESULTADOS: MELHORES CONFIGURAÇÕES	73
5.3.1	Compensações Financeiras	73
5.3.2	DEC Médio e FEC Médio	75
5.3.3	Seleção das melhores Configurações	77
5.4	RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A MELHOR CONFIGURAÇÃO	80
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6.1	TRABALHOS FUTUROS	86
6.2	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com área territorial de 8.510.345,540 km², população estimada de 214 milhões de habitantes, com 26 estados mais o Distrito Federal, totalizando aproximadamente 5.572 municípios (IBGE, 2021), conta com um grande e complexo Sistema Elétrico de Potência (SEP) para atendimento da demanda por eletricidade.

Dentro do panorama histórico do setor elétrico brasileiro, tem-se que a consolidação do SEP para atendimento aos consumidores iniciou pelas grandes usinas de geração de energia, depois transmissão de energia a longas distâncias até chegar no âmbito dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Em 2018, contabilizou-se que o Brasil possuía

105 distribuidoras de energia elétrica, sendo 54 concessionárias e 38 permissionárias, além de 13 cooperativas de eletrização rural, que atuam sob autorização precária e estão em processo de regularização para serem concessionárias ou permissionárias (ANEEL, 2018).

A energia elétrica possibilita a realização de diversas atividades, desde as mais simples, até as mais complexas. Por isto, além do fornecimento de energia elétrica é importante que este serviço seja realizado com a melhor qualidade possível, de forma a atender os consumidores finais. De acordo com Barbosa (2018) “o desempenho dos serviços prestados pelas distribuidoras pode ser avaliado de duas formas: por meio de pesquisas de opinião com os consumidores ou por meio da apuração de indicadores”.

Para um serviço de fornecimento de energia elétrica obter sucesso, um dos critérios é que ele seja contínuo. Porém, a ocorrência de interrupções do fornecimento aos consumidores finais, compromete significativamente as condições operacionais e econômicas das concessionárias de energia elétrica (PEYGHAMI et al., 2020).

O desempenho das concessionárias é avaliado conforme o nível de continuidade do fornecimento de energia elétrica, sendo que este serviço é regulado por entidades que normatizam e padronizam as normas técnicas pertinentes, de modo a garantir que os consumidores recebam um serviço com um nível de qualidade aceitável (DETRICH et al., 2006).

De forma a regular a qualidade do serviço público de distribuição de energia elétrica no Brasil, são considerados indicadores de qualidade e continuidade,

constantes nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), o qual contém 11 módulos e são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica” (ANEEL, 2016).

Especificamente no Módulo 8, que trata dos procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica, tem-se uma divisão em três seções referentes à Qualidade do Produto (seção 8.1), à Qualidade do Serviço (seção 8.2) e à Qualidade no tratamento de reclamações (seção 8.3) (ANEEL, 2020).

Particularmente quanto à qualidade do serviço, na seção 8.2 do Módulo 8 do PRODIST são definidos os indicadores de continuidade coletivos: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC).

Estes indicadores de continuidade possuem limites anuais atribuídos a cada conjunto de unidades consumidoras. Os conjuntos de unidades consumidoras são definidos pelas concessionárias, respeitando critérios definidos no Módulo 8 do PRODIST, quanto ao número de unidades consumidoras e áreas de contiguidade.

Também na seção 8.2 são definidos os indicadores de continuidade individuais, que são: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC), Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC), Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC) e Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI). Destaca-se que são consideradas como interrupções apenas as de longa duração, sendo aquelas iguais ou superior a três minutos.

Os limites dos indicadores de continuidade individuais são considerados para os períodos mensais, trimestrais e anuais, caso violados implicam em compensação financeira a ser creditada às Unidades Consumidoras (UCs), diretamente na fatura, com prazo máximo de dois meses subsequentes ao mês de referência da violação (ANEEL, 2021).

Esta regulação imposta pela ANEEL, sugerida através da Resolução ANEEL n. 24/2000, estimula a competitividade entre as concessionárias do País, visto que são comparadas entre si através dos indicadores de continuidade que medem o nível de qualidade do fornecimento e continuidade na prestação do serviço de distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras (PESSANHA et al. 2005).

O presente estudo pretende realizar um diagnóstico de desempenho de configurações de conjuntos de unidades consumidoras de uma concessionária de energia elétrica, a partir da validação do atual processo de cálculo das compensações financeiras. Serão analisados quais os impactos nos indicadores e compensações financeiras através da proposta de novos cenários e configurações considerando os atuais conjuntos de unidades consumidoras.

Para tanto, inicialmente cada subestação é considerada como sendo um conjunto, possibilitando o desenvolvimento de uma metodologia baseada em simulação computacional, propondo novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras, de acordo com o cenário definido.

A metodologia possibilitará a verificação da configuração que apresenta maior redução nos valores referentes às compensações financeiras e indicadores coletivos DEC e FEC. Neste estudo foram utilizados dados reais disponibilizados por um concessionária, período de 2017 a 2020, considerando os indicadores DIC, FIC e DMIC, período mensal.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme divulgado pela ANEEL, no ano de 2021 a média que os consumidores ficaram sem energia elétrica foi de 11,84, sendo 5,98 a frequência das interrupções, apresentando uma redução em relação ao ano anterior, que foi de 6,06 (ANEEL, 2022).

Na Figura 1 podem ser visualizados os valores de compensações financeiras creditadas diretamente às unidades consumidoras, englobando todas as concessionárias do Brasil, no período de 2014 a 2021.

Nestes dados são considerados os indicadores de continuidade individuais DIC, FIC, DMIC e DICRI, nos períodos mensal, trimestral e anual.

Figura 1 - Valores de compensações financeiras no Brasil - 2014 a 2021



Fonte: Adaptado de ANEEL (2022).

O valor das compensações creditadas diretamente às unidades consumidoras registrou aumento nos últimos quatro anos, sendo que passou de R\$ 634 milhões, em 2020, para R\$ 718 milhões em 2021, representando um aumento de aproximadamente 13%. Já de 2018 para 2019, teve-se um aumento de 31%, passando de R\$ 483 milhões para R\$ 633 milhões. Porém, o aumento mais significativo (68%) ocorreu em 2015, passando dos R\$ 390 milhões de 2014 para R\$ 656 milhões em 2015.

Apenas nos anos de 2016 e 2017 ocorreu uma redução do valor total de compensações financeiras em relação ao ano anterior, sendo que em 2016 teve-se uma redução de 11,63% e em 2017 de 16,75%.

A média anual de compensações, considerando esse período de 8 anos (2014 a 2021) é de aproximadamente R\$ 573 milhões.

Esta dissertação tem como finalidade propor uma metodologia baseada em programação matemática, utilizando um software computacional como ferramenta de simulação das novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras de uma concessionária de energia elétrica, de forma a verificar possibilidades de redução de valores de compensações financeiras creditadas diretamente às UCs e indicadores de continuidade, conforme normas estabelecidas e aplicadas pela ANEEL.

A redução de valores compensações financeiras, por conta da violação de limites de indicadores de continuidade possibilita a aplicação deste recurso como

investimento em melhoria de rede elétrica, materiais, equipes, aumentando assim, a qualidade no fornecimento de energia elétrica.

Na próxima seção serão detalhados os objetivos geral e específicos deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia para verificar o impacto nos indicadores e compensações financeiras, decorrentes da violação de limites de indicadores de continuidade individuais, considerando novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras de uma concessionária de energia elétrica.

1.2.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de atender o objetivo geral proposto, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Validar o atual processo de cálculo das compensações financeiras por conta da violação dos limites dos valores dos indicadores de continuidade;
- Propor novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras, partindo do princípio que cada subestação é um conjunto;
- Identificar quais configurações de conjuntos de unidades consumidoras que apresentam menor valor de compensações financeiras e indicadores de continuidade.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a pretensão de alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está disposta em seis capítulos, sendo que o primeiro é a introdução, previamente apresentada. Os demais capítulos seguem conforme descrito a seguir.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde serão revisados os assuntos a serem utilizados na metodologia, trazendo informações importantes quanto ao PRODIST e à qualidade da energia elétrica, critérios para a formação de

conjuntos de UCs, indicadores de continuidade coletivos e individuais, além do processo de cálculo das compensações financeiras por conta de violação de limites dos indicadores de continuidade individuais.

O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta neste trabalho, contendo um fluxograma, de maneira a facilitar a descrição das etapas do trabalho e quais os resultados esperados. Também será apresentado um modelo não-linear, onde através de uma função objetivo pretende-se minimizar os indicadores de continuidade. Após será explicado como foi desenvolvida a matriz para atender o critério de contiguidade de áreas, como serão calculados os limites dos indicadores anuais coletivos DEC e FEC para os novos conjuntos propostos, bem como a modelagem do algoritmo para o cálculo das compensações financeiras, sendo apresentado um novo fluxograma para a estrutura do algoritmo desenvolvido.

De forma a validar a metodologia apresentada no capítulo anterior, no capítulo 4 é apresentada a área de aplicação do estudo, onde se trabalha com o levantamento e tratamento dos dados reais disponibilizados por uma concessionária, onde definiu-se aplicação do estudo de quatro conjuntos que atendem um município, sendo formados por cinco subestações, facilitando a análise para a construção do modelo desenvolvido. Após a validação de cálculo com as subestações, é demonstrado as possibilidades de novas formações de conjuntos, de acordo com o critério de contiguidade estabelecido no Módulo 8 do PRODIST.

No capítulo 5 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Após, é realizada uma síntese dos resultados encontrados, apresentando o melhor resultado de cada cenário para compensações financeiras, DEC médio e FEC médio. E por fim serão demonstrados os resultados encontrados para a melhor configuração de maneira geral, de forma detalhada.

Finalmente, no capítulo 6 tem-se as considerações finais, sugestões de trabalhos futuros, bem como as contribuições científicas resultantes do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão descritos os fundamentos teóricos que compõem este trabalho, relacionados ao PRODIST, à formação de conjuntos, aos indicadores de continuidade e ao cálculo das compensações financeiras, para após apresentar a metodologia proposta.

2.1 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST

A sociedade, em geral, exige que o fornecimento de energia elétrica seja um serviço de excelência, devido à larga dependência de eletricidade, desde o funcionamento de uma lâmpada, sistema de climatização, computador, internet, eletrodomésticos, etc. Para que este serviço seja possível, é necessário um bom funcionamento de um sistema elétrico composto basicamente por geração, transmissão e distribuição.

Os indicadores de qualidade de serviço são estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e baseados nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que “são documentos elaborados pela ANEEL, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica” (ANEEL, 2016).

O PRODIST é composto por 11 Módulos, conforme a Tabela 1, sendo que cada Módulo é revisado periodicamente, onde é publicada uma nova versão. Verifica-se que o Módulo 8 estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), com foco na qualidade do produto e do serviço prestado, além do tratamento de reclamações.

Quando se trata de qualidade do serviço, se remete aos consumidores, que são o destino do produto/serviço e demandam, principalmente, velocidade nas respostas às reclamações, confiabilidade do suprimento da energia e atendimento aos níveis de tensão de fornecimento (FUMAGALLI et al., 2007).

Tabela 1 - Módulos do PRODIST

Nº Módulo	Título do Módulo
Módulo 1	Introdução
Módulo 2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
Módulo 3	Acesso ao Sistema de Distribuição
Módulo 4	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
Módulo 5	Sistemas de Medição
Módulo 6	Informações Requeridas e Obrigações
Módulo 7	Cálculo de Perdas na Distribuição
Módulo 8	Qualidade da Energia Elétrica
Módulo 9	Ressarcimento de Danos Elétricos
Módulo 10	Sistema de Informação Geográfica Regulatório
Módulo 11	Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

Fonte: Autor.

De acordo com a ANEEL, dois indicadores, DEC e FEC, são comumente usados para representar quantitativamente o desempenho de um sistema elétrico de distribuição. Enquanto o DEC representa o tempo que um agrupamento de consumidores fica sem energia, o FEC indica a quantidade de vezes que ocorreu interrupção no fornecimento de energia. O DEC e FEC são os principais avaliadores da confiabilidade no fornecimento de eletricidade das empresas brasileiras distribuidoras de energia, que tem por objetivo proporcionar a melhoria da qualidade do serviço prestado aos consumidores (ANEEL, 2020).

De forma a definir um nível mínimo de qualidade aceitável no serviço de fornecimento de energia elétrica, criando um ambiente competitivo entre as empresas distribuidoras, são definidos valores limites para os indicadores DEC e FEC, onde a ANEEL considera a comparação de desempenho entre as concessionárias para obter uma maior homogeneidade entre os agrupamentos de consumidores e melhor qualidade no serviço prestado ao longo do tempo.

Atualmente, para o estabelecimento dos limites dos indicadores de continuidade, as distribuidoras devem enviar à ANEEL a sua Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), conforme estabelecido no Módulo 6

“Informações Requeridas e Obrigações”, das quais são extraídos os atributos físico-elétricos de seus conjuntos de unidades consumidoras.

As concessionárias são punidas quando ocorre a violação dos limites dos indicadores, através de compensações financeiras creditadas diretamente às unidades consumidoras. Sendo assim, serão detalhados os processos de formação de conjuntos, os indicadores de continuidade individuais, até chegar no processo de cálculo das compensações financeiras.

Após a definição do PRODIST, serão explanados os principais pontos que constam neste documento regulatório, referente ao tema deste trabalho

2.2 FORMAÇÃO DE CONJUNTOS

Os critérios para formação de conjuntos de unidades consumidoras estão definidos no Módulo 8 do PRODIST, mais especificamente na seção 8.2, onde consta que o conjunto de unidades consumidoras é definido por Subestação de Distribuição (SED), em que o critério de formação dos conjuntos passam a ter como base a área de atendimento das subestações.

As restrições regulatórias estabelecidas pela ANEEL definem que para a agregação de SEDs, basicamente devem ser obedecidos dois critérios: 1) critério do número de unidades consumidoras (UCs) e 2) critério de contiguidade de áreas (ANEEL, 2020).

Quanto ao número de UCs, deve ser considerado o seguinte: até 1.000 (um mil), devem ser agrupadas, formando um único conjunto; entre 1.001 (um mil e um) e 10.000 (dez mil), podem ser agrupadas, formando um único conjunto. Já para um número maior que 10.000 (dez mil) unidades consumidoras, é vedado o agrupamento. Quanto ao critério de contiguidade, basicamente define que conjuntos que não sejam vizinhos, não podem ser agrupados (ANEEL, 2020).

Para identificar padrões de consumo de energia de residências espanholas e, ainda, avaliar suas tendências gerais de consumo de maneira mais rápida em função da técnica aplicada, o algoritmo *k-means* estático foi aplicado por Benítez et al. (2014).

Com o objetivo de combinar consumidores de uma determinada concessionária em conjuntos, visando minimizar o risco de compensação financeira por ultrapassagem de limites de indicadores de continuidade, Araújo (2011) trabalhou com um número de 419 conjuntos iniciais de uma concessionária, alterando estes

conjuntos através de um algoritmo genético e outro imunológico, de forma a otimizar o resultado proposto. Com isto, desenvolveu uma ferramenta computacional. Desta pesquisa pode-se destacar duas contribuições: análise da evolução da normatização sobre a qualidade do fornecimento de energia e continuidade do serviço; apresenta estudos para otimização do processo de reconfiguração dos conjuntos de unidades consumidoras para uma determinada área de concessão.

Santos (2010), apresentou uma metodologia baseada em técnicas de aprendizado de máquina para auxiliar na tomada de decisão quanto à formação de conjuntos de unidades consumidoras, com a finalidade de encontrar uma melhor compatibilidade das metas para os indicadores de DEC e FEC. A metodologia foi aplicada em um estudo de caso na área de concessão da Centrais Elétricas do Pará CELPA, atual Equatorial Energia Pará. O estudo apresentou análise de sete cenários, sempre constituídos com a união de dois conjuntos de unidades consumidoras. Em alguns casos, a união de conjuntos foi vantajosa. Sendo que a diferença entre os valores obtidos para os cenários onde a união foi considerada não satisfatória, não eram muito grandes.

O problema de agrupamento de consumidores, em Lin et al. (2020), é definido como a busca de similaridades entre os elementos, utilizando técnicas baseadas em análise de agrupamento. Em Guimarães et al. (2021) é apresentado um modelo para tomada de decisão focado na reconfiguração dinâmica de redes de distribuição, baseado na metodologia *self-healing* com ilhamento.

Entre os artigos pesquisados, encontrou-se a busca pela avaliação do desempenho das concessionárias de distribuição com a aplicação de um único índice global, baseado no método *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA), classificando a qualidade do serviço pela continuidade de fornecimento, conformidade de tensão e satisfação do cliente (BARBOSA; SHAYANI e OLIVEIRA, 2018).

Já Resende e Cardoso (2019) realizaram diagnóstico da qualidade do serviço na distribuição de energia elétrica no Brasil, levando em conta os indicadores relativos a reclamações de clientes, tempo médio de resolução de problemas e satisfação do consumidor.

Jiang et al. (2019) trabalharam com o problema de agrupamento de acordo com uma análise das características de subestações, por meio de um modelo multiobjetivo e um algoritmo de agrupamento para a escolha adequada de subestações, visando melhorar a eficiência e segurança do sistema de distribuição. No caso estudado,

trabalharam com 39 subestações e aproximadamente 19.000 (dezenove mil) consumidores.

Quando é realizada a reconfiguração de conjuntos de unidades consumidoras, os limites para os indicadores de continuidade coletivos, DEC e FEC, também devem ser redefinidos. Estes novos limites impactam nos limites referentes aos indicadores de continuidade individuais (DIC, FIC e DMIC) e seus períodos (mensal, trimestral e anual). Dessa forma, alguns trabalhos acadêmicos abordaram essa questão de definição de limites para os indicadores.

Tanure (2000) apresenta uma metodologia para o estabelecimento das metas de continuidade DEC e FEC, viabilizando a comparação entre as concessionárias do Brasil. Utilizou o algoritmo *k-means* para estabelecimento de *clusters* de conjuntos de unidades consumidoras semelhantes entre si. Essa metodologia, considerando apenas cinco atributos, foi aplicada em 4135 conjuntos de 56 concessionárias. Este estudo foi utilizado pela ANEEL como base para metodologia de definição de *clusters* e metas dos indicadores.

Verificando o não atendimento de metas de indicadores DEC e FEC por muitos conjuntos de uma concessionária, Sperandio (2004) estudou formas para reclassificar os conjuntos de consumidores, com a finalidade de obter conjuntos mais homogêneos, possibilitando à concessionária identificar se um conjunto foi mal classificado pela ANEEL. O autor utilizou métodos de agrupamento como *k-means* e *Self Organizing Map* (SOM), fazendo uma validação cruzada entre estes dois métodos. Com isto, consolidou uma metodologia para classificar e analisar conjuntos de unidades consumidoras, desde a seleção de variáveis adequadas para o agrupamento de conjuntos, até a identificação de conjuntos críticos, onde a concessionária deve focalizar os investimentos, de maneira que aumente a qualidade do serviço fornecido, impactando na diminuição do valor referente às multas por transgressão dos limites de continuidade.

Com a finalidade de desenvolver uma metodologia para determinação de valores para os limites de indicadores de continuidade, de acordo com características físicas e operacionais de um determinado conjunto de unidades consumidoras, Knak (2012) desenvolveu uma ferramenta computacional, utilizando lógica *Fuzzy*, que considera todas as etapas de cálculo, utilizando base de dados fornecida pela distribuidora. Esta ferramenta propõe auxiliar a concessionária na justificativa para solicitação de ajuste aos limites definidos pela ANEEL, visando corrigir possíveis

incoerências. Também possibilita a identificação de conjuntos que devem ser priorizados para ações de melhoria nas redes, para se obter um melhor desempenho nos indicadores de continuidade.

Falabretti e Sabbatini (2022) propuseram um algoritmo baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para agrupamento de consumidores, que é realizado de acordo com a divisão da área de atendimento em várias subestações. A abordagem foi aplicada na rede de média tensão de uma cidade localizada no norte da Itália, com cerca de 69.000 (sessenta e nove mil) habitantes.

O presente trabalho, concentra-se em uma área pouco explorada, o problema de reagrupamento de conjuntos conforme estudos de Araújo (2011) e Santos (2010). Com isto, este trabalho tem a finalidade de desenvolver uma metodologia para propor novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras, de maneira a viabilizar uma redução nos valores perdidos pelas concessionárias, referente às compensações financeiras creditadas diretamente na fatura das UCs atingidas, por conta de violação dos limites dos indicadores de continuidade individuais.

Após o entendimento quanto à formação de conjuntos e definição de limites de indicadores de continuidade, na próxima seção será tratado sobre os indicadores de continuidade coletivos e individuais.

2.3 INDICADORES DE CONTINUIDADE

Nesta seção serão apresentados os indicadores de continuidade coletivos e individuais, definidos no Módulo 8 do PRODIST.

Anteneh et al. (2021) trabalharam com abordagens envolvendo a otimização da rede de distribuição por meio da reconfiguração para melhorar a confiabilidade da rede por meio da redução dos índices SAIFI e SAIDI. Através de algoritmos genéticos para determinar a melhor configuração, chegou-se em redução de 77,33% no SAIFI e de 80% no SAIDI, comparando ao valor médio dos índices de confiabilidade nos anos em estudo (2018 e 2019).

Jafari et al. (2020) trabalharam com a reconfiguração dinâmica e multiobjetiva da rede de distribuição, através de um algoritmo de otimização, híbrido, com capacidade de processamento paralelo, para melhorar a confiabilidade da rede.

2.3.1 Indicadores de Continuidade Coletivos

Com a finalidade de mensurar a qualidade do serviço de fornecimento e avaliar o desempenho das empresas de distribuição, a ANEEL utiliza dois indicadores de continuidade coletivos para expressar a média da continuidade do serviço para os conjuntos de unidades consumidoras: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), para representar o tempo médio que um determinado agrupamento de UCs fica sem energia e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), que basicamente representa a quantidade média de vezes que determinado agrupamento teve interrupção no fornecimento de energia elétrica.

As equações para representação destes indicadores coletivos são definidas na seção 8.2 do Módulo 8 do PRODIST e apresentadas nas equações (1) e (2):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc} \quad (1)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc} \quad (2)$$

Onde

- i = índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;
- Cc = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT;
- $DIC(i)$ = Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras, expressa em horas e centésimos de hora; e
- $FIC(i)$ = Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras, expressa em interrupções e centésimos de interrupções.

2.3.2 Indicadores de Continuidade Individuais

Os indicadores de continuidade individuais expressam o desempenho do serviço perante às unidades consumidoras, individualmente e são denominados:

Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC), Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC), Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC) e Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI).

Destaca-se que são consideradas apenas as interrupções de longa duração, sendo aquelas iguais ou superior a três minutos. Os indicadores de continuidade individuais DIC, FIC, DMIC e DICRI são apurados conforme (3), (4) (5) e (6), respectivamente.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (3)$$

$$FIC = n \quad (4)$$

$$DMIC = t(i)_{max} \quad (5)$$

$$DICRI = t_{critico} \quad (6)$$

Em que:

- i : = índice de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão no período de apuração, variando de 1 a n ;
- n = número de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão considerado, no período de apuração;
- $t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou do ponto de conexão, no período de apuração;
- $t(i)_{max}$ = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora ou no ponto de conexão; e
- $t_{critico}$ = duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

Assim como os indicadores de continuidade coletivos, os indicadores individuais possuem limites que devem ser atendidos pelas concessionárias, caso contrário ocorre a penalização através de compensações financeiras creditadas diretamente na fatura das unidades consumidoras que sofreram a interrupção do

fornecimento de energia elétrica, com prazo máximo de dois meses subsequentes ao mês de referência da violação.

Após o entendimento dos critérios para formação de conjuntos e quais os indicadores de continuidade envolvidos no processo de mensuração da qualidade do fornecimento de energia, parte-se para a explicação de como ocorre o processo de cálculo das compensações financeiras.

2.4 PROCESSO DE CÁLCULO DAS COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS

Considerando que o método para definição do índice global de DEC e FEC proposto pela ANEEL poderia apresentar incoerências, Silva et al. (2013) propuseram uma abordagem utilizando programação linear, visando o ajuste destes indicadores (DEC e FEC) com a finalidade de reduzir as penalidades impostas pela Agência Reguladora às concessionárias, por conta da violação dos limites de desempenho.

O agrupamento de consumidores pode refletir em redução nos custos com compensações, trazendo benefícios para a concessionária e seus consumidores (TUR, 2020). Banerjee et al. (2021), propuseram dois algoritmos meta-heurísticos, nomeados como *Genetic Algorithm* (GA) e *Particle Swarm Optimization* (QPSO), para realizar agrupamentos, com a finalidade de minimizar custo do sistema de distribuição e os índices de confiabilidade SAIFI e SAIDI.

O sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro é composto por redes elétricas que operam em níveis de baixa, média e alta tensão. Valores de tensão igual ou inferior a 1 kV são classificados como baixa tensão; superior a 1 kV e inferior a 69 kV, classificam-se como média tensão; e quando superior a 69 kV e inferior a 230 kV, são os de alta tensão. Além disto, há classificação quanto ao tipo de rede de distribuição, que podem ser aéreas ou subterrâneas (ABRADEE, 2021).

O nível de tensão é importante tanto para a definição dos valores dos limites dos indicadores, quanto para a definição do *kei*, que é o fator de majoração, utilizado no cálculo dos valores de compensações.

Os valores de compensações são referentes aos indicadores de continuidade individuais DIC, FIC, DMIC e DICRI, que são creditados diretamente às unidades consumidoras em caso de violação dos limites estabelecidos pela ANEEL. Os indicadores individuais possuem limites mensais (DIC, FIC, DMIC e DICRI), trimestrais e anuais (DIC e FIC). Estes limites são definidos a partir dos limites anuais dos

indicadores coletivos DEC e FEC, sendo específicos para cada conjunto de unidades consumidoras, conforme características individuais.

Os valores para compensação destes indicadores individuais são calculados utilizando as equações (7), (8), (9) e (10), definidas no Módulo 8 do PRODIST.

$$Valor = \left(\frac{DIC_{apurado}}{DIC_{limite}} - 1 \right) \cdot DIC_{limite} \cdot \frac{EUSD_{m\u00e9dio}}{730} \cdot kei \quad (7)$$

$$Valor = \left(\frac{FIC_{apurado}}{FIC_{limite}} - 1 \right) \cdot DIC_{limite} \cdot \frac{EUSD_{m\u00e9dio}}{730} \cdot kei \quad (8)$$

$$Valor = \left(\frac{DMIC_{apurado}}{DMIC_{limite}} - 1 \right) \cdot DMIC_{limite} \cdot \frac{EUSD_{m\u00e9dio}}{730} \cdot kei \quad (9)$$

$$Valor = \left(\frac{DICRI_{apurado}}{DICRI_{limite}} - 1 \right) \cdot DICRI_{limite} \cdot \frac{EUSD_{m\u00e9dio}}{730} \cdot kei \quad (10)$$

Onde:

- $DIC_{apurado}$, $FIC_{apurado}$, $DMIC_{apurado}$ e $DICRI_{apurado}$: valores apurados pela concessionária;
- DIC_{limite} , FIC_{limite} , $DMIC_{limite}$ e $DICRI_{limite}$: valores definidos pela ANEEL, de acordo com o período apurado dos indicadores;
- 730: número médio de horas no mês;
- $EUSD_{m\u00e9dio}$: média aritmética dos EUSDs correspondentes aos meses de apuração dos indicadores. Sendo que o EUSD é o encargo do uso do sistema de distribuição, proporcional à TUSD multiplicada pelo consumo mensal;
- kei : fator de majoração, que depende do nível de tensão contratada:
 - 15, para Unidade Consumidora atendida em Baixa Tensão;
 - 20, para Unidade Consumidora atendida em Média Tensão;
 - 27, para Unidade Consumidora atendida em Alta Tensão.

Para a definição do valor limite dos indicadores DIC, FIC e DMIC, são necessárias as seguintes características referentes à Unidade Consumidora:

- Nível de tensão contratada:
 - Baixa Tensão (B1, B2, B3 e B4);
 - Média Tensão (A3a, A4 e AS);
 - Alta Tensão (A1, A2 e A3).
- Localização:
 - Urbana;
 - Não urbana.

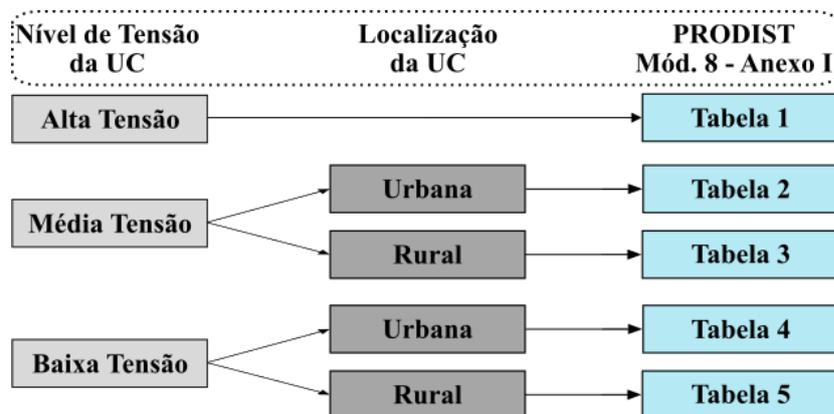
Além disto, também é necessário conhecer os valores limites anuais de DEC e FEC do conjunto ao qual pertence cada unidade consumidora, que são definidos pela ANEEL através de dados encaminhados via BDGD.

Com as informações referentes ao nível de tensão, localização e valores limites DEC e FEC, é possível encontrar os valores limites para cada um dos indicadores de continuidade individuais e seus períodos (mensal, trimestral e anual). Estes valores estão apresentados em cinco tabelas no Módulo 8 do PRODIST.

Cada uma destas cinco tabelas, numeradas de 1 a 5, representa uma combinação de nível de tensão contratada e de localização. As tabelas apresentam os valores limites para DIC e FIC nos períodos mensal, trimestral e anual, além dos valores limites para DMIC no período mensal.

As combinações de cada uma das cinco tabelas podem ser visualizadas na Figura 2.

Figura 2 - Combinações de Nível de Tensão e Localização para as Tabelas do PRODIST



Fonte: Autor.

Por exemplo, uma unidade consumidora do Grupo B1 (baixa tensão) e situada em área urbana: são características que se encaixam na Tabela 4 do Anexo I do Módulo 8 do PRODIST.

Além disso, sugere-se que esta UC está localizada em um conjunto que possui os seguintes limites anuais dos indicadores coletivos: DEC = 8,0 e FEC = 6,0. Ressalta-se que estes limites são originalmente definidos pela ANEEL). A representação da Tabela 4, bem como os valores envolvidos nesta hipótese, podem ser visualizados na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de UC para definição de limites dos indicadores individuais

Faixa de variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora ou Central Geradora						
	Unidades Consumidoras ou Centrais Geradoras com Tensão Contratada ≤ 1 kV situadas em áreas urbanas						
	DIC (horas)			FIC (interrupções)			DMIC (horas)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
1	16,00	8,00	4,00	11,20	5,60	2,80	2,09
2	16,47	8,23	4,11	11,45	5,72	2,86	2,18
3	16,95	8,47	4,23	11,70	5,85	2,92	2,26
4	17,43	8,71	4,35	11,95	5,97	2,98	2,35
5	17,91	8,95	4,47	12,20	6,10	3,05	2,43
6	18,38	9,19	4,59	12,45	6,22	3,11	2,52
7	18,86	9,43	4,71	12,70	6,35	3,17	2,60
8	19,34	9,67	4,83	12,95	6,47	3,23	2,69
9	19,82	9,91	4,95	13,20	6,60	3,30	2,77
10	20,30	10,15	5,07	13,45	6,72	3,36	2,86
11	20,77	10,38	5,19	13,70	6,85	3,42	2,94
12	21,25	10,62	5,31	13,95	6,97	3,48	3,03
13	21,73	10,86	5,43	14,20	7,10	3,55	3,11
14	22,21	11,10	5,55	14,45	7,22	3,61	3,20
15	22,69	11,34	5,67	14,70	7,35	3,67	3,29
16	23,16	11,58	5,79	14,95	7,47	3,73	3,37

Fonte: Adaptado de PRODIST (2020).

Sendo assim, para a UC em questão, tem-se que o valor limite de DIC para o período mensal é 4,83 e o DMIC é 2,69, destacados em azul na Figura 3. Já o valor limite para o FIC, período mensal, é de 3,11, destacado em vermelho. Nota-se que os valores de DIC e DMIC estão atrelados ao DEC, enquanto que o FIC está atrelado ao FEC. Também é possível perceber, na Figura 3, os valores limites para os períodos trimestral e anual para os indicadores DIC e FIC, localizados nas colunas à esquerda dos limites mensais.

Algumas considerações que constam no Módulo 8 do PRODIST, quanto aos períodos de apuração trimestral e anual:

- a) quando da violação dos limites trimestral ou anual, o montante a ser compensado deverá ser calculado proporcionalmente, multiplicando-se o resultado obtido da fórmula de cálculo da compensação pelo quociente entre a soma dos valores apurados dos indicadores mensais que não foram violados e o valor apurado do indicador trimestral ou anual.
- b) quando os limites trimestrais ou anuais tiverem sido violados e os valores mensais apurados não violados forem nulos, a compensação referente ao período de apuração trimestral ou anual, deverá corresponder à diferença dos montantes calculados para essa compensação e os montantes mensais de cada indicador já creditados ao consumidor ou à distribuidora;
- c) quando todos os limites dos indicadores mensais de uma unidade consumidora ou distribuidora tiverem sido violados em um trimestre ou em um ano, e as compensações mensais já tenham sido devidamente creditadas, as compensações referentes aos períodos de apuração trimestral ou anual deverão corresponder à diferença dos montantes calculados para essas compensações e os montantes mensais de cada indicador já creditados aos consumidores, às centrais geradoras ou à distribuidora.

No PRODIST também estão definidos os valores mínimo e máximo de compensação em caso de violação do indicador, para cada período:

- valor mínimo = R\$ 0,01 (um centavo de real);
- valor máximo, período mensal = R\$ 10 x $EUSD_{médio}$;
- valor máximo, período trimestral = R\$ 30 x $EUSD_{médio}$;
- valor máximo, período anual = R\$ 120 x $EUSD_{médio}$.

Quando mais de um dos indicadores de continuidade individuais, DIC, FIC e DMIC, tiver a violação do limite no período de apuração, deverá ser considerado, para efeito de compensação ao consumidor, apenas aquele indicador que apresentar o maior valor de compensação.

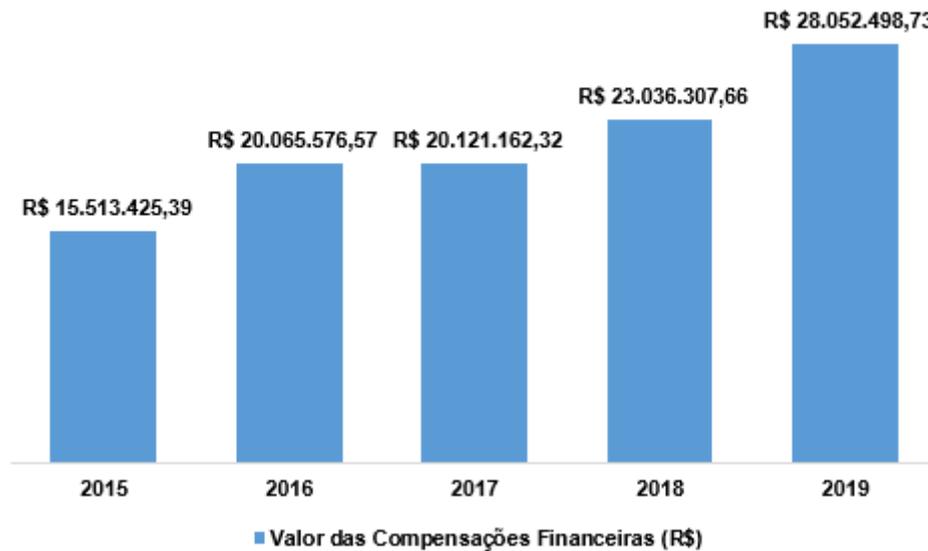
Quanto ao indicador DICRI, quando ocorre a violação do limite, a compensação deverá ser realizada sem prejuízo das compensações por violação dos outros indicadores de continuidade individuais, podendo inclusive haver compensação referente a mais de uma violação do limite do indicador DICRI no mesmo mês.

A partir da publicação da Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021, que entrou em vigor em 1º de janeiro de 2022, foram revogadas as Resoluções Normativas anteriores (nº 395, de 15 de dezembro de 2009; nº 424, de 17 de dezembro de 2010; nº 432, de 5 de abril de 2011, entre outros). Os 11 módulos do PRODIST foram publicados em forma de anexos a Resolução nº 956/2021.

Especificamente no Módulo 8, agora intitulado “Qualidade do fornecimento de energia elétrica”, o processo de cálculo das compensações financeiras sofreu mudanças, porém não sendo aplicadas neste trabalho, visto que os dados disponibilizados pela concessionária compreendem um período em que estava em vigor a Resolução anterior.

Na Figura 4 tem-se os valores de compensações financeiras creditadas, por uma determinada concessionária localizada no Rio Grande do Sul, diretamente aos consumidores, por conta da violação dos limites dos indicadores individuais DIC, FIC, DMIC e DICRI, nos períodos mensal, trimestral e anual, considerando o período de 2015 a 2019.

Figura 4 - Valores de compensações financeiras de uma concessionária - 2015 a 2019

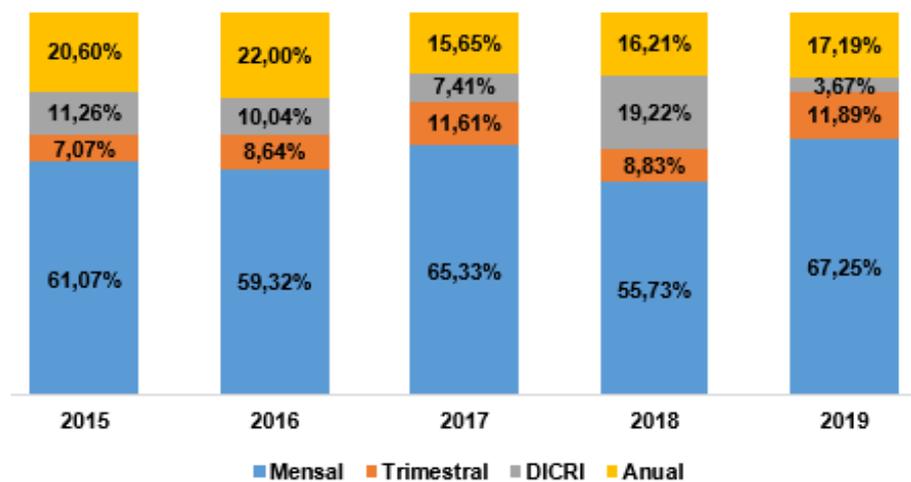


Fonte: Autor.

De acordo com os números apresentados na Figura 4, tem-se um total de mais de 100 milhões de reais envolvidos em compensações financeiras creditadas diretamente aos consumidores, o que resulta em uma média em torno de R\$ 21 milhões.

Já na Figura 5 tem-se a discriminação dos valores totais de compensações financeiras que foram mostradas na Figura 4, mostrando quanto cada período ou indicador representa para o valor de cada ano.

Figura 5 - Discriminação de valores de compensações financeiras - 2015 a 2019



Fonte: Autor.

Como pode ser observado, as compensações referentes aos indicadores de continuidade individuais DIC, FIC e DMIC, período mensal, representam a maior parte das compensações, com uma média de aproximadamente 61,74% considerando os 5 anos apresentados.

Sendo assim, neste trabalho serão tratadas as compensações financeiras relativas aos indicadores DIC, FIC e DMIC, período mensal, utilizando dados reais de histórico de consumidores para os anos de 2017 a 2020 de um determinado município do Rio Grande do Sul.

De forma a possibilitar esse tratamento, será proposta uma metodologia para análise de impactos nas compensações financeiras e indicadores por conta da reconfiguração de conjuntos de unidades consumidoras.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta neste trabalho, para o cálculo de compensações financeiras considerando novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras, aplicável a qualquer conjuntos de UCs de concessionárias do Brasil.

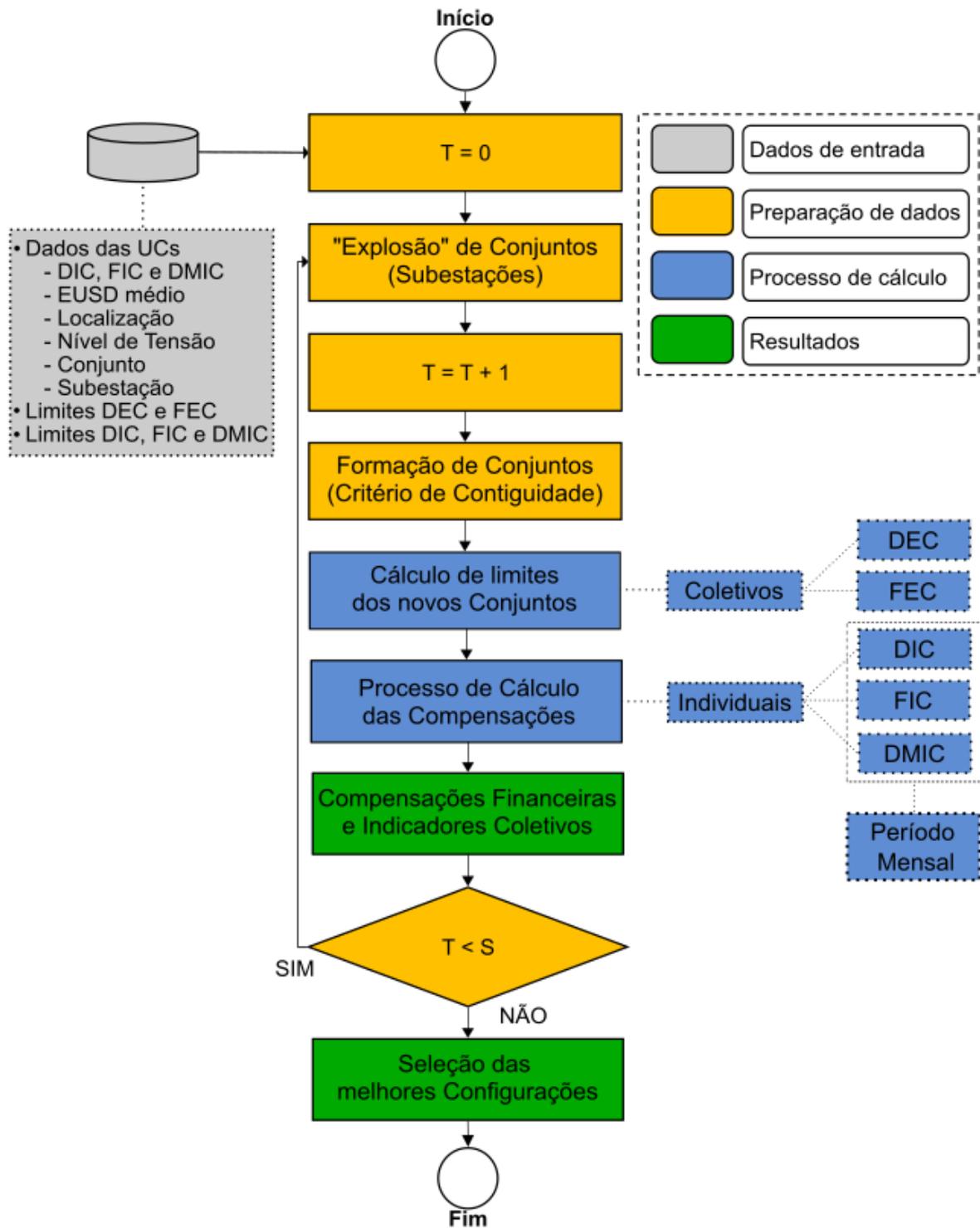
A metodologia proposta neste trabalho tem como base a arquitetura disposta no fluxograma representado na Figura 6.

A finalidade é analisar quais os impactos causados nos indicadores e compensações financeiras considerando possibilidades de configurações de conjuntos de unidades consumidoras, respeitando o critério de contiguidade de áreas.

Quanto às compensações financeiras, que são creditadas diretamente na fatura das UCs pelo não atendimento aos limites estipulados para os indicadores de continuidade individuais de duração (DIC), frequência (FIC) e duração máxima (DMIC) de interrupção, foi considerado apenas o período mensal.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 6, a partir dos dados de entrada contendo os conjuntos, subestações e unidades consumidoras, com informações referentes às ocorrências, compensações financeiras e limites para cada indicador de continuidade, é possível encontrar os resultados de compensações financeiras para cada UC e indicadores coletivos DEC e FEC relativos a cada configuração proposta.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia proposta para o cálculo das compensações e indicadores



Fonte: Autor.

Inicialmente, considera-se o número de conjuntos (T) como sendo igual a zero. Com isso, é realizada a “explosão” dos conjuntos atuais da concessionária, tratando cada subestação (S) como um conjunto, tendo como número de subestações o

número máximo possível de conjuntos e possibilitando a aplicação do critério de contiguidade para formação de conjuntos.

Antes da aplicação deste critério, deve ser definido o número de conjuntos a serem formados, sendo num primeiro momento considerado como um único conjunto, ou seja $T = 1$. Na próxima iteração, a variável T é incrementada em 1, sendo realizado os cálculos até o número máximo de subestações ($T < S$). Destaca-se que cada número de conjunto definido é denominado cenário.

Após a definição do número de conjuntos (cenário), são verificadas as configurações possíveis, ou seja, quais as possibilidades de agrupamentos em cada cenário, através da aplicação da matriz de contiguidade, respeitando a restrição das subestações terem áreas contíguas ou não, conforme tratado na seção 2.2.

Com a definição das possibilidades agrupamentos de conjuntos, deve-se calcular os novos limites para DEC e FEC referentes aos novos conjuntos. Para este trabalho, a definição de novos limites anuais é feita a partir da média dos valores dos limites de DEC ou FEC das subestações, considerando os valores originais dos limites dos conjuntos aos quais as subestações pertenciam na configuração original.

Com os novos limites anuais de DEC e FEC de cada conjunto proposto, os dados são processados, tornando possível o cálculo dos valores referentes às compensações financeiras, levando em conta o que está disposto na seção 2.4 e indicadores coletivos DEC e FEC de cada conjunto.

Ao final, tem-se a seleção das melhores configurações encontradas, ou seja, aquelas que resultaram em menores valores de compensações financeiras, também analisando as maiores reduções de indicadores coletivos DEC e FEC.

Para validação da metodologia serão utilizados dados reais, disponibilizados por uma concessionária localizada no Rio Grande do Sul.

3.1 MODELO NÃO-LINEAR PROPOSTO

Inicialmente, o modelo não-linear proposto tem os dados de entrada e variáveis conforme descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de entrada e variáveis do modelo não-linear proposto

Dados	Descrição
T	Conjunto de unidades consumidoras
DIC_i	Duração da interrupção individual do consumidor i
FIC_i	Frequência da interrupção individual do consumidor i
S	Conjunto de subestações
T_s	Conjunto de consumidores na subestação s
T_n	Conjunto de novas subestações
D_{max}	Distância máxima entre cada consumidor e o ponto de referência da subestação à qual está vinculado
α_k	Fator de normalização da grandeza associada à função objetivo: k=1 para distância; k=2 para DEC e k=3 para FEC
G	Cardinalidade de um conjunto hipotético G
D_{ij}	Distância do consumidor i até a subestação que tem seu centro em ponto j
x_{ij}	1 se o cliente i estiver adstrito a uma subestação cujo ponto de referência se situe no ponto j; 0 caso contrário
y_j	1 quando o ponto j é usado como centro de uma subestação e 0 se de outra forma

Fonte: Autor.

A função objetivo da Equação (1) considera a minimização da distância entre cada consumidor e o ponto de referência das subestações consideradas.

$$\text{Min} \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} D_{ij} \cdot x_{ij} \quad (11)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in T} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in T \quad (12)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i, j \in T \quad (13)$$

$$\sum_{j \in T} y_j \leq |S| \quad (14)$$

$$x_{ij} = x_{ij}, \quad i \in T_s, \quad \forall_s \in S, \quad j \in T \quad (15)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in T \quad (16)$$

Neste modelo inicial, são consideradas as alocações das unidades consumidoras às subestações, como local de referência. A Equação (11), com a função objetivo, minimiza o somatório das distâncias D_{ij} entre cada consumidor i e o ponto de referência j vinculado a uma subestação. Através das restrições da Equação (12), garante-se que todos os consumidores estejam alocados a uma e somente uma subestação. Com as restrições da Equação (13) fica estabelecido que somente são permitidas alocações de consumidores i aos locais onde há uma subestação considerada j .

O número de subestações assumidas como instaladas em pontos de referência j deve ser limitado à cardinalidade do conjunto S , conforme a Equação (14). As restrições apresentadas na Equação (15) asseguram que todos os pontos originalmente vinculados às subestações existentes sejam atribuídos conjuntamente a uma nova subestação localizada no ponto de referência $j \in T$. E então, na Equação (16), são definidos o domínio das variáveis de decisão x e y .

O problema referido nas Equações (11) a (16) resolve a forma de alocação dos consumidores às novas subestações consideradas a partir da determinação dos pontos j que são vinculados às variáveis y . Até aqui, o modelo não contempla a confiabilidade, seja como critério ou então como restrição.

Sendo assim, como critério de confiabilidade para este trabalho são adotados os indicadores de continuidade coletivos DEC e FEC, representados por dec_j e fec_j , bem como outras variáveis derivadas desses indicadores. Quanto aos indicadores de continuidade individuais DIC e FIC, são representados por DIC_i e FIC_i .

As Equações (17) e (18) trazem os cálculos para dec_j e fec_j .

$$dec_j \geq \frac{\sum_{i \in T} DIC_i \cdot x_{ij}}{\sum_{i \in T} x_{ij}}, \quad \forall j \in T_n \quad (17)$$

$$fec_j \geq \frac{\sum_{i \in T} FIC_i \cdot x_{ij}}{\sum_{i \in T} x_{ij}}, \quad \forall j \in T_n \quad (18)$$

Assumindo eventuais restrições regulatórias quanto aos limites de agrupamento de consumidores, a Equação (19) define que toda vinculação de um consumidor a um ponto de referência de uma nova subestação esteja limitada a uma distância máxima definida com D_{max} .

$$D_{ij} \cdot x_{ij} \leq D_{max}, \quad \forall i \in T, \forall j \in T_s \quad (19)$$

Com isso, a função objetivo definida na Equação (11) passa agora a contemplar também a minimização dos indicadores de continuidade, ficando com a forma apresentada na Equação (20).

$$\text{Min } \alpha_1 \cdot \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} D_{ij} \cdot x_{ij} + \alpha_2 \cdot \max_{j \in T_s} \{dec_j\} + \alpha_3 \cdot \max_{j \in T_s} \{fec_j\} \quad (20)$$

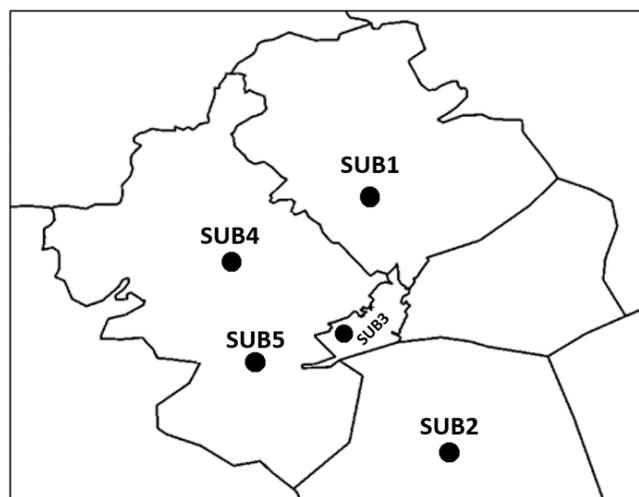
Antes da aplicação da metodologia será detalhado o processo da aplicação de algoritmo desenvolvido para o cálculo das compensações financeiras e indicadores.

3.2 CRITÉRIO DE CONTIGUIDADE DE ÁREAS

Um dos critérios para formação de conjuntos, conforme mencionado nas seção 2.2, é de contiguidade, que restringe o agrupamento de subestações somente se forem áreas vizinhas.

De forma a facilitar o entendimento da aplicação do critério de contiguidade, será apresentado um mapa genérico de conjuntos e subestações, conforme Figura 7.

Figura 7 - Mapa genérico para quatro conjuntos e cinco subestações



Fonte: Adaptado do Software QGIS.

Neste mapa genérico tem-se um município atendido por quatro conjuntos e cinco subestações, onde o Conjunto A é formado pela subestação SUB1, o Conjunto B por SUB2, o Conjunto C pela subestação SUB3 e o Conjunto D é fruto do agrupamento das subestações SUB4 e SUB5.

Para atender este critério de contiguidade, é aplicada a matriz de contiguidade, de forma manual, visualizando as áreas poligonais das subestações, sendo que para subestações vizinhas é atribuído o valor 1 e para subestações não vizinhas, o valor zero. Por exemplo, analisando o mapa a Figura 7, onde constam cinco subestações, e definindo-se um cenário onde o número de conjuntos desejados é quatro, aplicando a matriz de contiguidade para verificar quais as configurações possíveis, tem-se o resultado representado pela Tabela 3.

Tabela 3 - Exemplo de aplicação de matriz de contiguidade

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5
SUB1	0	0	1	1	0
SUB2	0	0	1	0	1
SUB3	1	1	0	1	1
SUB4	1	0	1	0	1
SUB5	0	1	1	1	0

Fonte: Autor.

Sendo assim, é possível visualizar que são possíveis sete configurações diferentes, considerando essas cinco subestações para um cenário com quatro conjuntos. Neste caso, as configurações têm o formato 2-1-1-1, ou seja, duas subestações são agrupadas formando um único conjunto e as outras três subestações formam três conjuntos, de forma separada.

As sete configurações seriam compostas pelo agrupamento das seguintes subestações: (a) SUB1+SUB3; (b) SUB1+SUB4; (c) SUB2+SUB3; (d) SUB2+SUB5; (e) SUB3+SUB4; (f) SUB3+SUB5; (g) SUB4+SUB5.

Na próxima seção será explicado como ocorre a definição dos limites anuais dos indicadores coletivos DEC e FEC para os novos conjuntos propostos, neste trabalho.

3.3 DEFINIÇÃO DE LIMITES DOS INDICADORES COLETIVOS PARA OS NOVOS CONJUNTOS

A definição dos limites anuais dos indicadores coletivos DEC e FEC para os novos conjuntos, neste trabalho, é calculado através da média dos valores dos indicadores das subestações agrupadas, considerando o valor original dos indicadores do conjunto ao qual as subestações estavam vinculadas na configuração original.

Considerando os dados da matriz de contiguidade apresentados na seção 3.2, mais especificamente a configuração (e) que agrupa as subestações SUB3 e SUB4, tem-se um exemplo de definição de novos limites para DEC e FEC de um determinado ano, na Tabela 4.

Tabela 4 - Exemplo de definição de limites anuais de DEC e FEC para uma nova configuração

Subestação	DEC_{lim} "original"	DEC_{lim} novo	FEC_{lim} "original"	FEC_{lim} novo
SUB1	11,0	11,0	7,0	7,0
SUB2	10,0	10,0	9,0	9,0
SUB3	14,0	18,0	9,0	12,0
SUB4	22,0	18,0	15,0	12,0
SUB5	22,0	22,0	15,0	15,0

Fonte: Autor.

Neste exemplo, considerando que os valores originais dos limites de DEC para subestações SUB3 e SUB4 passaram de 14,0 e 22,0, respectivamente, para 18,0 no conjunto proposto (SUB3+SUB4). O mesmo ocorre para o FEC, onde os valores originais hipoteticamente eram 9,0 e 15,0, passando para 12,0. Apesar de ocorrer um aumento de valores comparando com a SUB3, os novos limites tem uma redução quando comparados aos limites "originais" de DEC e FEC da SUB4.

Os outros três conjuntos mantiveram os valores de limites conforme os valores originais, que eram os valores vinculados ao conjunto antes da explosão, sendo que a SUB5 ficou com o mesmos valores limites que pertenciam ao Conjunto D, formado originalmente por SUB4 e SUB5.

3.4 MODELAGEM DO PROCESSO DE CÁLCULO DAS COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS

Com a apropriação da metodologia proposta neste trabalho, elaborou-se o fluxograma disposto na Figura 8, com a finalidade de representar a estrutura de algoritmo para o cálculo das compensações financeiras creditadas diretamente às unidades consumidoras, por conta da violação dos limites dos indicadores de continuidade individuais DIC, FIC e DMIC, considerando apenas o período mensal.

Para a aplicação do fluxograma, neste trabalho, definiu-se o *software Matlab* como ferramenta computacional para a automatização e implementação da modelagem disposta a calcular os valores referente às compensações financeiras. A versão utilizada do *software* foi a R2021a, lançada em março de 2021. Destaca-se que o modelo não fica restrito a esse software.

No fluxograma apresentado na Figura 8 foi considerada a variável $IND(n)$, com n variando de 1 a 3, de forma a representar os três indicadores de continuidade individuais considerados neste trabalho, apurados no mês. A variável $IND(1)$ refere-se ao DIC, $IND(2)$ ao FIC e $IND(3)$ ao DMIC.

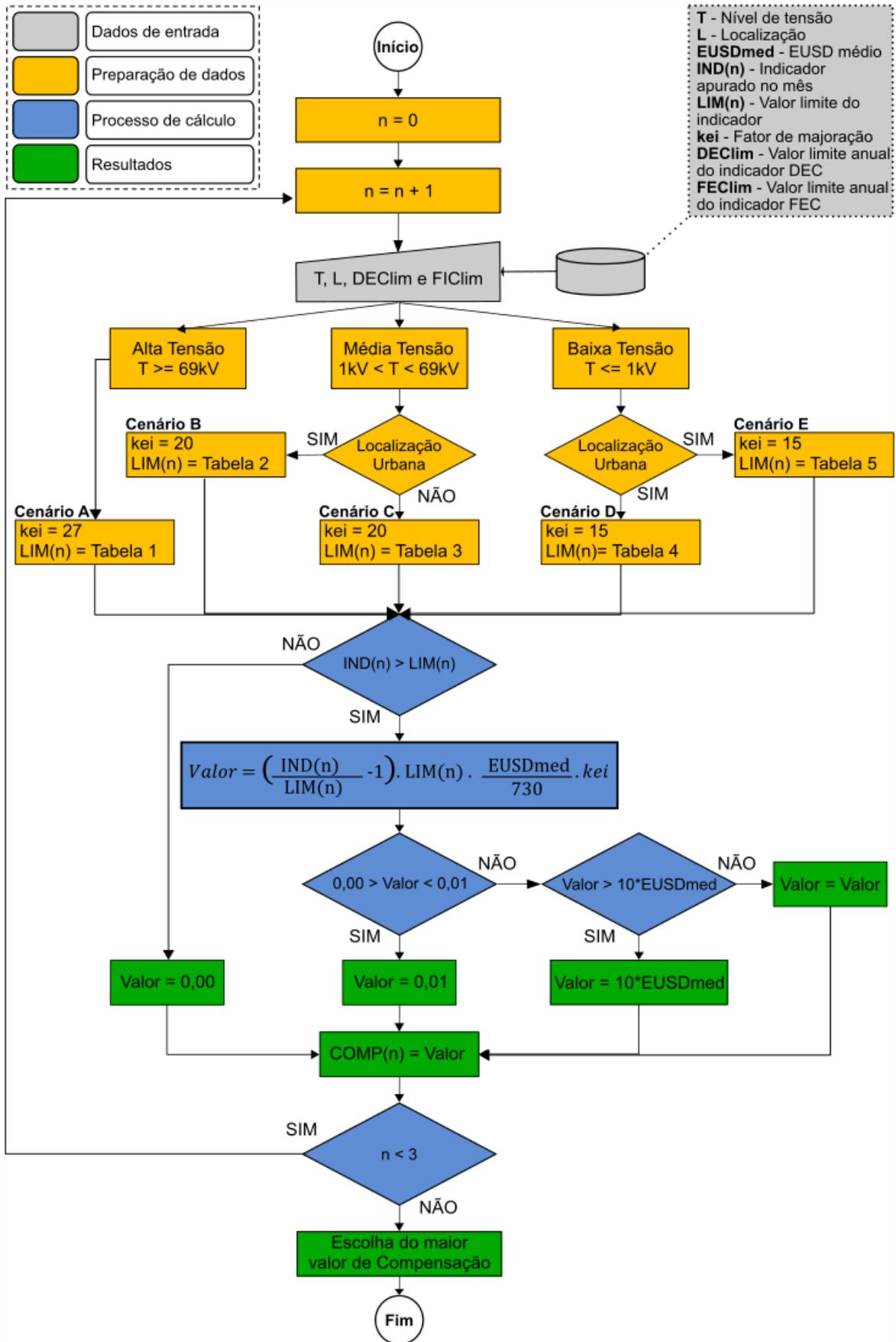
O mesmo se aplica à variável $COMP(n)$, que se refere ao valor de compensação de cada um destes indicadores, onde $COMP(1)$ refere-se ao valor de compensação em virtude do DIC, $COMP(2)$ ao valor de compensação do FIC e $COMP(3)$ ao valor de compensação por conta da violação do valor do limite do DMIC.

O fluxograma inicia tem dados de entrada que possibilitam o desenvolvimento do algoritmo para o cálculo das compensações:

- Nível de tensão - T ;
- Localização - L ;
- EUSD médio - $EUSD_{med}$;
- Indicador apurado no mês - $IND(n)$;
- Valor limite do indicador - $LIM(n)$;
- Fator de majoração - kei ;
- Valor limite anual do indicador DEC - DEC_{lim} ; e
- Valor limite anual do indicador FEC - FEC_{lim} .

Esses dois últimos dados, DEC_{lim} e FEC_{lim} , são utilizados para encontrar os valores limites dos indicadores individuais.

Figura 8 - Fluxograma com estrutura de algoritmo para cálculo das compensações, período mensal



Fonte: Autor.

O fluxograma pode ser dividido basicamente em quatro etapas, sendo que na primeira etapa é feita a definição do Cenário, que varia de A até E, conforme a combinação das variáveis nível de tensão (T) e localização (L).

Nesses cenários são definidos os valores limites dos indicadores de continuidade individuais, que constam em cinco tabelas anexas do Módulo 8 do PRODIST, conforme explicado na seção 2.4, além dos valores do fator de majoração (kei), utilizado na equação de cálculo das compensações financeiras.

A função desenvolvida para a definição de cenários pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 - Função para definição do cenário de cada UC - Matlab

```

1  function [cenario]=calcula_cenario(val_nivel_tensao_min,val_localizacao)
2  % val_localizacao=1 => urbano
3  % val_localizacao=0 => rural
4
5  % CENARIO A: 1
6  % CENARIO B: 2
7  % CENARIO C: 3
8  % CENARIO D: 4
9  % CENARIO E: 5
10 - if( val_nivel_tensao_min==1 )
11     % cenario A
12     cenario=1;
13 - else
14     if( val_nivel_tensao_min==2 )
15         if( val_localizacao==1 )
16             % cenario B
17             cenario=2;
18         elseif ( val_localizacao==0 )
19             % cenario C
20             cenario=3;
21         end
22     else
23         if( val_nivel_tensao_min==3 )
24             if( val_localizacao==1 )
25                 % cenario D
26                 cenario=4;
27             elseif ( val_localizacao==0 )
28                 % cenario E
29                 cenario=5;
30             end
31         end

```

Fonte: Autor.

A função para a leitura do nível de tensão está representada na Figura 10.

Figura 10 - Função para leitura do nível de tensão de cada UC - Matlab

```

calcula_nivel_tensao.m
1  function [nivel_tensao,val_nivel_tensao_min,kei]=calcula_nivel_tensao(grupo_tensao)
2  % ALTA : T>=69kV => 1
3  % ALTA : GRUPOS A1, A2, A3
4  % MEDIA : 1kV<T<69kV => 2
5  % MEDIA : GRUPOS A3a, A4, AS
6  % BAIXA : T<=1kV => 3
7  % BAIXA : GRUPOS B1, B2, B3, B4a
8  if( strcmp(grupo_tensao,'A1')==1) || (strcmp(grupo_tensao,'A2')==1) || (strcmp(gru
9  nivel_tensao='alta';
10 val_nivel_tensao_min=1;
11 kei=27;
12 elseif( strcmp(grupo_tensao,'A3a')==1) || (strcmp(grupo_tensao,'A4')==1) || (strc
13 nivel_tensao='media';
14 val_nivel_tensao_min=2;
15 kei=20;
16 elseif( strcmp(grupo_tensao,'B1')==1) || (strcmp(grupo_tensao,'B2')==1) || (strc
17 nivel_tensao='baixa';
18 val_nivel_tensao_min=3;
19 kei=15;
20 else
21 nivel_tensao='indef';
22 val_nivel_tensao_min=0;
23 kei=0;
24 end
25 end

```

Fonte: Autor.

Com a definição do nível de tensão contratada, também é possível atribuir o valor do *kei* (fator de majoração), sendo 15 para baixa tensão, 20 para média tensão e 27 para alta tensão.

A localização pode ser urbana ou não urbana (rural), sendo atribuídos os valores de 1 e 0, respectivamente, conforme pode ser visualizado nas linhas 7 e 10 da Figura 11.

Figura 11 - Função para leitura da localização de cada UC - Matlab

```

calcula_localizacao.m
1  function [localizacao,val_localizacao]=calcula_localizacao(localiz)
2  % U: urbano => 1
3  % R: rural => 0
4
5  if( strcmp(localiz,'U')==1 )
6  localizacao='urbano';
7  val_localizacao=1;
8  elseif( strcmp(localiz,'R')==1 )
9  localizacao='rural';
10 val_localizacao=0;
11 end
12
13 end

```

Fonte: Autor.

Na Tabela 5 tem-se o detalhamento de cada um dos cinco cenários, conforme a combinação das variáveis.

Tabela 5 - Cenários conforme combinações de Nível de Tensão e Localização das UCs

Cenário	Nível de Tensão	Localização	kei
Cenário A	Alta	-	27
Cenário B	Média	Urbana	20
Cenário C	Média	Não urbana	20
Cenário D	Baixa	Urbana	15
Cenário E	Baixa	Não urbana	15

Fonte: Autor.

Após a definição do cenário, tem-se a segunda etapa, onde é verificado se o indicador apurado (IND(n)) é maior que o valor limite do indicador (LIM(n)). Caso não seja maior, o valor de compensação para o indicador calculado é zero (R\$ 0,00). Se for maior, deve ser aplicada a equação para cálculo da compensação do referido indicador. As equações para cálculo das compensações estão detalhadas na seção 2.4, através das equações (7), (8) e (9), que representam o DEC, FIC e DMIC, respectivamente.

Aplicando a equação para cálculo de compensação do indicador, tem-se as verificações de valores mínimo e máximo, que são R\$ 0,01 (um centavo de real) e R\$ $10 \times EUSD_{médio}$ (para o período de apuração mensal), conforme mencionado na seção 2.4, chegando-se na terceira etapa, onde tem-se o resultado do valor de compensação do indicador (COMP(n)).

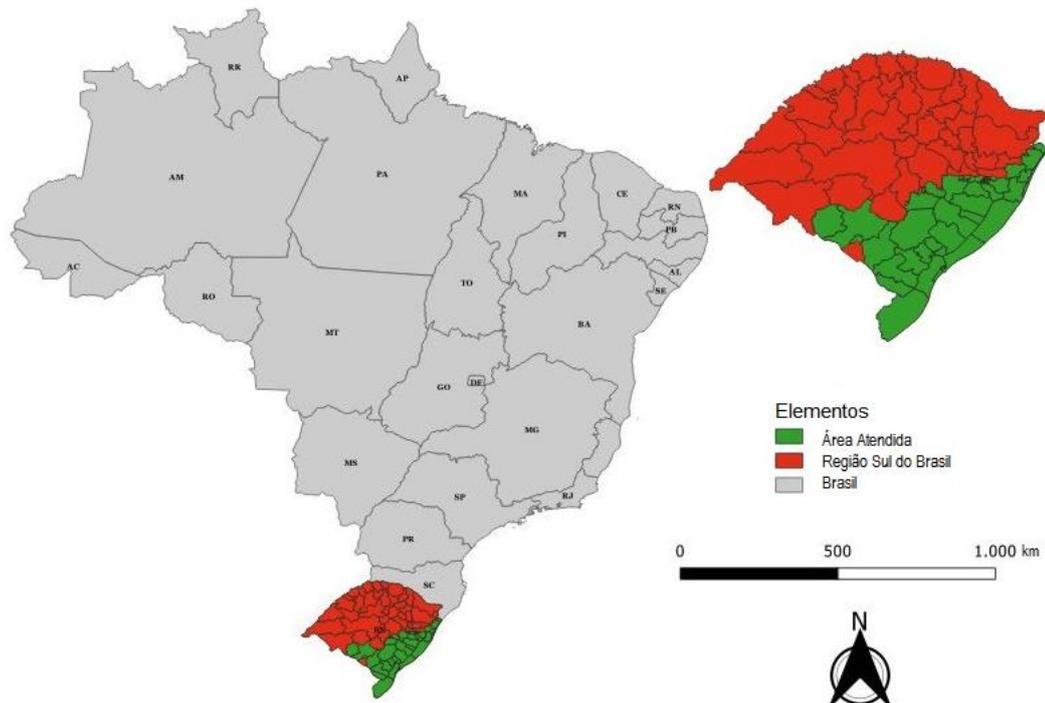
Por último, após a definição do valor de compensação para cada um dos indicadores de continuidade individuais (DIC, FIC e DMIC), verifica-se o maior valor de compensação entre eles (seção 2.4), para o período calculado, visto que apenas o maior valor de compensação entre os três indicadores deve ser creditado na fatura do mês da UC.

A partir deste processo, o algoritmo será aplicado considerando as subestações de forma separada, conforme proposto no fluxograma apresentado na Figura 6, de forma a validar o modelo e tornar possível a verificação dos impactos nos valores das compensações e indicadores considerando diferentes configurações de conjuntos.

4 ESTUDO DE CASO

A área de estudo de uma concessionária de distribuição de energia elétrica que atende aproximadamente 70 municípios no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, abrangendo pouco mais de 70.000 km² e totalizando mais de 1,5 milhão de unidades consumidoras. A Figura 12 apresenta as regiões atendidas pela concessionária.

Figura 12 - Área de concessão da concessionária em estudo

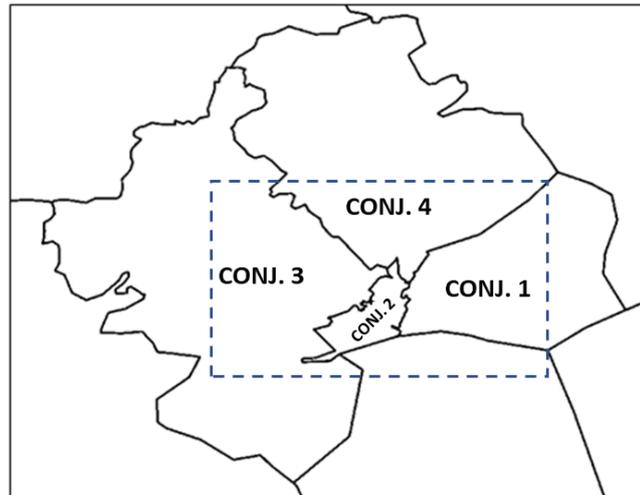


Fonte: Software QGIS, extraída da Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD).

Dentre os conjuntos de unidades consumidoras desta concessionária, para o período em estudo, foram selecionados quatro conjuntos que atendem determinado município, de forma a facilitar a validação da metodologia em um universo menor de informações, visto que representam menos de 7% do total de conjuntos da área de concessão, além da particularidade de contar com cinco subestações.

A representação geográfica dos quatro conjuntos deste município, extraída da Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD), através do software QGIS e pode ser visualizada na Figura 13. Os conjuntos foram nomeados como: CONJ1, CONJ2, CONJ3 e CONJ4.

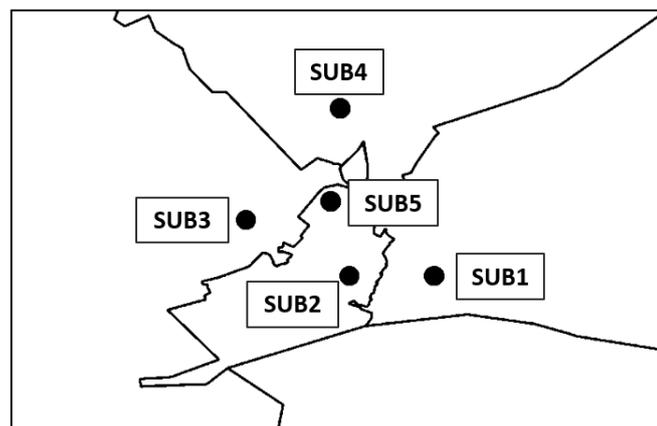
Figura 13 - Representação geográfica dos conjuntos em estudo



Fonte: Adaptado de Software QGIS.

Conforme mencionado anteriormente, apesar de conter quatro conjuntos, o município em estudo é composto por cinco subestações, denominadas: SUB1, SUB2, SUB3, SUB4 e SUB5, onde as subestações SUB2 e SUB5 pertencem ao conjunto CONJ2. A representação geográfica das subestações, pode ser visualizada na Figura 14, a partir do recorte da Figura 13.

Figura 14 - Representação geográfica das subestações em estudo



Fonte: Adaptado de Software QGIS.

Para aplicação da metodologia deste trabalho, as subestações serão utilizadas como referência, em que, inicialmente, cada subestação equivale a um conjunto.

Na próxima seção será explicado como ocorreu o levantamento de dados e quais os tratamentos necessários para aplicação de metodologia proposta.

4.1 LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS

Após a apresentação da área de estudo de caso, será explicado sobre os dados de entrada da metodologia. Foram utilizados dados reais de histórico de consumidores referentes aos anos de 2017, 2018, 2019 e 2020, disponibilizados pela concessionária em estudo. Tratam-se de dados que tornam possível o cálculo de compensações financeiras para cada unidade consumidora, contendo as informações descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Descrição dos dados disponibilizado pela concessionária em estudo

Dado	Descrição do dado disponibilizado
ANO	Ano da ocorrência
MES	Mês da ocorrência
CONTA	Número da UC
ALIMENTADOR	Abreviação subestação + um número. Ex.: SUB1 20
DIC	DIC apurado no período
FIC	FIC apurado no período
DMIC	DMIC apurado no período
LOCALIZACAO	Urbana ou Não Urbana
EUSD:	Encargo de Uso do Sistema de Distribuição
UT	Código da Unidade Transmissora
CONJUNTO	Código do Conjunto a que pertence a UC
CLASSTARIFARIA	Subgrupo da Modalidade Tarifária - Nível de tensão contratada pela UC

Fonte: Autor.

Como pode ser visualizado na Tabela 6 e de acordo com o disposto na seção 2.4, destacam-se os seguintes dados de cada UC: os indicadores individuais (DIC, FIC e DMIC) apurados mês a mês, o conjunto e subestação que pertencem, o $EUSD_{\text{médio}}$, o nível de tensão e a localização. Com estes dados, mais os limites anuais DEC e FEC definidos pela ANEEL de cada conjunto, é possível encontrar o limite de cada um dos indicadores de continuidade individuais, que são dados fundamentais para o cálculo das compensação financeiras. De posse destas informações, torna-se possível as análises de novas configurações de conjuntos, conforme metodologia proposta.

Antes da aplicação dos dados, foram verificadas inconsistências referentes à falta de alguns dados disponibilizados, o que inviabilizaria a aplicação da metodologia.

Desta forma, optou-se pela exclusão das informações referente às interrupções das unidades consumidoras em que os dados estavam incompletos. Sendo assim, de um total de quase 8 milhões de linhas de informações, foram excluídas pouco mais de 113 mil linhas, o que representa um total de 1,45%, considerando os quatro anos em estudo. A representação deste tratamento realizado nos históricos de consumidores para cada ano em estudo está disponível na Tabela 7.

Tabela 7 - Tratamento de dados dos históricos de consumidores

Ano	Dados disponibilizados	Dados processados	Diferença bruta	Diferença percentual
2017	1.878.532	1.853.486	- 25.046	- 1,33%
2018	1.940.797	1.910.193	- 30.604	- 1,58%
2019	1.990.601	1.966.584	- 24.017	- 1,21%
2020	2.027.183	1.993.227	- 33.956	- 1,68%
Total	7.837.113	7.723.490	-113.623	- 1,45%

Fonte: Autor.

Além disso, também para a correta aplicação da metodologia, foi realizada a normalização da vinculação de subestações e conjuntos, pois verificou-se que uma mesma subestação estava vinculada a mais de um conjunto, conforme pode ser visualizado na Tabela 8. Ainda, tinham UCs vinculadas a dois conjuntos de municípios vizinhos, denominados aqui de CONJX e CONJY.

Tabela 8 - Número de UCs vinculadas às subestações e conjuntos, dados disponibilizados

	CONJ1	CONJ2	CONJ3	CONJ4	CONJX	CONJY
SUB1	56.571	1.302	0	0	0	0
SUB2	5.764	59.650	26	0	0	0
SUB3	0	5.648	17.975	1	6	125
SUB4	0	1	169	8.452	0	0
SUB5	5.910	13.444	1.966	4.125	0	0

Fonte: Autor.

Um conjunto pode conter UCs de mais de uma subestação, porém uma subestação não pode estar vinculada a mais de um conjunto. Sendo assim, foi realizada a normalização destes dados, onde cada subestação fica vinculada apenas a um conjunto, como pode ser verificado na Tabela 9.

Tabela 9 - Número de UCs vinculadas às subestações e conjuntos, dados normalizados

	CONJ1	CONJ2	CONJ3	CONJ4	CONJX	CONJY
SUB1	57.873	0	0	0	0	0
SUB2	0	65.440	0	0	0	0
SUB3	0	0	23.755	0	0	0
SUB4	0	0	0	8.622	0	0
SUB5	0	25.445	0	0	0	0

Fonte: Autor.

As UCs de cada subestação foram vinculadas ao conjunto que continha o número mais significativo de UCs daquela subestação. Por exemplo, a SUB1 tinha UCs vinculadas a dois conjuntos: CONJ1 e CONJ2, sendo o primeiro conjunto o mais significativo, pois contava com 56.571 UCs. Então as 1.302 UCs do CONJ2 foram alocadas no CONJ1. Já a SUB3 tinha UCs vinculadas a 5 conjuntos diferentes, sendo todas alocadas ao conjunto com valor mais significativo de UCs, ou seja, CONJ3. E assim foi aplicado à todas as subestações.

Após esta etapa de tratamento de dados e normalização quanto às subestações e conjuntos vinculados, parte-se para a etapa de validação de cálculo com as subestações separadas, após a “explosão” proposta no fluxograma da metodologia, disponível na Figura 6.

4.2 VALIDAÇÃO DE CÁLCULO COM SUBESTAÇÕES

Com a finalidade de validar os fluxogramas de cálculo de compensações financeiras apresentado na Figura 8, criou-se um estudo de caso, onde foram tratados apenas unidades consumidoras de um determinado conjunto, com aproximadamente 1.300 UCs, considerando apenas o mês de maio de 2020. Tendo o processo de cálculo validado com um número menor de UCs, foi possível a expansão e aplicação para o restante dos conjuntos, subestações e consumidores em estudo.

Na Tabela 10 são apresentados os valores totais de compensações, considerando o período mensal, nos anos de 2017, 2018 e 2019 creditadas às unidades consumidoras pertencentes aos quatro conjuntos da cidade em estudo. Observa-se que o ano de 2020 foi desconsiderado desta análise, pois os dados de compensações disponibilizados pela concessionária continham os valores até o mês de junho de 2020. Nesta mesma tabela, na terceira coluna tem-se os valores de

compensações calculados pelo algoritmo desenvolvido, onde cada subestação foi considerada como um conjunto, totalizando cinco conjuntos.

Tabela 10 - Valores de compensação mensal – anos de 2017, 2018 e 2019

Ano	Concessionária	Metodologia
2017	R\$ 1.028.948,02	R\$ 988.206,40
2018	R\$ 1.104.963,62	R\$ 1.002.307,18
2019	R\$ 1.332.717,73	R\$ 1.083.477,35
Total	R\$ 3.466.629,37	R\$ 3.073.990,93

Fonte: Autor.

Para os limites das subestações desmembradas, foram considerados os valores de DEC e FEC dos conjuntos em que as subestações estavam vinculadas.

Comparando o valor de R\$ 3.073.990,93 obtido com o algoritmo proposto neste trabalho, com o valor de R\$ 3.466.629,37 disponibilizado pela concessionária, entende-se que a diferença é pequena e explicada pelo tratamento dos dados, onde foram eliminadas algumas ocorrências de unidades consumidoras em virtude de inconsistência de dados. Desta forma, o algoritmo pode ser considerado válido, possibilitando seguir para a etapa de verificação de possibilidades de configurações de conjuntos e aplicação da metodologia.

4.3 MATRIZ DE CONTIGUIDADE: CONFIGURAÇÕES PARA CADA CENÁRIO

Nesta seção serão verificadas quais as possibilidades de agrupamentos de conjuntos considerando as cinco subestações em estudo, para cada um dos cenários a serem definidos. Estes cenários estão atrelados à definição do número desejado de conjuntos.

Neste trabalho, o número de conjuntos varia de 1, onde são agrupadas todas as subestações em um único conjunto, até o número máximo de subestações, ou seja, 5 conjuntos, onde são separadas todas as subestações e cada uma forma um conjunto.

Dentro de cada cenário terá um número de configurações de conjuntos, através dos agrupamentos de subestações, respeitando o critério de contiguidade. Observa-se que para cada cenário será aplicada a matriz de contiguidade de forma manual, visualizando através da Figura 14 as áreas poligonais das cinco subestações, sendo

que para subestações vizinhas será atribuído o valor 1 e para subestações não vizinhas, o valor zero.

4.3.1 Cenário 1: Configuração considerando 1 conjunto

Para o Cenário 1, é considerado o agrupamento das 5 subestações em apenas um conjunto, sendo possível apenas uma configuração, representada na Tabela 11.

Tabela 11 - Possibilidade de configuração, considerando 1 conjunto

Configuração	Conjunto formado
1	(SUB1+SUB2+SUB3+SUB4+SUB5)

Fonte: Autor.

4.3.2 Cenário 2: Configurações considerando 2 conjuntos

No Cenário 2 é considerado o agrupamento das cinco subestações em dois conjuntos, possibilitando até 15 configurações diferentes, sendo que após a aplicação da matriz de contiguidade, são descartadas duas configurações, pois não é possível realizar o agrupamento das subestações SUB2 e SUB4 (Configuração 5) e SUB1 com SUB3 (Configuração 9).

As 15 configurações do Cenário 2 podem ser visualizadas na Tabela 12, sendo que as duas que não são possíveis estão destacadas em vermelho, restando 13 configurações para este cenário.

Tabela 12 - Possibilidades de configurações, considerando 2 conjuntos

Configuração	Conjuntos formados
1	(SUB1+SUB2+SUB3) , (SUB4+SUB5)
2	(SUB1+SUB2+SUB4) , (SUB3+SUB5)
3	(SUB1+SUB2+SUB5) , (SUB3+SUB4)
4	(SUB1+SUB3+SUB4) , (SUB2+SUB5)
5	(SUB1+SUB3+SUB5) , (SUB2+SUB4)
6	(SUB1+SUB4+SUB5) , (SUB2+SUB3)
7	(SUB2+SUB3+SUB4) , (SUB1+SUB5)
8	(SUB2+SUB3+SUB5) , (SUB1+SUB4)
9	(SUB2+SUB4+SUB5) , (SUB1+SUB3)
10	(SUB3+SUB4+SUB5) , (SUB1+SUB2)
11	(SUB1) , (SUB2+SUB3+SUB4+SUB5)
12	(SUB2) , (SUB1+SUB3+SUB4+SUB5)
13	(SUB3) , (SUB1+SUB2+SUB4+SUB5)
14	(SUB4) , (SUB1+SUB2+SUB3+SUB5)
15	(SUB5) , (SUB1+SUB2+SUB3+SUB4)

Fonte: Autor.

Nota-se que para este cenário são possíveis dois formatos de configurações, onde de 1 a 10 tem-se o formato 3-2, ou seja, um conjunto é formado por três subestações e o outro é formado por duas subestações. Já de 11 a 15, as configurações se dão no formato 4-1, onde quatro subestações são agrupadas formando um conjunto e o outro conjunto é formado por apenas uma subestação.

4.3.3 Cenário 3: Configurações considerando 3 conjuntos

Considerando o Cenário 3, onde tem-se o agrupamento de 3 conjuntos, são possíveis 25 configurações diferentes, sendo que após a aplicação da matriz de contiguidade, são descartadas cinco configurações, pois não é possível realizar o agrupamento das subestações SUB2 e SUB4 (Configurações 12 e 19) e SUB1 com SUB3 (Configurações 14 e 21), além da Configuração 24 que considera o agrupamento de SUB1+SUB3 e SUB2+SUB4, sendo também descartada.

As 25 configurações do Cenário 3 podem ser visualizadas na Tabela 13, sendo que as cinco que não são possíveis estão destacadas em vermelho, ficando 20 configurações para aplicação dos cálculos, referentes a este cenário.

Tabela 13 - Possibilidades de configurações, considerando 3 conjuntos

Configuração	Conjuntos formados
1	(SUB1+SUB2+SUB3) , (SUB4) , (SUB5)
2	(SUB1+SUB2+SUB4) , (SUB3) , (SUB5)
3	(SUB1+SUB2+SUB5) , (SUB3) , (SUB4)
4	(SUB1+SUB3+SUB4) , (SUB2) , (SUB5)
5	(SUB1+SUB3+SUB5) , (SUB2) , (SUB4)
6	(SUB1+SUB4+SUB5) , (SUB2) , (SUB3)
7	(SUB2+SUB3+SUB4) , (SUB1) , (SUB5)
8	(SUB2+SUB3+SUB5) , (SUB1) , (SUB4)
9	(SUB2+SUB4+SUB5) , (SUB1) , (SUB3)
10	(SUB3+SUB4+SUB5) , (SUB1) , (SUB2)
11	(SUB1) , (SUB2+SUB3) , (SUB4+SUB5)
12	(SUB1) , (SUB2+SUB4) , (SUB3+SUB5)
13	(SUB1) , (SUB2+SUB5) , (SUB3+SUB4)
14	(SUB2) , (SUB1+SUB3) , (SUB4+SUB5)
15	(SUB2) , (SUB1+SUB4) , (SUB3+SUB5)
16	(SUB2) , (SUB1+SUB5) , (SUB3+SUB4)
17	(SUB3) , (SUB1+SUB2) , (SUB4+SUB5)
18	(SUB3) , (SUB1+SUB4) , (SUB2+SUB5)
19	(SUB3) , (SUB1+SUB5) , (SUB2+SUB4)
20	(SUB4) , (SUB1+SUB2) , (SUB3+SUB5)
21	(SUB4) , (SUB1+SUB3) , (SUB2+SUB5)
22	(SUB4) , (SUB1+SUB5) , (SUB2+SUB3)
23	(SUB5) , (SUB1+SUB2) , (SUB3+SUB4)
24	(SUB5) , (SUB1+SUB3) , (SUB2+SUB4)
25	(SUB5) , (SUB1+SUB4) , (SUB2+SUB3)

Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 13, é possível visualizar que no Cenário 3 também há dois formatos de configurações, assim como no cenário anterior. São 10 configurações no formato 3-1-1, ou seja, um conjunto é formado por três subestações e os outros dois conjuntos são formados por uma subestação cada. As outras 15 configurações são no formato 2-2-1, onde dois conjuntos são formados por duas subestações cada e o outro conjunto é formado por apenas uma subestação.

4.3.4 Cenário 4: Configurações considerando 4 conjuntos

No Cenário 4, tem-se a composição de quatro conjuntos, onde são possíveis 10 configurações diferentes, sendo que após a aplicação da matriz de contiguidade,

são descartadas duas configurações, pois não é possível realizar o agrupamento das subestações SUB2 e SUB4 (Configuração 9) e SUB1 com SUB3 (Configuração 10).

As 10 configurações do Cenário 4 podem ser visualizadas na Tabela 14, sendo que as duas que não são possíveis estão destacadas em vermelho, sobrando 8 configurações para aplicação da metodologia e obtenção de resultados.

Tabela 14 - Possibilidades de configurações, considerando 4 conjuntos

Configuração	Conjuntos formados
1	(SUB1+SUB2) , (SUB3) , (SUB4) , (SUB5)
2	(SUB1+SUB4) , (SUB2) , (SUB3) , (SUB5)
3	(SUB1+SUB5) , (SUB2) , (SUB3) , (SUB4)
4	(SUB2+SUB3) , (SUB1) , (SUB4) , (SUB5)
5	(SUB2+SUB5) , (SUB1) , (SUB3) , (SUB4)
6	(SUB3+SUB4) , (SUB1) , (SUB2) , (SUB5)
7	(SUB3+SUB5) , (SUB1) , (SUB2) , (SUB4)
8	(SUB4+SUB5) , (SUB1) , (SUB2) , (SUB3)
9	(SUB2+SUB4) , (SUB1) , (SUB3) , (SUB5)
10	(SUB1+SUB3) , (SUB2) , (SUB4) , (SUB5)

Fonte: Autor.

A configuração original é formada por quatro conjuntos, sendo idêntica à Configuração 5 da Tabela 14, considerando o agrupamento das subestações SUB2 e SUB5, sendo os outros três conjuntos formados por SUB1, SUB3 e SUB4, de forma separada.

4.3.5 Cenário 5: Configuração considerando 5 conjuntos

Finalmente, no Cenário 5, cada subestação é considerada como sendo 1 conjunto, sendo possível apenas uma configuração com 5 conjuntos, representada na Tabela 15.

Tabela 15 - Possibilidade de configuração, considerando 5 conjuntos

Configuração	Conjunto formado
1	(SUB1) , (SUB2) , (SUB3) , (SUB4) , (SUB5)

Fonte: Autor.

Após a verificação das possibilidades de agrupamentos de subestações para formação conjuntos em cada um dos cinco cenários, com a aplicação da matriz de contiguidade, tem-se um total de 43 configurações para aplicação da metodologia para cálculo das compensações financeiras e indicadores.

As 43 configurações estão divididas da seguinte forma entre os cinco cenários propostos:

- Cenário 1: uma configuração;
- Cenário 2: 13 configurações;
- Cenário 3: 20 configurações;
- Cenário 4: 8 configurações; e
- Cenário 5: uma configuração.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados para as compensações financeiras por conta da violação dos limites dos indicadores individuais DIC, FIC e DMIC (período mensal), além dos indicadores coletivos DEC e FEC, para os anos de 2017 a 2020, a partir da aplicação da metodologia proposta, para cada um dos cinco cenários e para todas as 43 configurações possíveis, já descartando nove configurações por conta do critério de contiguidade.

5.1 COMPENSAÇÕES FINANCEIRAS

Observa-se que o valor total de compensações financeiras, considerando os quatro anos, para a configuração original é R\$ 4.787.118,69. Este é valor base a ser comparado com as configurações propostas. Os valores por ano podem ser visualizados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores anuais de compensações financeiras considerando a configuração original

Configuração	2017 (R\$)	2018 (R\$)	2019 (R\$)	2020 (R\$)	Total (R\$)
1	988.206,40	1.002.307,18	1.083.477,35	1.713.127,76	4.787.118,69

Fonte: Autor.

Abaixo serão apresentados os valores calculados para compensações financeiras em cada uma das configurações dos cinco cenários possíveis.

5.1.1 Cenário 1

Os valores de compensações para o Cenário 1, para o período em estudo, bem como a diferença do valor total de compensações comparado ao valor gerado pela configuração original, podem ser visualizados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 1 conjunto

Configuração	2017 (R\$)	2018 (R\$)	2019 (R\$)	2020 (R\$)	Diferença Total (R\$)
1	988.561,45	1.004.331,09	1.070.279,90	1.719.762,36	-4.183,90

Fonte: Autor.

A Configuração 1 do Cenário 1 é representada pelo agrupamento das cinco subestações do município em estudo e através dela chegou-se numa redução de R\$ 4.183,90, ou seja, aproximadamente 0,1%.

5.1.2 Cenário 2

Os valores de compensações financeiras para as 13 configurações possíveis, do Cenário 2, estão representados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 2 conjuntos

Configuração	2017 (R\$)	2018 (R\$)	2019 (R\$)	2020 (R\$)	Diferença Total (R\$)
1	985.098,54	995.433,60	1.064.658,43	1.712.254,66	-29.673,46
2	988.561,45	1.004.331,09	1.070.279,90	1.719.762,36	-4.183,90
3	980.917,64	991.179,66	1.071.298,49	1.705.879,15	-37.843,75
4	979.919,09	1.004.475,28	1.074.594,00	1.714.105,15	-14.025,16
5	-	-	-	-	-
6	988.561,45	1.004.331,09	1.070.279,90	1.719.762,36	-4.183,90
7	988.587,19	1.008.591,25	1.081.199,14	1.716.761,11	8.020,00
8	975.611,53	991.782,02	1.060.553,10	1.703.378,36	-55.793,68
9	-	-	-	-	-
10	1.003.974,14	1.007.186,09	1.080.947,79	1.735.350,75	40.340,08
11	987.523,46	988.374,98	1.062.376,53	1.712.669,99	-36.173,73
12	980.806,17	984.546,66	1.056.855,25	1.712.220,87	-52.689,73
13	972.233,06	976.146,95	1.048.635,24	1.703.721,03	-86.382,41
14	1.001.683,51	1.029.470,74	1.099.763,28	1.728.873,21	72.672,04
15	965.146,59	988.594,71	1.058.156,79	1.693.580,53	-81.640,07

Fonte: Autor.

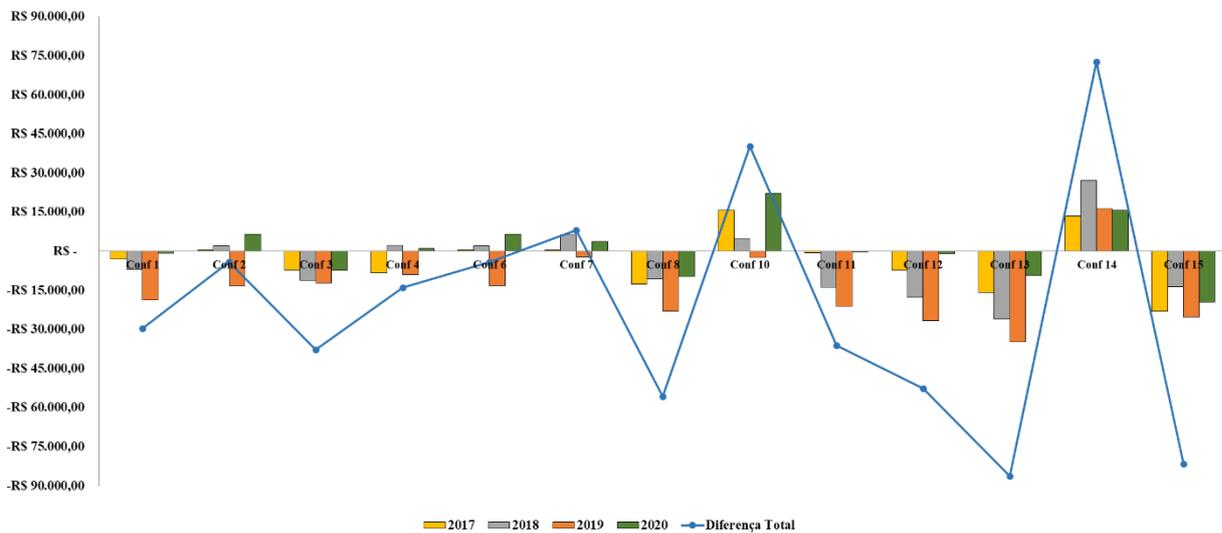
Conforme pode ser visualizado na Tabela 18, a Configuração 13 é a que traz o menor valor de compensações financeiras, com uma redução de 1,80% ou aproximadamente R\$ 86.000,00. Esta configuração é no formato 4-1, considerando o agrupamento de SUB1+SUB2+SUB4+SUB5, com o outro conjunto sendo formado pelas UCs vinculadas à SUB3.

A Configuração 15, com uma redução de R\$ 81.640,07, é a segunda maior redução, seguida pela Configuração 8 que obteve uma redução de R\$ 55.793,68, em torno de 1,17%. Enquanto as Configurações 13 e 15 têm o formato 4-1, a Configurações 8 tem o formato 3-2.

No Cenário 2, a maioria das configurações obtiveram redução do valor total de compensações, sendo que apenas três das treze configurações possíveis tiveram aumento neste valor. A Configuração 14 resultou em um aumento de R\$ 72.672,04, a Configuração 10 em um aumento de aproximadamente R\$ 40.000,00 e a Configuração 7 com um aumento de R\$ 8.020,00, representando apenas 0,17%.

Na Figura 15 tem-se a representação gráfica da diferença do valor de compensações de cada configuração proposta com o valor da configuração original, para cada um dos quatro anos e a diferença total para os quatro anos em estudo.

Figura 15 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 2 conjuntos



Fonte: Autor.

5.1.3 Cenário 3

No Cenário 3, após a matriz de contiguidade verificou-se a possibilidade de 20 configurações diferentes. A metodologia proposta foi aplicada e os valores de compensações financeiras estão representados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 3 conjuntos

Configuração	2017 (R\$)	2018 (R\$)	2019 (R\$)	2020 (R\$)	Diferença Total (R\$)
1	978.551,38	1.006.453,56	1.079.870,45	1.702.215,06	-20.028,24
2	971.455,98	987.010,87	1.059.137,17	1.702.056,19	-67.458,48
3	988.206,40	1.002.307,18	1.083.477,35	1.713.127,76	-
4	979.919,09	1.004.475,28	1.074.594,00	1.714.105,15	-14.025,16
5	989.445,05	1.003.373,87	1.078.766,88	1.715.214,32	-318,58
6	981.903,82	986.444,67	1.058.847,95	1.715.164,75	-44.757,51
7	988.587,19	1.008.591,25	1.081.199,14	1.716.761,11	8.020,00
8	993.119,43	1.005.512,79	1.082.118,90	1.714.584,36	8.216,78
9	987.576,80	989.027,24	1.063.423,49	1.716.571,25	-30.519,91
10	1.003.974,14	1.007.186,09	1.080.947,79	1.735.350,75	40.340,08
11	1.001.411,19	1.009.173,64	1.079.697,28	1.727.764,97	30.928,39
12					
13	980.917,64	991.179,66	1.071.298,49	1.705.879,15	-37.843,75
14					
15	987.803,98	1.005.896,64	1.073.054,26	1.719.627,93	-735,88
16	980.917,64	991.179,66	1.071.298,49	1.705.879,15	-37.843,75
17	994.753,56	991.287,22	1.068.265,32	1.723.167,36	-9.645,22
18	970.698,51	988.576,42	1.061.911,54	1.701.921,76	-64.010,47
19					
20	1.005.311,87	1.019.627,40	1.094.620,07	1.730.833,94	63.274,59
21					
22	994.864,03	1.020.193,60	1.094.909,30	1.717.725,37	40.573,61
23	980.917,64	991.179,66	1.071.298,49	1.705.879,15	-37.843,75
24					
25	977.356,14	1.006.462,83	1.073.343,49	1.706.519,37	-23.436,86

Fonte: Autor.

Analisando os valores dispostos na Tabela 19, a Configuração 2 é a que traz o menor valor de compensações financeiras, com uma redução de 1,41% ou aproximadamente R\$ 67.000,00. Esta configuração considera o agrupamento de SUB1+SUB2+SUB4, com os outros dois conjuntos sendo formados por SUB3 e SUB5, de forma separada.

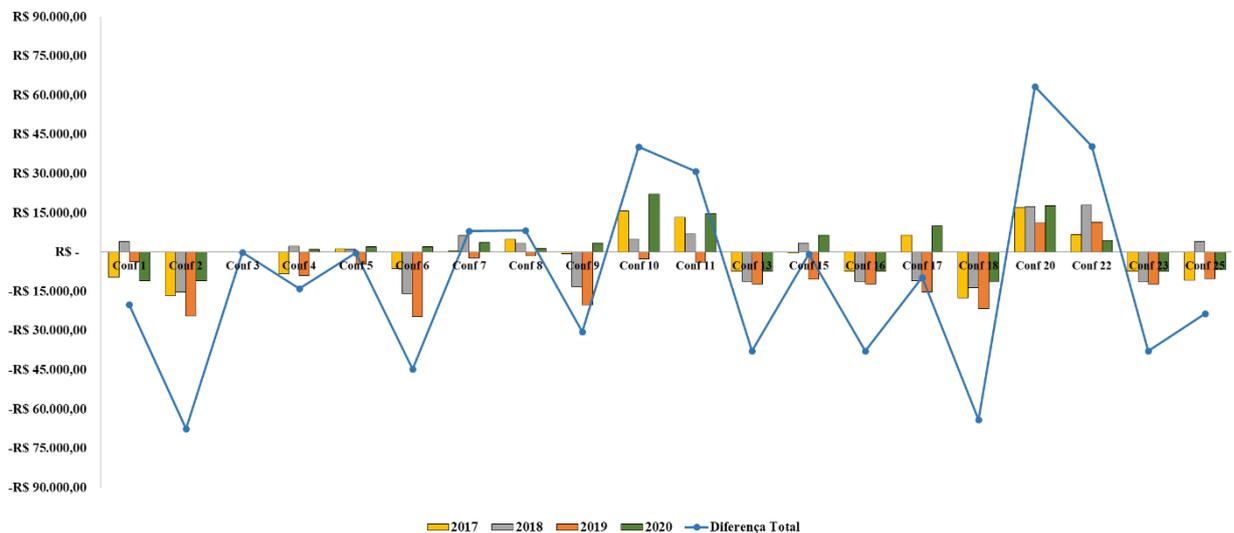
Como segunda e terceira melhores configurações tem-se a Configuração 18 e a Configuração 6, com redução de 1,34% e 0,93%, respectivamente. Em contrapartida, as três piores configurações do Cenário 3 são: Configuração 20 (aumento de 1,32%), Configuração 22 (0,85% de aumento) e Configuração 10 (aumento de 0,84%).

Conforme mencionado na seção 4.3.3 de definição das configurações do Cenário 3, existem duas formas de configurações. No primeiro formato 3-1-1 (três subestações em um conjunto e duas subestações nos outros dois conjuntos, de forma

separada) são 10 configurações possíveis, onde seis delas apresentaram redução de valor de compensações. Já para a outra configuração na forma 2-2-1 (dois conjuntos com duas subestações cada e um conjunto com uma subestação) também são 10 configurações possíveis, onde sete apresentaram redução, quando comparado ao valor original.

Na Figura 16 tem-se a representação gráfica da diferença do valor de compensações de cada configuração proposta com o valor da configuração original, para cada um dos quatro anos e a diferença total para os quatro anos em estudo.

Figura 16 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 3 conjuntos



Fonte: Autor.

5.1.4 Cenário 4

Os valores de compensações financeiras para as oito configurações possíveis, de acordo com o critério de contiguidade, do Cenário 4, estão representados na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 4 conjuntos

Configuração	2017 (R\$)	2018 (R\$)	2019 (R\$)	2020 (R\$)	Diferença Total (R\$)
1	988.206,40	1.002.307,18	1.083.477,35	1.713.127,76	0,00
2	970.698,51	988.576,42	1.061.911,54	1.701.921,76	-64.010,47
3	988.206,40	1.002.307,18	1.083.477,35	1.713.127,76	0,00
4	994.864,03	1.020.193,60	1.094.909,30	1.717.725,37	40.573,61
5	988.206,40	1.002.307,18	1.083.477,35	1.713.127,76	0,00
6	980.917,64	991.179,66	1.071.298,49	1.705.879,15	-37.843,75
7	1.005.311,87	1.019.627,40	1.094.620,07	1.730.833,94	63.274,59
8	994.753,56	991.287,22	1.068.265,32	1.723.167,36	-9.645,22
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-

Fonte: Autor.

Comparando o valor obtido pela Configuração 2 com o valor da configuração original, tem-se uma redução de R\$ 64.010,47, o que representa em torno de 1,34% de redução de compensações financeiras, em decorrência de violação dos limites dos indicadores individuais DIC, FIC ou DMIC, período mensal.

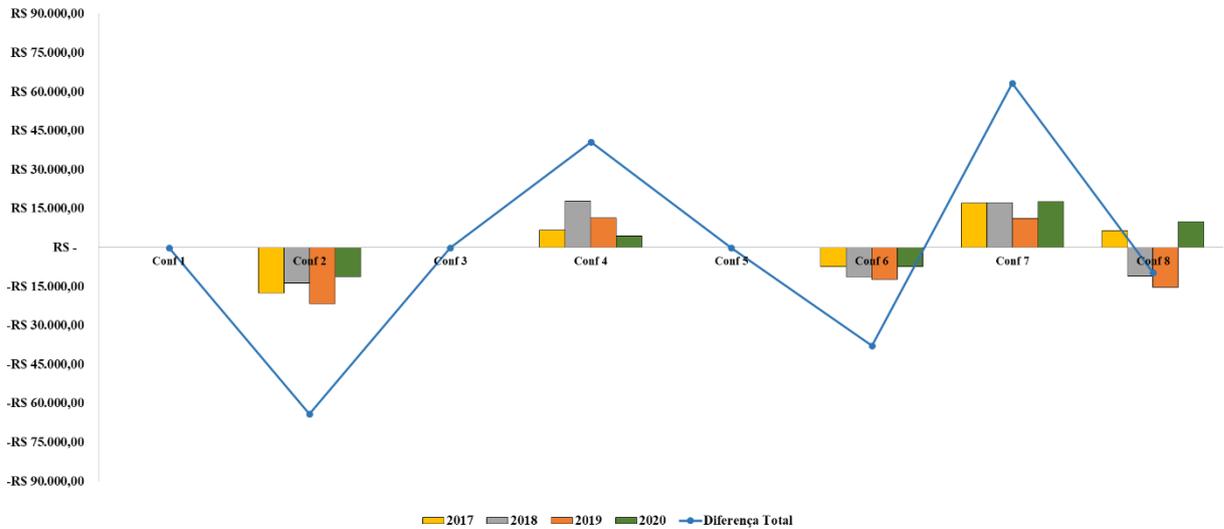
Como segunda e terceira melhores configurações tem-se a Configuração 6 e a Configuração 8, com redução em torno 0,80% e 0,20%, respectivamente. Um ponto em comum entre as três melhores configurações é que a subestação SUB4 faz parte de uma das subestações que foram agrupadas a um novo conjunto, sendo que na Configuração 2 o agrupamento foi SUB1+SUB4, na Configuração 6 foi SUB3+SUB4 e na Configuração 8 a SUB4 foi agrupada com a SUB5.

Em contrapartida, as duas piores configurações são, na sequência: Configuração 7, com aumento de R\$ 63.274,59 e Configuração 4, com aumento de aproximadamente R\$ 40.500,00.

Para as Configurações 1, 3 e 5 não encontrou-se diferença para os valores da configuração original. Isto se deve ao fato das três configurações se encaixarem na mesma faixa de limites de indicadores anuais DEC e FEC, sendo que a Configuração 5 é idêntica à configuração original, considerando o agrupamento das subestações SUB2 e SUB5.

Na Figura 17 tem-se a representação gráfica da diferença do valor de compensações de cada configuração proposta com o valor da configuração original, para cada um dos quatro anos e a diferença total para os quatro anos em estudo.

Figura 17 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 4 conjuntos



Fonte: Autor.

5.1.5 Cenário 5

Os valores de compensações para o Cenário 5, para os quatro anos em estudo, bem como a diferença do valor total de compensações comparado ao valor gerado pela configuração original, estão representados na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores anuais de compensações financeiras considerando 5 conjuntos

Configuração	2017 (R\$)	2018 (R\$)	2019 (R\$)	2020 (R\$)	Diferença Total (R\$)
1	988.206,40	1.002.307,18	1.083.477,35	1.713.127,76	0,00

Fonte: Autor.

A Configuração 1 do Cenário 5 é representada pela formação de cinco conjuntos, onde cada uma das subestações em estudo formam um conjunto. Através dela chegou-se no valor total de R\$ 4.787.118,69, ou seja, o mesmo valor da configuração original.

5.2 INDICADORES COLETIVOS DEC E FEC

Antes de demonstrar os valores calculados para os indicadores coletivos DEC e FEC de cada uma das configurações possíveis dos cinco cenários, a Tabela 22 traz os valores referentes ao cenário original, de forma a possibilitar a comparação com os resultados encontrados para as outras configurações.

Tabela 22 - Valores anuais de DEC e FEC, configuração original

Indicador	2017	2018	2019	2020	Média
DEC	20,07	18,67	26,39	33,74	24,72
FEC	11,43	12,91	13,52	15,92	13,44

Fonte: Autor.

A configuração original é formada por quatro conjuntos, no formato 2-1-1-1, originada a partir do agrupamento das subestações SUB2+SUB5 em um único conjunto, sendo os outros três conjuntos formados, de forma separada, pelas subestações restantes: SUB1, SUB3 e SUB4.

Abaixo serão apresentados os valores médios de DEC e FEC calculados para cada uma das 43 configurações dos cinco cenários possíveis.

5.2.1 Cenário 1

Os valores referentes ao DEC médio, calculados nos quatro anos para o Cenário 1, além da média deste indicador, podem ser visualizados na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores anuais de DEC médio considerando 1 conjunto

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média DEC
1	14,19	14,54	16,90	18,92	16,14

Fonte: Autor.

Em comparação com os valores de DEC do conjunto original, tem-se redução em todos anos do período em estudo, com destaque para o ano de 2020, com uma redução de aproximadamente 44%. Já a média total resultou em uma redução de 34,71%.

Os valores referentes ao FEC médio podem ser visualizados na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores anuais de FEC médio considerando 1 conjunto

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média FEC
1	10,11	11,24	11,41	12,20	11,24

Fonte: Autor.

Em comparação com os valores de FEC do conjunto original, tem-se uma redução de 16,40% no valor médio, para os quatro anos considerados.

5.2.2 Cenário 2

Os valores referentes ao DEC médio, calculados para os anos de 2017, 2018, 2019 e 2020 para o Cenário 2, além da média deste indicador, para cada uma das treze configurações, podem ser visualizados na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores anuais de DEC médio considerando 2 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média DEC
1	16,55	16,55	18,13	23,80	18,76
2	14,46	15,28	18,02	20,39	17,04
3	18,80	18,58	24,69	29,01	22,77
4	13,12	13,54	15,80	18,29	15,19
5	-	-	-	-	-
6	13,63	14,05	15,37	18,43	15,37
7	13,03	13,27	15,08	17,96	14,84
8	14,42	14,03	16,25	19,04	15,94
9	-	-	-	-	-
10	15,90	16,50	18,98	22,56	18,48
11	13,24	13,38	15,10	17,29	14,75
12	12,15	12,74	13,99	16,65	13,88
13	17,09	19,47	22,75	25,42	21,18
14	25,57	20,40	33,46	45,53	31,24
15	11,09	12,61	14,23	17,02	13,74

Fonte: Autor.

Para o Cenário 2, a melhor configuração quando se trata do DEC é a Configuração 15, com uma redução significativa de 44,43% no valor médio do indicador e a segunda melhor é a Configuração 12, com redução de 43,83%. Apenas na Configuração 14 ocorreu um aumento no valor médio de DEC, 26,39%.

Os valores referentes ao FEC médio, calculados para o Cenário 2, podem ser visualizados na Tabela 26.

Tabela 26 - Valores anuais de FEC médio considerando 2 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média FEC
1	11,73	11,73	11,24	13,28	11,99
2	10,18	11,84	11,87	12,74	11,66
3	11,34	13,19	14,06	15,13	13,43
4	9,50	10,50	10,70	11,78	10,62
5	-	-	-	-	-
6	9,67	10,87	10,38	11,88	10,70
7	9,47	10,37	10,32	11,74	10,48
8	10,01	10,78	10,82	12,10	10,93
9	-	-	-	-	-
10	10,30	12,27	12,00	13,29	11,96
11	9,65	10,75	10,60	11,81	10,70
12	8,98	9,95	9,75	11,13	9,95
13	11,39	14,84	13,91	14,70	13,71
14	12,48	12,31	14,58	18,20	14,39
15	8,93	9,98	10,28	11,47	10,17

Fonte: Autor.

Quanto ao FEC médio, para o Cenário 2, a melhor configuração é a 12, que considera o agrupamento de quatro subestações (SUB1+SUB3+SUB4+SUB5), sendo o outro conjunto formado pela SUB2. Nesta configuração chegou-se em uma redução de 25,97% do FEC médio.

A Configuração 13, que obteve o menor valor de compensações financeiras para este cenário, foi apenas a 11ª melhor configuração do Cenário 2, no DEC médio e a 2ª pior configuração em relação ao FEC. Quando comparado ao valor da configuração original, tem-se uma redução de 14,30% para o DEC médio e um aumento de aproximadamente 2% para o FEC médio.

Por conta destes resultados para os indicadores coletivos, observa-se que a Configuração 15 é mais vantajosa em relação à Configuração 13, pois obteve o segundo menor valor de compensações para o Cenário 2, com uma redução de 1,71%, sendo a melhor configuração em relação ao DEC e a segunda melhor quando se trata do FEC médio.

5.2.3 Cenário 3

Na Tabela 27 estão disponíveis os valores calculados para o DEC médio, referentes às 20 configurações possíveis do Cenário 3.

Tabela 27 - Valores anuais de DEC médio considerando 3 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média DEC
1	19,66	17,25	26,08	35,29	24,57
2	14,01	16,47	18,91	21,87	17,81
3	23,54	21,59	31,67	40,78	29,40
4	11,19	12,31	13,85	16,64	13,50
5	20,07	16,97	25,75	34,65	24,36
6	14,89	16,44	18,52	21,58	17,86
7	11,53	12,46	13,99	16,79	13,69
8	20,79	17,39	26,48	35,12	24,95
9	15,20	16,77	19,14	21,86	18,24
10	13,71	14,08	15,82	18,95	15,64
11	15,43	14,89	16,23	20,71	16,81
12	-	-	-	-	-
13	15,75	15,69	19,97	23,54	18,74
14	-	-	-	-	-
15	13,65	13,86	15,96	18,73	15,55
16	15,35	15,37	19,35	23,17	18,31
17	18,12	18,88	21,33	26,10	21,11
18	15,58	16,86	19,54	22,56	18,63
19	-	-	-	-	-
20	21,72	18,82	28,43	37,25	26,56
21	-	-	-	-	-
22	20,56	17,50	26,30	35,32	24,92
23	15,09	15,90	20,11	24,08	18,79
24	-	-	-	-	-
25	12,22	13,07	14,58	17,71	14,40

Fonte: Autor.

Para o Cenário 3, o melhor DEC médio encontrado foi o resultante da Configuração 4, com uma redução de 45,39%, sendo que no ano de 2020 a redução alcançou aproximadamente 50%, quando comparado ao DEC médio da configuração original. Por outro lado, a Configuração 3 resultou em um aumento em torno de 19% no valor do DEC médio.

Já a Configuração 2, que foi a que obteve o melhor resultado nas compensações financeiras para este cenário, obteve uma redução de 28%, passando de um DEC médio de 24,72 da configuração original para 17,81.

Os valores anuais de FEC médio para as 20 configurações possíveis do Cenário 3 estão dispostas na Tabela 28.

Tabela 28 - Valores anuais de FEC médio considerando 3 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média FEC
1	10,89	11,22	12,75	15,72	12,64
2	10,15	12,75	12,26	13,33	12,12
3	12,48	14,28	15,14	17,81	14,93
4	8,76	9,71	9,86	11,18	9,88
5	10,86	11,00	12,37	15,37	12,40
6	10,26	12,63	11,80	13,09	11,95
7	9,00	10,00	10,07	11,46	10,13
8	11,32	11,51	12,92	15,81	12,89
9	10,49	13,05	12,29	13,42	12,31
10	9,52	10,90	10,63	12,08	10,78
11	9,96	11,14	10,61	12,51	11,06
12	-	-	-	-	-
13	10,32	11,73	12,26	13,50	11,95
14	-	-	-	-	-
15	9,65	10,74	10,70	11,97	10,76
16	10,06	11,35	11,79	13,19	11,60
17	11,11	13,80	12,87	14,46	13,06
18	10,59	12,89	12,31	13,48	12,32
19	-	-	-	-	-
20	11,65	12,35	13,78	16,49	13,57
21	-	-	-	-	-
22	11,17	11,45	12,68	15,74	12,76
23	10,09	11,72	12,36	13,60	11,94
24	-	-	-	-	-
25	9,21	10,21	10,16	11,63	10,30

Fonte: Autor.

Em relação ao FEC médio para o Cenário 3, a Configuração 4 também obteve o melhor resultado, assim como no DEC, com uma redução de 26,52%.

Assim como no DEC, no FEC a Configuração 3 resultou no pior valor, com um acréscimo de 11% em comparação à configuração original. A Configuração 3 é constituída pelo formato 3-1-1, sendo realizado o agrupamento de (SUB1+SUB2+SUB5) e os outros dois conjuntos formados por SUB3 e SUB4, de forma separada.

Em relação ao resultado das compensações para a Configuração 4 ((SUB1+SUB3+SUB4),(SUB2),(SUB5)), que obteve os melhores resultados nos indicadores DEC e FEC médios, tem-se uma pequena redução em torno de R\$

14.000,00 (0,29%), sendo o décimo menor valor entre as 20 configurações para o Cenário 3.

5.2.4 Cenário 4

Os valores anuais de DEC médio calculados para cada configuração do Cenário 4, nos quatro anos em estudo, podem ser visualizados na Tabela 29.

Tabela 29 - Valores anuais de DEC médio considerando 4 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média DEC
1	19,57	18,82	26,50	34,14	24,76
2	13,52	15,11	17,14	20,25	16,51
3	19,77	18,43	25,93	33,46	24,40
4	17,55	15,83	22,67	30,10	21,54
5	20,07	18,67	26,39	33,74	24,72
6	13,65	14,23	17,46	20,99	16,58
7	18,62	16,42	23,70	30,87	22,40
8	15,92	16,47	18,38	22,50	18,32
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-

Fonte: Autor.

A Configuração 2 resulta no menor valor de DEC médio para o Cenário 4, representando uma redução de 33,22% em relação ao valor da configuração original. Sendo que a Configuração 2 também obteve o menor valor de compensações para este cenário (-1,34%).

Já os valores anuais de FEC médio para as oito configurações possíveis do Cenário 4, de acordo com o critério de contiguidade, estão dispostas na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores anuais de FEC médio considerando 4 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média FEC
1	11,26	12,90	13,59	15,99	13,44
2	9,76	11,70	11,28	12,60	11,34
3	11,24	12,63	13,17	15,68	13,18
4	10,40	10,90	11,90	14,53	11,93
5	11,43	12,91	13,52	15,92	13,44
6	9,56	10,83	11,24	12,62	11,06
7	10,73	11,30	12,31	14,79	12,28
8	10,33	12,40	11,62	13,27	11,90
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-

Fonte: Autor.

Para o FEC médio, no Cenário 4 a melhor configuração é representada pelos configuração no formato 2-1-1-1, sendo o conjunto de duas subestações SUB3+SUB4 e os outros formados por SUB1, SUB2 e SUB5, separadamente, que é a Configuração 6, com uma redução de 17,71%. Porém, a Configuração 2, melhor em compensações e DEC neste cenário, vem logo em seguida, com uma redução de 15,68%, sendo então definida como a melhor configuração para o Cenário 4.

5.2.5 Cenário 5

Considerando o Cenário 5, os valores calculados de DEC médio para a configuração que considera cada conjunto sendo formado por uma das subestações em estudo podem ser visualizados na Tabela 31.

Tabela 31 - Valores anuais de DEC médio considerando 5 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média DEC
1	17,52	16,91	23,10	29,66	21,80

Fonte: Autor.

Através da Tabela 31, comparando com a Tabela 22 é possível visualizar que ocorreu uma redução de 11,81% no valor de DEC médio para o Cenário 5, passando de 24,72 para 21,80.

E na tabela Tabela 32 estão os valores anuais referentes ao FEC médio, para o Cenário 5.

Tabela 32 - Valores anuais de FEC médio considerando 5 conjuntos

Configuração	2017	2018	2019	2020	Média DEC
1	10,60	11,95	12,45	14,73	12,43

Fonte: Autor.

Já no FEC médio para o Cenário 5, ocorreu uma redução de 7,51%, passando de 13,44 para 12,43 no valor médio considerando os quatro anos em estudo.

Após a demonstração de todos os resultados gerados pela metodologia proposta neste trabalho, os resultados serão sintetizados na próxima seção, de forma a facilitar a interpretação.

5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS: MELHORES CONFIGURAÇÕES

Nesta seção serão reunidos e demonstrados a melhor configuração de cada um dos cinco cenários, para cada item: compensações financeiras, DEC e FEC médios, de forma a propiciar a comparação entre os cenários.

5.3.1 Compensações Financeiras

Na Tabela 33 tem-se os resultados referentes às compensações financeiras da melhor configuração de cada cenário, ou seja, aquelas que resultaram em menor valor de compensações para os quatro anos em estudo.

Tabela 33 - Melhores configurações de cada Cenário, Compensações Financeiras

Cenário	Configuração	Valor total (R\$)	Diferença (R\$)	Diferença (%)
1	1	4.782.934,79	-4.183,90	-0,09
2	13	4.700.736,28	-86.382,41	-1,80
3	2	4.719.660,21	-67.458,48	-1,41
4	2	4.723.108,22	-64.010,47	-1,34
5	1	4.787.118,69	0,00	0,00

Fonte: Autor.

Nos Cenários 1 e 5, havia apenas uma configuração possível para cada um, onde no Cenário 1 são agrupadas as cinco subestações em apenas um conjunto e no Cenário 5 as cinco subestações representam um conjunto cada. São os dois piores cenários quando se trata de compensações financeiras, comparados às melhores configurações dos outros cenários. Sendo que o Cenário 1 resultou num valor total de R\$ 4.872.934,79 para os quatro anos em estudo, representando uma redução de aproximadamente 0,1% e o Cenário 5 totalizou R\$ 4.787.118,69, que é exatamente o valor da configuração original.

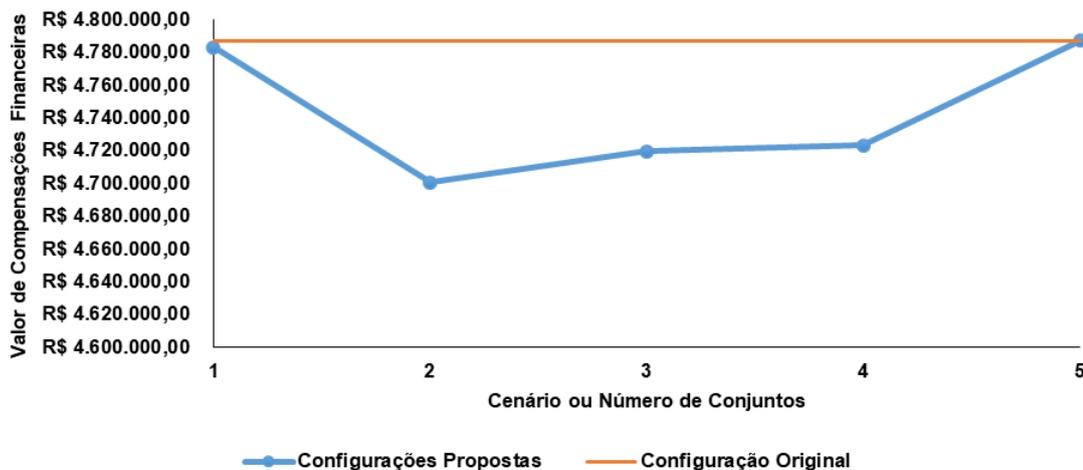
Como terceiro melhor cenário tem-se o Cenário 4, onde a Configuração 2 foi a que obteve o melhor resultado entre as configurações que consideraram quatro conjuntos, sendo formada da seguinte da seguinte maneira: (SUB1+SUB4), (SUB2), (SUB3) e (SUB5), totalizando um valor de R\$ 4.723.108,22, tendo uma redução de R\$ 64.010,47, o que representa em torno de 1,34% de redução de compensações financeiras para os quatro anos em estudo, comparando com a configuração original.

O Cenário 3, representado pela Configuração 2, tem o segundo melhor desempenho entre os cinco cenários, no que diz respeito às compensações financeiras, totalizando R\$ 4.719.660,21, o que representa uma redução de 1,41%, comparado à configuração original. A Configuração 2 do Cenário 3 é composta no formato 3-1-1, (SUB1+SUB2+SUB4), (SUB3) e (SUB5).

Já a melhor configuração, que obteve o menor resultado com compensações financeiras nos quatro anos, é a Configuração 13 do Cenário 2, possui formato 4-1, onde as subestações SUB1+SUB2+SUB4+SUB5 são agrupadas em um conjunto e o outro conjunto é formado pela SUB3. A redução total ficou em R\$ 86.382,41, representando 1,80%.

Para melhor visualização dos resultados, gerou-se o gráfico representado na Figura 18.

Figura 18 - Representação da melhor configuração de cada cenário - Compensações Financeiras



Fonte: Autor.

Na Figura 18, além dos resultados referentes às compensações financeiras das melhores configurações de cada cenário (em azul), tem-se a linha em laranja com o valor total da configuração original, para facilitar a comparação entre as configurações.

5.3.2 DEC Médio e FEC Médio

Assim como foi feito para as compensações financeiras na seção 5.3.1, foram selecionados os melhores resultados encontrados para a melhor configuração de cada cenário, em relação ao DEC médio e FEC médio.

Na Tabela 34 podem ser visualizados os resultados encontrados para o DEC médio.

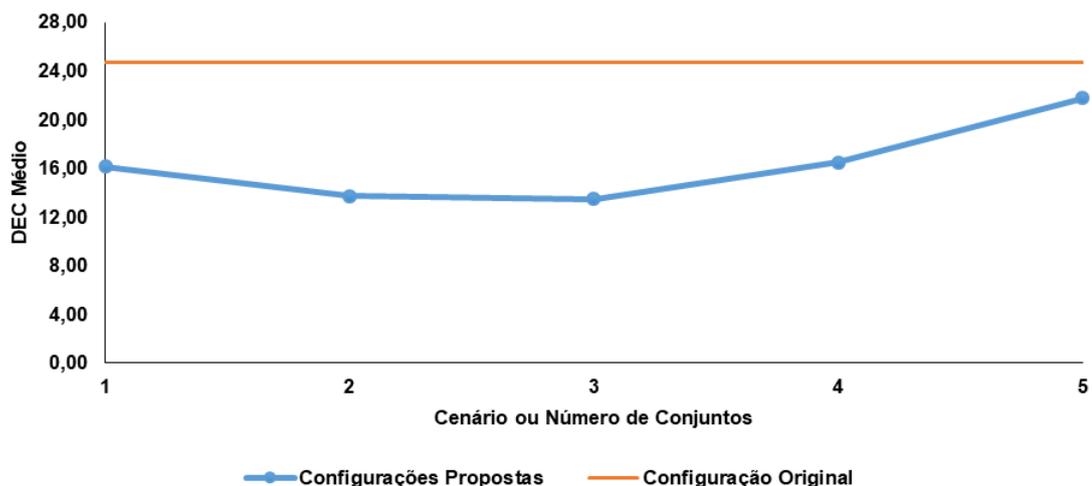
Tabela 34 - Melhores configurações de cada Cenário, DEC Médio

Cenário	Configuração	Valor médio	Diferença	Diferença (%)
1	1	16,14	-8,58	-34,70
2	15	13,74	-10,98	-44,43
3	4	13,50	-11,22	-45,39
4	2	16,51	-8,21	-33,22
5	1	21,80	-2,92	-11,81

Fonte: Autor.

Para melhor visualização dos resultados, foi criado o gráfico representado na Figura 19.

Figura 19 - Representação da melhor configuração de cada cenário – DEC médio



Fonte: Autor.

Analisando a Figura 19, nota-se que o DEC médio das configurações dos cinco cenários reduziram em relação à configuração original. Sendo os menores valores encontrados para o Cenário 3 e Cenário 2, com valores bem próximos, 45,39% e

44,43%, respectivamente. Já os outros três cenários apresentam valores de redução aproximados, sendo 34,71% para o Cenário 1, 33,22% para o Cenário 4 e 11,81% para o Cenário 5, que é o valor mais próximo ao valor original.

Na Tabela 35 podem ser visualizados os resultados encontrados para o FEC médio.

Tabela 35 - Melhores configurações de cada Cenário, FEC Médio

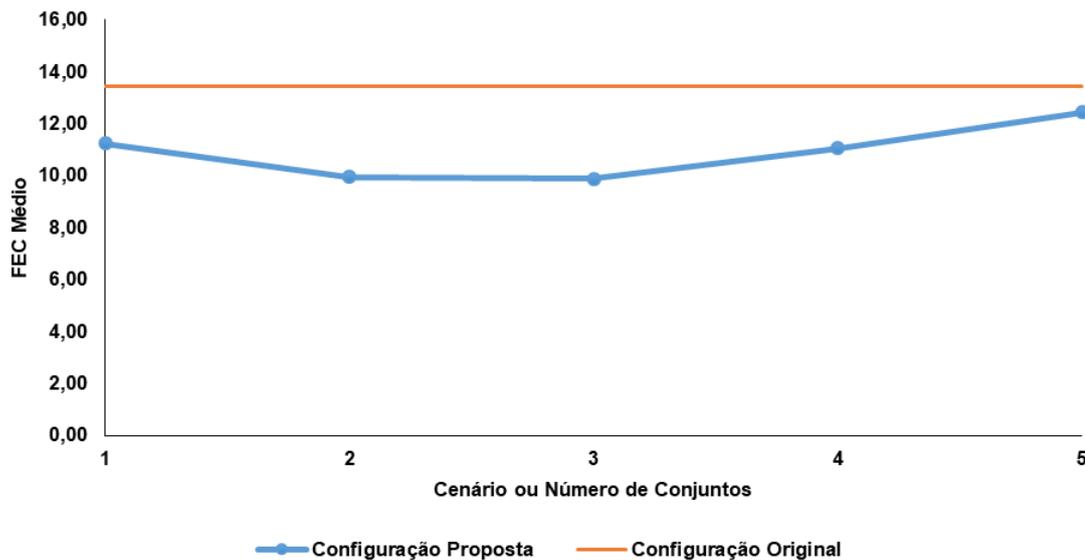
Cenário	Configuração	Valor médio	Diferença	Diferença (%)
1	1	11,24	-2,20	-16,40
2	12	9,95	-3,49	-25,97
3	4	9,88	-3,57	-26,52
4	6	11,06	-2,38	-17,71
5	1	12,43	-1,01	-7,51

Fonte: Autor.

Já nos resultados para o FEC médio, que podem ser visualizados na Figura 20, ocorreu redução em quatro cenários, em relação à configuração original. Ressalta-se que estão representadas as melhores configurações de cada cenário. O valor de 13,44 para o FEC médio da configuração original foi reduzido em 26,52% no Cenário 3 e 25,97% no Cenário 2. Os cenários com menores redução de valores foram o 4 com 17,71%. Cenário 1, com 16,40% de redução e por fim, o Cenário 5 com 7,51% de redução.

Para melhor visualização dos resultados, foi gerado o gráfico representado na Figura 20.

Figura 20 - Representação da melhor configuração de cada cenário – FEC médio



Fonte: Autor.

Como pode ser observado, de maneira geral, os Cenários 2 e 3 trazem os melhores resultados, sendo que para as compensações financeiras referentes aos indicadores de continuidade individuais (DIC, FIC e DMIC) no período mensal, o Cenário 2 tem uma leve vantagem em relação ao Cenário 3, com redução de 1,80% contra 1,41%, comparados à configuração original, o que representa em torno de R\$ 20.000,00 de diferença entre eles, considerando os quatro anos em estudo (2017 a 2020).

Já para os indicadores DEC e FEC, a situação se inverte, com o Cenário 3 resultando em menores valores quando comparados ao Cenário 2. Porém, a diferença novamente é pequena, pois para o DEC médio do Cenário 3 calculou-se o valor de 13,50, e para o Cenário 2, 13,74. Para o FEC médio, a diferença também foi mínima, sendo calculado 9,88 para o Cenário 3 e 9,95 para o Cenário 2.

Na próxima seção serão classificadas as configurações de maneira geral, de forma a encontrar qual a melhor configuração, considerando os três componentes: compensações financeiras, DEC e FEC.

5.3.3 Seleção das melhores Configurações

As configurações foram classificadas conforme os resultados encontrados para as compensações financeiras e apresentadas em forma ordenada na Tabela 36.

Tabela 36 - Ordenação das melhores configurações considerando as compensações financeiras

	Cenário	Configuração	Conjuntos	Diferença (R\$)	Diferença (%)
1º	2	13	(SUB3),(SUB1+SUB2+SUB4+SUB5)	-86.382,41	-1,80
2º	2	15	(SUB5),(SUB1+SUB2+SUB3+SUB4)	-81.640,07	-1,71
3º	3	2	(SUB1+SUB2+SUB4),(SUB3),(SUB5)	-67.458,48	-1,41
4º	4	2	(SUB1+SUB4),(SUB2),(SUB3),(SUB5)	-64.010,47	-1,34
5º	3	18	(SUB3),(SUB1+SUB4),(SUB2+SUB5)	-64.010,47	-1,34
6º	2	8	(SUB2+SUB3+SUB5),(SUB1+SUB4)	-55.793,68	-1,17
7º	2	12	(SUB2),(SUB1+SUB3+SUB4+SUB5)	-52.689,73	-1,10
8º	3	6	(SUB1+SUB4+SUB5),(SUB2),(SUB3)	-44.757,51	-0,93
9º	4	6	(SUB3+SUB4),(SUB1),(SUB2),(SUB5)	-37.843,75	-0,79
10º	3	16	(SUB2),(SUB1+SUB5),(SUB3+SUB4)	-37.843,75	-0,79
11º	3	23	(SUB5),(SUB1+SUB2),(SUB3+SUB4)	-37.843,75	-0,79
12º	3	13	(SUB1),(SUB2+SUB5),(SUB3+SUB4)	-37.843,75	-0,79
13º	2	3	(SUB1+SUB2+SUB5),(SUB3+SUB4)	-37.843,75	-0,79
14º	2	11	(SUB1),(SUB2+SUB3+SUB4+SUB5)	-36.173,73	-0,76
15º	3	9	(SUB2+SUB4+SUB5),(SUB1),(SUB3)	-30.519,91	-0,64
16º	2	1	(SUB1+SUB2+SUB3),(SUB4+SUB5)	-29.673,46	-0,62
17º	3	25	(SUB5),(SUB1+SUB4),(SUB2+SUB3)	-23.436,86	-0,49
18º	3	1	(SUB1+SUB2+SUB3),(SUB4),(SUB5)	-20.028,24	-0,42
19º	3	4	(SUB1+SUB3+SUB4),(SUB2),(SUB5)	-14.025,16	-0,29
20º	2	4	(SUB1+SUB3+SUB4),(SUB2+SUB5)	-14.025,16	-0,29
21º	4	8	(SUB4+SUB5),(SUB1),(SUB2),(SUB3)	-9.645,22	-0,20
22º	3	17	(SUB3),(SUB1+SUB2),(SUB4+SUB5)	-9.645,22	-0,20
23º	2	6	(SUB1+SUB4+SUB5),(SUB2+SUB3)	-4.183,90	-0,09
24º	1	1	(SUB1+SUB2+SUB3+SUB4+SUB5)	-4.183,90	-0,09
25º	2	2	(SUB1+SUB2+SUB4),(SUB3+SUB5)	-4.183,90	-0,09
26º	3	15	(SUB2),(SUB1+SUB4),(SUB3+SUB5)	-735,88	-0,02
27º	3	5	(SUB1+SUB3+SUB5),(SUB2),(SUB4)	-318,58	-0,01
28º	4	1	(SUB1+SUB2),(SUB3),(SUB4),(SUB5)	0,00	0,00
29º	5	1	(SUB1),(SUB2),(SUB3),(SUB4),(SUB5)	0,00	0,00
30º	4	5	(SUB2+SUB5),(SUB1),(SUB3),(SUB4)	0,00	0,00
31º	3	3	(SUB1+SUB2+SUB5),(SUB3),(SUB4)	0,00	0,00
32º	4	3	(SUB1+SUB5),(SUB2),(SUB3),(SUB4)	0,00	0,00
33º	3	7	(SUB2+SUB3+SUB4),(SUB1),(SUB5)	8.020,00	0,17
34º	2	7	(SUB2+SUB3+SUB4),(SUB1+SUB5)	8.020,00	0,17
35º	3	8	(SUB2+SUB3+SUB5),(SUB1),(SUB4)	8.216,78	0,17
36º	3	11	(SUB1),(SUB2+SUB3),(SUB4+SUB5)	30.928,39	0,65
37º	3	10	(SUB3+SUB4+SUB5),(SUB1),(SUB2)	40.340,08	0,84
38º	2	10	(SUB3+SUB4+SUB5),(SUB1+SUB2)	40.340,08	0,84
39º	4	4	(SUB2+SUB3),(SUB1),(SUB4),(SUB5)	40.573,61	0,85
40º	3	22	(SUB4),(SUB1+SUB5),(SUB2+SUB3)	40.573,61	0,85
41º	4	7	(SUB3+SUB5),(SUB1),(SUB2),(SUB4)	63.274,59	1,32
42º	3	20	(SUB4),(SUB1+SUB2),(SUB3+SUB5)	63.274,59	1,32
43º	2	14	(SUB4),(SUB1+SUB2+SUB3+SUB5)	72.672,04	1,52

Fonte: Autor.

Das 43 configurações propostas, 27 apresentam redução nos valores de compensações quando comparadas com a configuração original. Os valores de redução vão de 0,01% com a Configuração 5 do Cenário 3, até 1,80% (aproximadamente R\$ 86.000,00) com a Configuração 13 do Cenário 2.

Em contrapartida, 11 configurações apresentaram um aumento no valor de compensações, considerando os quatro anos em estudo, sendo o maior aumento representado pela Configuração 14 do Cenário 2, que considera o agrupamento das subestações SUB1, SUB2, SUB3 e SUB5 em um conjunto e a SUB4 forma o outro conjunto. No total foi um aumento de aproximadamente R\$ 70.000,00 (1,52%).

Além disso, cinco configurações não apresentaram diferença no valor de compensações, ou seja, obtiveram o mesmo resultado da configuração original. Isto é explicado pelo valor dos limites anuais do indicadores coletivos estarem na mesma faixa dos limites da configuração original. Inclusive, a Configuração 5 do Cenário 4 é igual à configuração original.

Conforme pode ser observado com os resultados da melhor configuração de cada cenário, para cada um dos itens (compensações financeiras, DEC médio e FEC médio), apresentados nas seções 5.3.1 e 5.3.2, há variações de configurações melhores classificadas.

De forma a definir a melhor configuração geral, foram selecionadas as cinco melhores configurações em compensações financeiras (Tabela 36), que resultaram em mais de 1,34% de redução e considerados os valores encontrados para o DEC médio e FEC médio de cada uma delas comparados com os valores da configuração original. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 37.

Tabela 37 - Melhores configurações considerando as compensações financeiras, DEC e FEC

	Cenário	Configuração	Diferença Compensações	Diferença DEC	Diferença FEC
1º	2	13	-1,80%	26,39%	7,05%
2º	2	15	-1,71%	-44,43%	-24,37%
3º	3	2	-1,41%	-27,93%	-9,84%
4º	4	2	-1,34%	-33,22%	-15,68%
5º	3	18	-1,34%	-24,61%	-8,39%

Fonte: Autor.

Nota-se, através da Tabela 37, que a melhor configuração no item compensações financeiras apresentou um aumento nos valores de DEC e FEC médios, quando comparados à configuração original.

Já a segunda melhor configuração, quando se trata de compensações financeiras, resultou em uma redução considerável de 44,43% no DEC médio e de 24,37% no FEC médio. São as maiores reduções entre as cinco configurações que estão na Tabela 37, sendo então considerada a melhor entre as 43 configurações propostas neste trabalho.

Após essa síntese, na próxima seção serão apresentados os resultados encontrados para a melhor configuração, entre todos os cenários, considerando a minimização dos três itens: compensações financeiras, DEC médio e FEC médio, também de forma a ilustrar como se dá a saída do algoritmo desenvolvido.

5.4 RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A MELHOR CONFIGURAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados para a melhor configuração através da aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho.

Considerando uma análise geral para os três itens, (1) Compensações Financeiras, (2) DEC médio e (3) FEC médio, a Configuração 15 do Cenário 2 é considerada a melhor entre as 43 configurações estudadas. Esta configuração considera o agrupamento das subestações SUB1+SUB2+SUB3+SUB4, sendo que a outra subestação (SUB5) forma o outro conjunto, totalizando dois conjuntos, no formato 4-1.

Mesmo não estando como melhor resultado em nenhum dos três itens, conforme síntese apresentada na seção 5.3, essa configuração apresenta resultados muito próximos do melhor resultado geral de cada item. No item compensações financeiras, foi a 2ª melhor configuração no geral. No DEC médio, a 3ª melhor configuração e no FEC médio a 4ª melhor entre as 43 configurações.

Na saída do código, como resultado, tem-se as seguintes variáveis:

- CONJ: número do conjunto;
- NUM_UCS: número de unidades consumidoras vinculadas ao conjunto;
- SOMA_DIC: somatório do DIC mensal apurado para as unidades consumidoras vinculadas ao conjunto;
- SOMA_FIC: somatório do FIC mensal apurado para as unidades consumidoras vinculadas ao conjunto;

- SOMA_COMPENS: valor total de compensações financeiras (DIC, FIC e DMIC) creditadas na fatura das unidades consumidoras daquele conjunto, período mensal;
- DEC: indicador DEC apurado para aquele conjunto;
- FEC: indicador FEC apurado para aquele conjunto.

Observa-se que a numeração dos conjuntos, representados na primeira coluna das tabelas seguintes, foram definidas de forma a facilitar a identificação de formação de novo, conjunto, partindo de um número genérico definido como 18000. No caso da Configuração 15 do Cenário 2, o conjunto 18000 representa o novo conjunto formado pelo agrupamento das subestações SUB1+SUB2+SUB3+SUB4 em um conjunto. Já o conjunto 18001 é formado pelas unidades consumidoras atendidas pela subestação SUB5.

Na Tabela 38 podem ser visualizados os resultados para o ano de 2017.

Tabela 38 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2017

CONJ	NUM_UCS	SOMA_DIC	SOMA_FIC	SOMA_COMPENS	DEC	FEC
18000	14.316	113.849,86	113.688,00	R\$ 29.438,61	7,95	7,94
18001	155.906	2.216.666,21	1.546.833,00	R\$ 935.707,98	14,22	9,92
Total	170.222	2.330.516,07	1.660.521,00	R\$ 965.146,59	11,09	8,93

Fonte: Autor.

No ano de 2017 foi alcançada uma redução total de R\$ 23.059,81 no valor de compensações, representando 2,33% em comparação com o cenário original para o ano de 2017. Essa redução está diretamente ligada ao conjunto 18001 que totalizou R\$ 935.707,98. Este conjunto é formado pelo agrupamento das subestações SUB1+SUB2+SUB3+SUB4, onde na configuração original a soma das compensações destas subestações totalizou R\$ 958.767,79.

Em relação ao DEC e FEC médios, reduziram de 20,07 e 11,43 do cenário original para 11,09 e 8,93 na Configuração 15 do Cenário 2, totalizando uma redução de 44,77% para o DEC médio e de 21,85% para o FEC médio.

Os resultados para o ano de 2018 podem ser verificados na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2018

CONJ	NUM_UCS	SOMA_DIC	SOMA_FIC	SOMA_COMPENS	DEC	FEC
18000	27.359	309.379,39	254.969,00	R\$ 165.290,36	11,31	9,32
18001	153.770	2.137.788,74	1.637.246,00	R\$ 823.304,35	13,90	10,65
Total	181.129	2.447.168,13	1.892.215,00	R\$ 988.594,71	12,61	9,98

Fonte: Autor.

Neste caso, apresentado na Tabela 39, a redução total em compensações foi de 1,37% quando comparado com a configuração original, totalizando R\$ 13.712,47. Esta redução também é fruto do novo conjunto formado, onde tem-se um valor de R\$ 823.304,35. Na original, as subestações SUB1+SUB2+SUB3+SUB4 totalizaram R\$ 837.016,82 em compensações financeiras por violação dos limites dos indicadores de continuidade individuais DIC, FIC e DMIC, período mensal.

Os valores de DEC e FEC médios para o ano de 2018, resultantes da Configuração 15 do Cenário 2 são, respectivamente, 12,61 e 9,98. Sendo os valores da configuração original 18,67 e 12,91, tem-se uma redução de 6,06 para o DEC médio e de 2,93 para o FEC médio.

Na Tabela 40 estão disponibilizados os resultados calculados para a Configuração 15 do Cenário 2, no ano de 2019.

Tabela 40 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2019

CONJ	NUM_UCS	SOMA_DIC	SOMA_FIC	SOMA_COMPENS	DEC	FEC
18000	28.898	348.036,73	283.201,00	R\$ 115.324,14	12,04	9,80
18001	156.152	2.562.857,29	1.681.654,00	R\$ 942.832,65	16,41	10,77
Total	185.050	2.910.894,02	1.964.855,00	R\$ 1.058.156,79	14,23	10,28

Fonte: Autor.

Os valores de compensações para o ano de 2019 foram reduzidos de R\$ 1.083.477,35 da configuração original para R\$ 1.058.156,79 da Configuração 15, representando uma redução de aproximadamente 2,34%, sendo o ano em que a maior redução foi obtida para esta configuração.

Tratando-se dos valores de DEC e FEC médios para o ano de 2019, reduziram de 26,39 e 13,52 da configuração original para 14,26 e 10,28 no Cenário 2, totalizando uma redução significativa de 46% para o DEC médio e de 23,92% para o FEC médio.

Na Tabela 41 podem ser observados os resultados da Configuração 15 para o ano de 2020.

Tabela 41 - Resultados compensações mensais para a Configuração 15 do Cenário 2. Ano 2020

CONJ	NUM_UCS	SOMA_DIC	SOMA_FIC	SOMA_COMPENS	DEC	FEC
18000	25.442	371.885,87	270.214,00	R\$ 127.868,25	14,62	10,62
18001	151.109	2.935.544,25	1.861.624,00	R\$ 1.565.712,28	19,43	12,32
Total	176.551	3.307.430,12	2.131.838,00	R\$ 1.693.580,53	17,02	11,47

Fonte: Autor.

Em contrapartida ao que foi apresentado no ano de 2019, no ano de 2020 obteve-se o menor valor percentual de redução de compensações, 1,14%, totalizando R\$ 19.547,23. O valor total calculado para a Configuração 15 foi de R\$ 1.693.580,53, enquanto que na configuração original é R\$ 1.713.127,76.

No que diz respeito ao DEC e FEC médios, em 2020 obteve-se uma redução de 16,72 e 4,45, respectivamente, passando o DEC médio original de 33,74 para 17,02 e o FEC médio de 15,92 para 11,47.

Na Tabela 42 foram reunidos os valores totais de compensações financeiras, considerando indicadores DIC, FIC e DMIC, período mensal, de forma a facilitar a comparação entre os valores calculados para configuração original e para a nova configuração proposta (Configuração 15 do Cenário 2 - agrupamento das subestações SUB1+SUB2+SUB3+SUB4, sendo o outro conjunto formado por SUB5).

Tabela 42 - Comparação de valores de compensações financeiras por ano

Ano	Configuração original	Configuração 15 do Cenário 2
2017	R\$ 988.206,40	R\$ 965.146,59
2018	R\$ 1.002.307,18	R\$ 988.594,71
2019	R\$ 1.083.477,35	R\$ 1.058.156,79
2020	R\$ 1.713.127,76	R\$ 1.693.580,53
Total	R\$ 4.787.118,69	R\$ 4.705.478,62

Fonte: Autor.

Analisando os resultados encontrados, com a nova configuração, tem-se uma redução total de R\$ 81.640,07 de compensações financeiras, período mensal, considerando os indicadores de continuidade individuais DIC, FIC e DMIC, que

representa em torno de 1,71% de redução no valor de compensações para o período em estudo (2017 a 2020). No quesito compensações, esta configuração é a segunda melhor entre as 43 configurações, com uma pequena diferença para a melhor (Configuração 13, do Cenário 2), que resultou em uma redução total de 1,80%, tendo uma pequena diferença em torno de R\$ 5.000,00 entre elas.

Em relação ao DEC médio, a Configuração 15 (Cenário 2) resultou no terceiro menor valor no geral, sendo que as duas primeiras são do Cenário 3, Configuração 4 e Configuração 7. Com a Configuração 4 do Cenário 3, obteve-se um DEC médio, para os quatro anos, de 13,50, enquanto que a Configuração 15 do Cenário 2 resultou em 13,74.

Já no indicador FEC médio, considerando os quatro anos em estudo, a Configuração 15 (Cenário 2) resultou no quarto menor valor no geral, sendo que as três primeiras são: Configuração 4 do Cenário 3, Configuração 12 do Cenário 2 e Configuração 7 do Cenário 3. Porém, a diferença do FEC médio da Configuração 15 (Cenário 2) para a melhor configuração (4, Cenário 3) é de apenas 0,29, o que valida a Configuração 15 do Cenário 2 como a melhor configuração, analisando de uma maneira geral.

Para facilitar a comparação entre a Configuração 15 do Cenário 2 com a Configuração Original, na Tabela 43 foram reunidos os valores calculados para DEC e FEC médios.

Tabela 43 - Comparação de valores de DEC e FEC médios por ano

Ano	DEC médio		FEC médio	
	Configuração Original	Configuração 15 do Cenário 2	Configuração Original	Configuração 15 do Cenário 2
2017	20,07	11,09	11,43	8,93
2018	18,67	12,61	12,91	9,98
2019	26,39	14,23	13,52	10,28
2020	33,74	17,02	15,92	11,47
Média	24,72	13,74	13,44	10,17

Fonte: Autor.

Após a demonstração dos resultados detalhados da melhor entre as 43 configurações propostas, referentes às compensações financeiras, DEC e FEC médios, serão feitas as considerações finais do trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia baseada em uma modelagem desenvolvida para o cálculo das compensações financeiras e indicadores coletivos, de acordo com novas configurações de conjuntos de unidades consumidoras, respeitando o critério de contiguidade de áreas definido pela ANEEL.

Essas compensações são creditadas diretamente na fatura das unidades consumidoras caso os limites dos indicadores de continuidade individuais sejam violados, com prazo máximo de dois meses subsequentes ao mês de referência da violação. Os limites dos indicadores e valores de compensações financeiras são definidos pela ANEEL, através do Módulo 8 do PRODIST, com a finalidade de melhorar a qualidade no fornecimento de energia elétrica, visto que estimula a competitividade entre as concessionárias do País.

O estudo foi aplicado com dados reais de histórico de consumidores disponibilizados por uma concessionária que atende consumidores no Rio Grande do Sul, onde para o período em estudo (2017 a 2020) tem-se quatro conjuntos, com cinco subestações. Inicialmente, cada subestação foi considerada como sendo um conjunto, possibilitando a proposta de cenários e configurações. Os cenários foram definidos de acordo com a definição do número desejado de conjuntos, onde o máximo de conjuntos é igual ao número máximo de subestações.

Então, para este trabalho tem-se do Cenário 1 até o Cenário 5, onde cada um destes cenários possuem possibilidades de configurações, de acordo com o critério de contiguidade. Para utilização deste critério, foram construídas matrizes de contiguidade para cada Cenário, atribuindo o valor 1 quando as subestações tiverem áreas vizinhas e valor zero caso não forem vizinhas.

A partir disto, foram propostas 43 configurações de conjuntos possíveis, sendo 1 para o Cenário 1; 13 para o Cenário 2; 20 para o Cenário 3; 8 para o Cenário 4 e 1 para o Cenário 5, sendo os resultados obtidos para compensações financeiras, DEC e FEC médios comparados com os resultados da configuração original.

Como melhor configuração, de maneira geral, considerando os resultados obtidos para os três itens: compensações financeiras, DEC médio e FEC médio para os quatro anos em estudo, foi a Configuração 15 do Cenário 2, composta no formato 4-1, onde as subestações SUB1, SUB2, SUB3 e SUB4 foram agrupadas em um único conjunto e a SUB5 formou o outro conjunto. Mesmo não tendo o melhor resultado em

nenhum dos três itens (compensações, DEC e FEC médios), esta configuração foi definida como a melhor entre as 43 possíveis, por conta do equilíbrio entre os três itens, sendo a segunda melhor para compensações financeiras, com uma redução de 1,71% comparada à configuração original.

Em relação ao DEC médio, a Configuração 15 (Cenário 2) resultou no terceiro menor valor no geral, obtendo uma redução de 44,43% em relação à configuração original. E por fim, para indicador FEC médio, a Configuração 15 resultou no quarto menor valor no geral, contabilizando uma redução de 24,37%.

Destaca-se a possibilidade de ganhos futuros, com uma simples reconfiguração de conjuntos, levando em conta o critério de contiguidade, conforme consta no Módulo 8 do PRODIST, sem necessidade de investimento.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para continuidade deste trabalho, alguns tópicos ainda podem ser explorados, aprimorando o algoritmo desenvolvido:

- Considerar o critério de número de unidades consumidoras para a formação de conjuntos, juntamente como o critério de contiguidade de áreas;
- Considerar os períodos trimestral e anual para cálculo das compensações financeiras;
- Aplicar o método dinâmico para cálculo dos limites dos indicadores coletivos para os novos conjuntos formados;
- Considerar o indicador individual DICRI, juntamente com os outros já aplicados neste trabalho, para cálculo das compensações financeiras;
- Expandir a quantidade de conjuntos, subestações e unidades consumidoras a serem analisadas;
- Adequar a metodologia para cálculo de compensações financeiras, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL N° 956, de 7 de dezembro de 2021, possibilitando a aplicação de dados a partir de 2022.

6.2 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Durante o período de execução do curso de Mestrado, foram desenvolvidos e publicados os seguintes trabalhos científicos vinculados à essa Dissertação:

Artigo publicado em periódico internacional:

- GOMES, T. E. O; BORNIAATTI, A. R.; GARCIA, V. J.; SANTOS, L. L. C. dos; NETO, N. K.; GARCIA, R. A. F. Clustering Electrical Customers with Source Power and Aggregation Constraints: A Reliability-Based Approach in Power Distribution Systems. *Energies* 2023, v. 16, p. 2485. <https://doi.org/10.3390/en16052485>.

Registro de Programa de Computador:

- KNAK NETO, N.; SANTOS, L. L. C. dos; GARCIA, V. J.; BORNIAATTI, A. R.; GARCIA, R. A. F; DE TONI, J. L. Cálculo de compensações financeiras e indicadores de desempenho com base em uma configuração de agrupamento de subestações. 2022. Código INPI: BR512022002638-4.

Artigos publicados em congresso nacional:

- BORNIAATTI, A. R.; GARCIA, V. J.; PEREIRA, W. L.; SANTOS, L. L. C. dos; NETO, N. K.; GARCIA, R. A. F. Impacto nas compensações financeiras considerando nova configuração de conjuntos de unidades consumidoras de uma distribuidora de energia elétrica. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022.
- PEREIRA, W. L.; GARCIA, V. J.; BORNIAATTI, A. R.; SANTOS, L. L. C. dos; NETO, N. K.; GARCIA, R. A. F. Metodologia para reconfiguração de conjuntos de consumidores de acordo com a contiguidade de áreas. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasília). **Setor Elétrico**. Redes de Energia Elétrica. 2021. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 956**, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>. Acesso em: 11 ago. 2022.
- _____. **Resolução Normativa Nº 395**, 2009. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009395.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.
- _____. **Resolução Normativa Nº 424**, 2010. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010424.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.
- _____. **Resolução Normativa Nº 432**, 2011. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2011432.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.
- _____. **Resolução Normativa Nº 871**, 2020. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020871.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.
- _____. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- _____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST. 2016. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/prodist>. Acesso em: 14 ago. 2020.
- _____. _____. **Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/modulo-8>. Acesso em: 11 ago. 2020.
- _____. _____. **Módulo 8 Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 04 fev. 2023.
- _____. _____. **Módulo 6 Informações Requeridas e Obrigações**. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/modulo-6>. Acesso em: 12 ago. 2020.
- _____. **ANEEL divulga desempenho e ranking das distribuidoras sobre fornecimento de energia em 2021**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-divulga-desempenho-e-ranking-das-distribuidoras-sobre-fornecimento-de-energia-em-2021>. Acesso em: 11 mar. 2023.

ANTENEH, Degarege; KHAN, Baseem; MAHELA, Om Prakash; ALHELOU, Hassan Haes; GUERRERO, Josep M. Distribution network reliability enhancement and power loss reduction by optimal network reconfiguration. **Computers & Electrical Engineering**. 2021, 96, 107518.

ARAÚJO, Renato José Pino de. **Otimização de desempenho de indicadores de continuidade do serviço em concessionárias de distribuição utilizando algoritmos evolutivos**. 2011. 154 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BANERJEE, Avishek; CHATTOPADHYAY, Samiran; GAVRILAS, Mihai; GRIGORAS, Gheorghe. G. Optimization and estimation of reliability indices and cost of Power Distribution System of an urban area by a noble fuzzy-hybrid algorithm. **Applied Soft Computing**. 2021, 102, 107078.

BARBOSA, Ailson de Souza. **Método para a Avaliação da Qualidade dos Serviços Prestados pelas Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica – Aspectos técnicos e comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 2018.

BARBOSA, Ailson de Souza; SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. A multi-criteria decision analysis method for regulatory evaluation of electricity distribution service quality. **Utilities Policy**, v. 53, p. 38–48, 2018.

BENÍTEZ, Ignacio; QUIJANO, Alfredo; DÍEZ, José-Luis.; DELGADO, Ignacio. Dynamic clustering segmentation applied to load profiles of energy consumption from Spanish customers. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**. 55, 437–448. 2014.

DETRICH, Václav; SKALA, Petr; MATONOHA, Karel; SPACEK, Zdeněk; GÖHLER, Miloš; BLAZEK, Vladimír. Modeling of supply interruptions in MV cable distribution networks for a more accurate estimation of the cost of penalty payments. **IEEE Transactions on Power Systems**. 21, 605–610. 2006.

DIAS, Evaldo Baldin. **Avaliação de Indicadores de Continuidade e seu Impacto no Planejamento de Sistemas de Distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2002.

FALABRETTI, Davide; SABBATINI, Gianluca. A new clustering method for the optimization of distribution networks layout considering energy efficiency and continuity of service. **Sustainable Energy Grids & Networks**. 2022, 30, 100654.

FUMAGALLI, Elena; SCHIAVO, Luca; DELESTRE, Florence. **Service quality regulation in electricity distribution and retail**. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2007.

GUIMARÃES, Iochane Garcia; BERNARDON, Daniel Pinheiro; GARCIA, Vinícius Jacques; SCHMITZ, Magdiel; PFITSCHER, Luciano Lopes. A decomposition heuristic algorithm for dynamic reconfiguration after contingency situations in distribution systems considering island operations. **Electric Power Systems Research**. 2021, 192, 106969.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Áreas Territoriais**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios>. 2021. Acesso em: 24 fev. 2023.

JAFARI, Amirreza; GANJEH GANJEHLOU, Hamed; BAGHAL DARBANDI, Farzad; MOHAMMDI-IVATLOO, Behnam; ABAPOUR, Mehdi. Dynamic and multi-objective reconfiguration of distribution network using a novel hybrid algorithm with parallel processing capability. **Applied Soft Computing**. 2020, 90, 1–20.

JIANG, Zhengbang; WU, Hao; ZHAN, Zhenbing. Compound substation characteristics analysis based on multi-objective model and cluster-correct algorithm. **Electric Power Systems Research**. 2019, 175, 105880.

KNAK, Nelson Neto. **Sistema Multivariável para Avaliação de Desempenho e Estabelecimento de Limites de Continuidade de Fornecimento de Energia Utilizando a Lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

LIN, Sung-Chiang; CHEN, Chih-Jou.; LEE, Tsung-Ju. A Multi-Label Classification with Hybrid Label-Based Meta-Learning Method in Internet of Things. **IEEE Access**. 2020, 8, 42261–42269.

MAGALHÃES, Emerson Felipe Araujo. **Modelagem e Simulação de Indicadores de Continuidade**: Ferramenta auxiliar para a manutenção em redes de distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2017.

PEYGHAMI, Saeed; PALENSKY, Peter; BLAABJERG, Frede. An Overview on the Reliability of Modern Power Electronic Based Power Systems. **IEEE Open Journal of Power Electronics**. 1, 34–50. 2020.

PÉREZ, Jenny Paola Gonzales. **Proposta de Procedimentos para o Estabelecimento de Metas de Qualidade do Serviço de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

PÉREZ, Jenny Paola Gonzales. **Qualidade do Serviço de Distribuição de Energia Elétrica**: Indicadores, Limites, Compensações e Incentivos Regulatórios. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2017.

PESSANHA, José Francisco Moreira; SOUZA, Reinaldo Castro; LAURENCEL, Luiz da Costa. **Utilizando a análise envoltória de dados na regulação da continuidade do fornecimento de energia elétrica**. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2005.

RESENDE, Marcelo; CARDOSO, Vicente. Mapping service quality in electricity distribution: An exploratory study of Brazil. **Utilities Policy**, v. 56, p. 41–52, 2019.

RIBEIRO, Viviane Pires. **Análise da Persistência dos Indicadores de Continuidade do Fornecimento de Energia Elétrica da CELG-D**. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, PE, 2018.

SANTOS, Fábio Corrêa dos. **Metodologia de Auxílio na Tomada de Decisão na Formação de Conjuntos de Unidades Consumidoras de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, PA, 2010.

SILVA, Leonardo Nogueira Fontoura da; ABAIDE, Alzenira da Rosa; BERNARDON, Daniel Pinheiro; NETO, Nelson Knak; MARTINS, A. A.; CANHA, Luciane Neves **Methodology for adjustment of limits of power supply continuity by Linear Programming**. 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, pp. 1-6. 2013.

SPERANDIO, Mauricio. **Classificação de Conjuntos Consumidores de Energia Elétrica Via Mapas Auto-Organizáveis e Estatística Multivariada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.

TANURE, J. E. P. S. **Análise comparativa de empresas de distribuição para o estabelecimento de metas de desempenho para indicadores de continuidade do serviço de distribuição**. 2000. 160p. Dissertação. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.

TUR, Mehmet Rida. Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique. **IEEE Access**. 2020, 8, 77962–77971.