Análise de Métodos de Agrupamento Aplicados na Definição de Limites dos Indicadores de Continuidade

Leonardo da Silveira * **Jaderson Rosa dos Santos** *
Laura Lisiane Callai dos Santos * **Rui Anderson Ferrarezi Garcia** **

* *Universidade Federal de Santa Maria, RS,*
(e-mail: leonardo.silveira@acad.ufsm.br, jaderson.santos@acad.ufsm.br, laura.santos@ufsm.br).
** *Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica, RS,*
(e-mail: ruifg@ceee.equatorialenergia.com.br).

Abstract: In the context of electricity distribution in Brazil, the National Electric Energy Agency (ANEEL) is responsible for regulating and inspecting the performance of companies. The quality of services provided by distributors is measured by indicators of continuity of supply, to which performance limits are defined using a comparative analysis methodology. The premise of this methodology is that similar sets of consumer units must have equivalent performance. Such similarity between sets is defined by attributes, which describe characteristics of the electric distribution system and the consumer market. This work analyzes the step of grouping sets of the current model used by ANEEL for calculating the limits of the DEC and FEC indicators. The limits for different case studies are calculated, in which the selected attributes, the grouping method and the adopted parameters are varied. Then, the sensitivity of variations is analyzed through the limits calculated in each case study. As main results, it was observed a greater sensitivity for variation of attributes and of the clustering method and a lower sensitivity for variation of the parameters of the dynamic method.

Resumo: No contexto da distribuição de energia elétrica no Brasil, cabe a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regular e fiscalizar a atuação das empresas. A qualidade dos serviços prestados pelas distribuidoras é mensurada por indicadores de continuidade do fornecimento, aos quais são definidos limites de desempenho por meio de uma metodologia de análise comparativa. A premissa dessa metodologia é a de que os conjuntos de unidades consumidoras semelhantes devem possuir desempenhos equivalentes. Tal semelhança entre conjuntos é definida por atributos, que descrevem características do sistema elétrico de distribuição e do mercado consumidor. Este trabalho analisa a etapa de agrupamento de conjuntos do modelo atual de cálculo de limites dos indicadores DEC e FEC empregado pela ANEEL. Calculam-se os limites para diferentes estudos de caso, em que são variados os atributos selecionados, o método de agrupamento e os parâmetros adotados. Então, é analisada a sensibilidade das variações por meio dos limites calculados em cada estudo de caso. Como principais resultados, observou-se uma maior sensibilidade para variação dos atributos e do método de *clustering* e uma menor sensibilidade para variação dos parâmetros do método dinâmico.

Keywords: Service quality; Continuity; Indicators; Clustering; Limits.
Palavras-chaves: Qualidade do serviço; Continuidade; Indicadores; Agrupamento; Limites.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil o segmento de distribuição de energia elétrica é regulado e fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe à ANEEL propiciar as condições favoráveis ao desenvolvimento equilibrado do mercado brasileiro de energia, por meio da regulamentação dos serviços prestados pelas distribuidoras (Brasil, 1997). Dentre os mecanismos de regulação elaborados pela ANEEL, estão os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Constituem o PRODIST onze módulos, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (Tanure, 2004).

No Módulo 8 do PRODIST, são abordados os procedimentos relacionados à qualidade do produto, à qualidade do serviço prestado e à qualidade do tratamento de reclamações. No que tange à qualidade do serviço, são definidos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica individuais e coletivos. A ANEEL utiliza os indicadores coletivos para analisar o desempenho dos conjuntos de unidades consumidoras, além do desempenho das distribuidoras, estados, regiões e do país (ANEEL, 2021).

Os indicadores de continuidade coletivos são apurados para cada conjunto de unidades consumidoras (UC). Um conjunto é caracterizado pelo agrupamento de UC atendidas por uma ou mais subestações de distribuição. São dois os indicadores coletivos:

- DEC – duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, calculado por (1) e
- FEC – frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, obtido por (2).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{NUC} DIC(i)}{NUC} \tag{1}$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{NUC} FIC(i)}{NUC} \tag{2}$$

Em que:

i: Índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;

NUC: 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.

Para ambos os indicadores, são instituídos limites, os quais são definidos para cada conjunto por meio de uma metodologia de análise comparativa de desempenho. Nessa metodologia cada conjunto é comparado com outros conjuntos semelhantes a ele, os quais são selecionados pelo método dinâmico de clusterização (ANEEL, 2016).

Como objetivo deste trabalho, realiza-se uma análise comparativa de diferentes formas de agrupamento de conjuntos de unidades consumidoras aplicadas ao estabelecimento de limites dos indicadores coletivos de continuidade de energia elétrica. Avalia-se o comportamento dos limites de DEC e FEC globais e por conjunto em diferentes cenários propostos e observa-se em quais cenários há uma maior ou menor variação dos limites calculados e se essa variação é positiva ou negativa. Dessa forma, infere-se quais são os parâmetros da metodologia capazes de alterar mais significativamente os resultados.

2. METODOLOGIA DE ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO

A metodologia atual de análise comparativa de desempenho objetiva criar um ambiente competitivo entre as empresas distribuidoras. A premissa básica da metodologia é a de que conjuntos semelhantes devem apresentar desempenho equivalente. O procedimento é descrito na Nota Técnica nº 0102/2014-SRD/ANEEL (ANEEL, 2014).

Dessa forma, para cada conjunto elétrico, são definidos limites anuais para os indicadores DEC e FEC. A partir desses, estabelecem-se os limites dos indicadores de continuidade individuais. O não cumprimento dos limites por UC implica compensações financeiras aos clientes prejudicados (ANEEL, 2021).

O método consiste em agrupar conjuntos semelhantes de UC em função de suas características. Os atributos empregados foram selecionados pela ANEEL, utilizando a metodologia de análise comparativa, por meio de análises de correlações e aplicando-se uma técnica estatística de regressão. Foram escolhidos os seis atributos mais relevantes para cada indicador, sendo que cinco são comuns a ambos os modelos. A Tabela 1 e a Tabela 2 mostram os atributos selecionados.

Tabela 1. Atributos DEC.

Sigla	Atributo
PC_NUC_AD	Percentual de NUC em áreas de alta densidade (%)
PC_VRAM	Percentual de área com vegetação remanescente alta ou média (%)
PC_ERMT_3F	Percentual de redes MT trifásicas (%)
PLUV	Precipitação pluviométrica média anual (mm)
CM_NUC_RES	Consumo médio por UC da classe residencial (MWh)
NUC_IND	NUC da classe industrial

Tabela 2. Atributos FEC.

Sigla	Atributo
PC_VRAM	Percentual de área com vegetação remanescente alta ou média (%)
PLUV	Precipitação pluviométrica média anual (mm)
PC_NUC_AD	Percentual de NUC em áreas de alta densidade (%)
NUC_COM	NUC da classe comercial
CM_NUC_RES	Consumo médio por UC da classe residencial (MWh)
PC_ERMT_3F	Percentual de redes MT trifásicas (%)

Os dados dos atributos são extraídos a partir das Bases de Dados Geográficas das Distribuidoras (BDGD), encaminhadas anualmente pelas empresas à ANEEL, além de bases de vegetação e de precipitação pluviométrica disponíveis.

Os conjuntos são comparados com outros conjuntos semelhantes utilizando-se o método dinâmico para clusterização.

2.1 Aplicação do Método Dinâmico

O método dinâmico tem como finalidade comparar cada conjunto com os conjuntos mais semelhantes a ele, em função de seus atributos. Aplica-se o método separadamente para cada indicador (DEC e FEC), considerando-se que há um atributo distinto dentre os seis escolhidos (ANEEL, 2016).

Inicialmente os seis atributos adotados são padronizados pelo *Z-score* (escore padrão), em que cada variável é transformada em uma nova variável com média zero e desvio padrão unitário, conforme (3).

$$x_{il} = \frac{x_{il}^{*} - m_l}{s_l}, i = 1, ..., N; l = 1, ..., d \tag{3}$$

Em que:

x^*_{il} = Dado original;

m_l = Média amostral do atributo l;

s_l = Desvio-padrão amostral do atributo l;

Adota-se, para a aplicação do método dinâmico, a distância euclidiana como medida de similaridade, conforme (4).

$$D(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^{d}(x_{il} - x_{jl})^2} \tag{4}$$

Em que:

x_i: Denota o conjunto i;

x_j: Denota o conjunto j;

j: Índice do atributo, que varia de 1 a d;

Assim calcula-se a distância entre cada conjunto para todos os conjuntos do Brasil. Destaca-se que conjuntos aéreos são comparados apenas com conjuntos aéreos. Da mesma forma, conjuntos subterrâneos apenas se comparam com conjuntos subterrâneos.

Em seguida, ordenam-se as distâncias de cada conjunto para os demais, de modo a se obter os n conjuntos mais próximos do conjunto em análise. Definiu-se que os conjuntos são comparados aos 100 conjuntos mais próximos, desde que se atenda a um limite de heterogeneidade entre eles.

A heterogeneidade percentual é definida por (5). Adota-se o limite de 20% para uma comparação adequada entre conjuntos.

$$Heterogeneidade_i^P = \frac{\sum_{j=1}^{n} Dist_i^j}{n \cdot 3\sqrt{k}} \tag{5}$$

Em que:

i: Índice do conjunto de referência;

j: Conjuntos próximos ao conjunto i;

$Dist_i^j$: Distância euclidiana do conjunto i para o conjunto j;

n: Número de conjuntos semelhantes ao conjunto i;

k: Número de atributos que caracterizam o conjunto i;

Conforme a metodologia da ANEEL, caso a heterogeneidade calculada supere 20% para o número ideal de conjuntos semelhantes, ou seja, n=100, os conjuntos mais distantes devem ser retirados da análise, até que o critério da heterogeneidade seja satisfeito. Entretanto define-se como 50 o número mínimo de conjuntos semelhantes, ainda que a heterogeneidade permaneça superior a 20%. Nesse caso, o conjunto em análise é classificado como um "conjunto heterogêneo" e recebe um tratamento particular.

A Tabela 3 apresenta os valores adotados para os parâmetros do método dinâmico.

Após definir os conjuntos semelhantes ao conjunto em análise, inicia-se a definição dos limites. Para cada agrupamento formado, a ANEEL define o valor de referência, que determina o limite objetivo a ser alcançado pelo conjunto analisado. Essa técnica é conhecida como *yardstick competition*. Nesta etapa os conjuntos semelhantes são ordenados pelos seus desempenhos, isto é, pelo indicador apurado. Considera-se a média dos desempenhos observados nos últimos três anos civis disponíveis.

Tabela 3. Parâmetros do Método Dinâmico.

Parâmetro	Valor
Heterogeneidade Percentual Máxima	20%
Mínimo de Conjuntos Semelhantes	50
Número Desejável de Conjuntos Semelhantes	100

Adota-se, como limite objetivo para conjuntos aéreos interligados, o percentil 20 do agrupamento. Para conjuntos subterrâneos, define-se o percentil 50. Dessa maneira, no caso de um agrupamento com 100 conjuntos, o percentil 20 trata-se do valor do indicador obtido pelo 20º colocado entre os conjuntos, do melhor para o pior. A posição do conjunto de referência é calculada por (6).

$$Posicão = \text{int}\left((N_{ConjSeme} - 1) * Percentil + 1)\right) \tag{6}$$

Em que:

$N_{ConjSeme}$: Número de conjuntos semelhantes do agrupamento;

Por fim, define-se um período de transição de oito anos, entre o limite atual estabelecido para o conjunto e o limite objetivo. A trajetória de limites é linear e é dada de acordo com (7).

$$L_t = \begin{cases} L_0 - t \cdot \left(\dfrac{L_0 - L_{obj}}{T}\right), & \text{se } L_0 > L_{obj} \\ L_0, & \text{se } L_0 \leq L_{obj} \end{cases} \tag{7}$$

Em que:

T: período de transição, considerado de 8 anos;

t: ano em que se deseja calcular o limite;

L_t: limite a ser calculado para o ano t;

L_0: último limite já estabelecido para o conjunto (limite atual);

L_{obj}: limite obtido aplicando-se o percentil (limite objetivo).

Posteriormente, são considerados outros fatores no cálculo dos limites de DEC e de FEC. Analisam-se os conjuntos heterogêneos, ou seja, aqueles cuja heterogeneidade percentual excede 20%. Avalia-se também a influência das interrupções de origem externa ao sistema de distribuição, chamadas interrupções do suprimento. Ainda, são avaliadas as trajetórias de redução consideradas intensas, para que sejam graduais e factíveis.

Historicamente, a ANEEL realiza o agrupamento de conjuntos na definição de limites de DEC e FEC por meio de técnicas de *clustering*. Neste trabalho, são explorados três desses métodos, os quais são apresentados na próxima seção.

3. ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

A análise de agrupamentos, também chamada de clusterização, representa um conjunto de técnicas exploratórias aplicadas para se verificar a existência de comportamentos semelhantes entre observações (indivíduos, objetos) em relação a determinadas variáveis. O objetivo principal é o de se formar grupos, ou *clusters*, em que prevaleça a homogeneidade interna (Fávero and Belfiore, 2017).

Os métodos de agrupamento classificam-se, na essência, em hierárquicos e não hierárquicos. Os métodos não hierárquicos possibilitam formar uma quantidade pré-estabelecida de *clusters*, enquanto os métodos hierárquicos realizam uma sequência de agrupamentos sucessivos para classificar os dados em um número decrescente de *clusters* (Fávero and Belfiore, 2017).

Os elementos de um universo são agrupados com base na semelhança entre eles. Medidas de similaridade podem se referir à distância entre os membros de um *cluster*, à densidade de elementos em uma área do espaço ou, ainda, à conformidade das observações com distribuições estatísticas. Na maioria dos casos, aplica-se o método da distância euclidiana como medida de similaridade entre elementos (Tanure, 2000).

Nas últimas duas décadas, foram empregados, pela ANEEL, três métodos de clusterização diferentes na metodologia de cálculo dos limites: *k-means*, Ward e dinâmico.

3.1 Método de Ward

O método de Ward insere-se no contexto dos métodos hierárquicos de clusterização, os quais consistem em um processo iterativo no qual os elementos de um universo considerado são agregados um a um e de forma crescente, até a completa alocação de todos os elementos em um único cluster. Em outras palavras, tais técnicas consistem em se produzir uma série de agregações de k *clusters*, promovendo-se, em cada passo, a agregação de um dos elementos anteriores (Hair et al., 2009).

Utiliza-se, no método de Ward, o critério de menor erro, ou menor perda de informação, para se determinar a sequência de agrupamento a ser adotada. O erro é definido como o somatório dos quadrados das distâncias entre cada elemento dos dois *clusters* a serem agrupados e o valor central (centroide) do novo *cluster* formado (Hair et al., 2009).

Usualmente, os métodos hierárquicos são interpretados por uma representação em diagrama de árvore denominado dendograma, o qual é construído a partir dos erros causados pelas sucessivas agregações. Desse modo, o método de Ward é adequado quando se deseja analisar um pequeno conjunto de dados. Para a análise de um grande número de informações, esse método mostra-se demasiadamente trabalhoso.

3.2 Método k-means

O método de *clustering k-means* é uma técnica de agrupamento não hierárquico, que tem como objetivo encontrar as melhores combinações de elementos que formem um número previamente definido de *clusters* homogêneos. Classifica-se um universo de n elementos em k grupos, de forma que cada unidade pertença a um único grupo. Essa técnica trata-se de um algoritmo heurístico simples, iterativo e de rápida convergência (Tanure, 2000).

3.3 Método Dinâmico

Apesar das vantagens do método *k-means* frente ao método de Ward, ambos podem não ser adequados às análises de elementos localizados nas fronteiras entre os agrupamentos. *Outliers*, como são denominados esses elementos, tratam-se de observações atípicas, distantes dos seus respectivos centroides. Nesse sentido, o método de *cluster* dinâmico visa contornar tais problemas, visto que tem como premissa formar *clusters* independentes para cada elemento (Tanure, 2004).

A aplicação do método dinâmico requer o estabelecimento de um critério de corte para a distância entre o centroide e cada elemento. Pode-se, ainda, definir quantidades mínima e máxima de observações contidas em cada *cluster* (Tanure, 2004).

Os três métodos de clusterização abordados são empregados na metodologia proposta neste estudo.

4. METODOLOGIA

Neste trabalho objetiva-se analisar a etapa de agrupamento de conjuntos de UC, por meio de modificações do método de *clusterização* empregado, alterações dos atributos selecionados e variação dos parâmetros de entrada do método dinâmico. Esta metodologia se propõe a reproduzir aquela empregada pela ANEEL para o cálculo dos limites de DEC e FEC.

Almeja-se avaliar como tais mudanças refletem-se nos limites objetivos de cada conjunto. Para se alcançar os objetivos propostos, apresenta-se nesta seção uma metodologia composta por três etapas, cuja estrutura é exposta na Figura 1.

Na primeira etapa, são obtidos os dados de entrada necessários para o cálculo dos limites. Em seguida, na segunda etapa, realizam-se os agrupamentos dos conjuntos empregando-se as técnicas e parâmetros escolhidos. Na última etapa, são definidos os limites por conjunto e são analisados os resultados.

Devido à grande quantidade de operações matemáticas necessárias para a definição dos limites, desenvolveu-se uma rotina (*script*) em Matlab, que contempla desde a importação dos indicadores e atributos até a exportação dos limites objetivos por conjunto para uma planilha. Para a aplicação dos métodos *k-means* e Ward, foi empregada a *Statistics and Machine Learning Toolbox* contida no *software* Matlab.

O *script* foi validado utilizando-se bases de atributos e de indicadores disponibilizadas pela ANEEL por meio da Plataforma Integrada de Ouvidoria e Acesso à Informação da Controladoria-Geral da União (CGU). Foi cedida, ainda, a memória de cálculo dos limites da CEEE-D para o 5º Ciclo de Revisões Tarifárias Periódicas (5CRTP), o que possibilitou a comparação dos resultados.

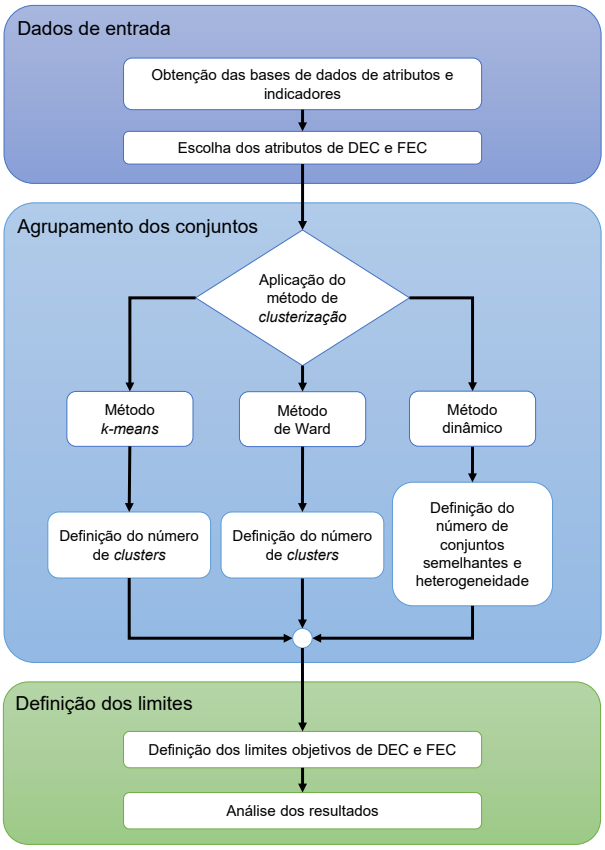

Figura 1. Estrutura da metodologia proposta de agrupamento de conjuntos.

Por fim, a análise dos resultados envolverá a comparação dos limites calculados em estudos de caso. Pretende-se verificar as variações observadas nos limites globais, que indicam se determinado cenário é mais ou menos favorável para a distribuidora do que outro. Observa-se também o comportamento dos limites por conjunto, por meio da contagem da quantidade de conjuntos que tiveram seus limites aumentados, reduzidos ou mantidos em relação a um cenário base.

A etapa seguinte deste trabalho consiste na proposição de estudos de caso, em que são feitas variações nos atributos, métodos e parâmetros, para se observar o comportamentos dos limites de DEC e FEC calculados.

5. ESTUDOS DE CASO E RESULTADOS

Nesta seção apresenta-se a aplicação da metodologia proposta na Figura 1 em estudos de caso. Para avaliar os resultados obtidos, escolheu-se analisar os 61 conjuntos da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D), cuja área de atuação e cujos conjuntos elétricos são mostrados na Figura 2. Cabe ressaltar que a metodologia pode ser igualmente aplicada a qualquer outra distribuidora do Brasil para o cálculo dos limites.

Para a aplicação da metodologia, as bases de dados dos indicadores e dos atributos dos conjuntos, que se referem aos dados de entrada, foram obtidas do Apêndice III da Nota Técnica nº 0102/2014-SRD/ANEEL (ANEEL, 2014). Optou-se por utilizar essa base, ainda que contenha dados antigos, por possuir dados de 146 atributos distintos para 2610 conjuntos. Assim podem ser realizados estudos de caso com diferentes combinações de atributos. Foram realizados ao todo sete cenários, nos quais foram variados os atributos selecionados para DEC e FEC, o método de *clusterização* empregado e seus parâmetros.

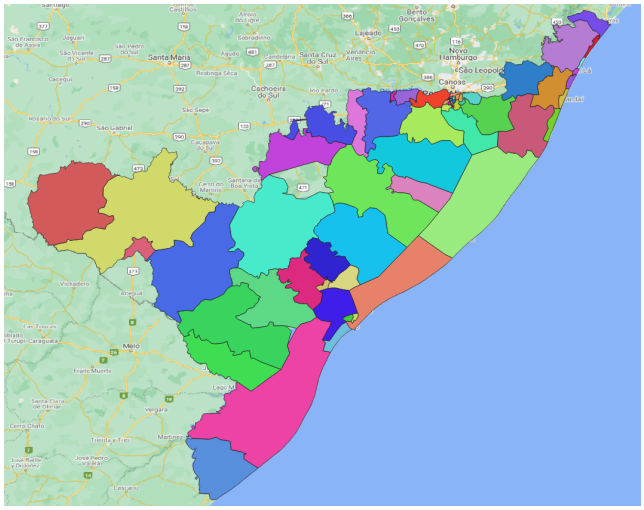

Figura 2. Áreas dos conjuntos da distribuidora CEEE-D em 2013.

A Tabela 4 mostra um resumo dos sete cenários. O primeiro cenário trata-se de um caso base, que visa replicar a metodologia de definição de limites utilizada pela ANEEL e é utilizado para comparação com os demais estudos de caso. Nos Cenários 2 e 3, modifica-se o método de agrupamento para *k-means* e Ward respectivamente, mantendo-se os mesmos atributos utilizados pela ANEEL. Nos Cenários 4, 5 e 6, é empregado o método dinâmico, porém se alteram os atributos selecionados. Por fim, no Cenário 7, são feitas alterações nos parâmetros do método dinâmico.

Na Tabela 4, os 7 atributos ANEEL referem-se aos cinco atributos comuns a ambos os modelos e dois independentes, um para DEC e outro para FEC.

Tabela 4. Resumo dos Cenários.

Cenário	Atributos	Agrupamento	Parâmetros
1	7 atributos ANEEL	Dinâmico	$n_{max} = 100$, $n_{min} = 50$, $h_{max} = 20\%$
2	7 atributos ANEEL	*k-means*	$k = 30$
3	7 atributos ANEEL	Ward	$k = 30$
4	Correlação = 40% VIF = 5	Dinâmico	$n_{max} = 100$, $n_{min} = 50$, $h_{max} = 20\%$
5	Correlação = 20% VIF = 3	Dinâmico	$n_{max} = 100$, $n_{min} = 50$, $h_{max} = 20\%$
6	Densidade de UC	Dinâmico	$n_{max} = 100$, $n_{min} = 50$, $h_{max} = 20\%$
7	7 atributos ANEEL	Dinâmico	$n_{max} = 2610$, $n_{min} = 10$, $h_{max} = 10\%$

5.1 *Cenário 1*

O primeiro cenário apresentado neste trabalho objetiva replicar a metodologia de análise comparativa de desem-

penho utilizada pela ANEEL para o cálculo dos limites. Dessa forma, empregou-se o método dinâmico a partir dos atributos descritos nas Tabelas 1 e 2 e considerando-se os parâmetros da Tabela 3. Os resultados obtidos deste cenário servirão de base para comparação com os demais cenários propostos por meio de histogramas de variação dos limites de DEC e FEC.

5.2 Cenário 2

No segundo cenário, utilizam-se os mesmos atributos do Cenário 1, porém os conjuntos são agrupados pelo método *k-means*, com o número de *clusters* (k) igual a 30, dos quais 29 são para conjuntos aéreos e um, para os conjuntos subterrâneos. Esse número foi escolhido por ter sido utilizado pela ANEEL (2009) em sua metodologia anterior de definição de limites. Foram avaliados outros valores para k, porém não houve alterações significativas nos valores encontrados. A Figura 3 apresenta a variação dos limites de objetivos de DEC e FEC.

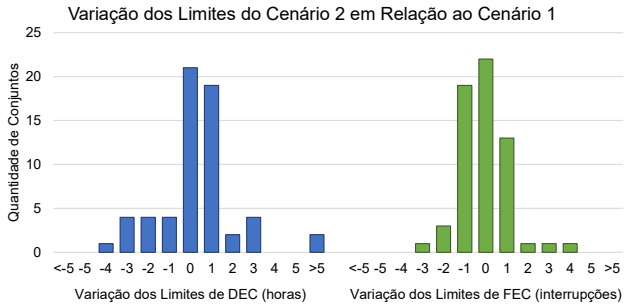

Figura 3. Histograma de variação dos limites objetivos do Cenário 2.

5.3 Cenário 3

Neste cenário, utilizam-se os mesmos atributos do Cenário Base, porém os conjuntos são agrupados pelo método de Ward. Observa-se, na Figura 4 a variação dos limites de objetivos de DEC e FEC em relação ao Cenário 1.

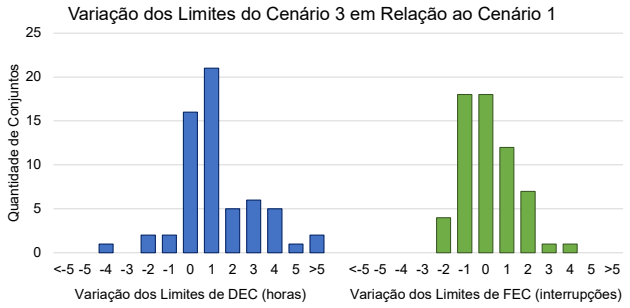

Figura 4. Histograma de variação dos limites objetivos do Cenário 3.

O emprego do método de Ward exige a definição de um critério para a formação dos agrupamentos, que pode ser pelo nível de agregação ou pelo próprio número desejado de *clusters*. Devido à dificuldade de se estabelecer um nível de agregação máximo, optou-se pela simples escolha do número total de *clusters*. De forma análoga ao cenário anterior, foram formados 30 agrupamentos, sendo 29 deles para conjuntos aéreos e um para os conjuntos subterrâneos.

5.4 Cenário 4

Neste quarto cenário, propõe-se a substituição dos atributos em relação àqueles utilizados atualmente pela ANEEL. Os atributos escolhidos para comporem a caracterização dos atributos DEC e FEC foram obtidos por Santos (2021), que avaliou a etapa de seleção dos atributos da metodologia comparativa de desempenho atual. Tais atributos foram encontrados a partir da mudança do coeficiente de correlação mínimo (Pearson ou Spearman) de 20% para 40%, em módulo. Ambos os modelos, de DEC e de FEC, consideram também variáveis socioeconômicas.

Foram selecionados quatro atributos descritores do DEC e três para o FEC, todos diferentes daqueles atualmente empregados pela ANEEL.

A Figura 5 apresenta a variação dos limites de objetivos de DEC e FEC em relação ao Cenário 1.

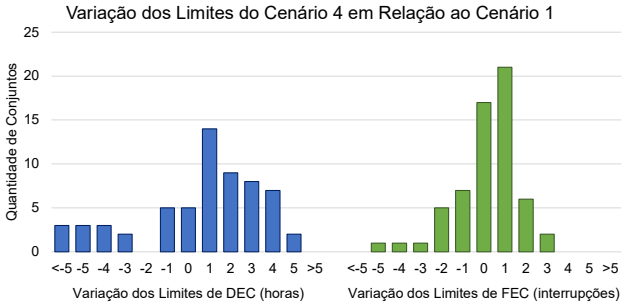

Figura 5. Histograma de variação dos limites objetivos do Cenário 4.

5.5 Cenário 5

Bem como no cenário anterior, neste foi avaliado o uso de novos atributos, mantendo-se o método de agrupamento dinâmico. A variação dos limites de objetivos pode ser observada na Figura 6.

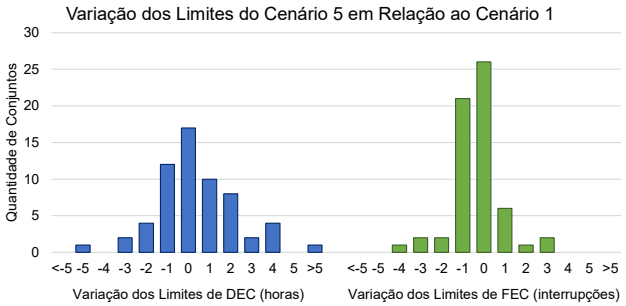

Figura 6. Histograma de variação dos limites objetivos do Cenário 5.

Os atributos que compõem este cenário foram encontrados adotando-se um coeficiente de correlação mínimo de 20% e mudando-se o Fator de Inflação de Variância (VIF) aceitável de 5 para 3, na etapa de seleção dos atributos. Também foram consideradas variáveis socioeconômicas para os modelos de DEC e FEC (Santos, 2021).

Foram selecionados cinco atributos que descrevem o DEC e cinco que definem o FEC, dos quais dois são os mesmos que o empregados pela ANEEL atualmente para cada indicador.

5.6 Cenário 6

Neste sexto cenário, propõe-se o uso de um único atributo no cálculo dos limites, empregando-se o método dinâmico. A escolha de um único atributo que caracterize ambos os indicadores de continuidade é feita no sentido de se simplificar o modelo avaliado. O atributo Densidade de Unidades Consumidoras (NUC_AREA) é capaz de expressar se determinado conjunto possui alta ou baixa concentração de UC.

Em geral, unidades consumidoras em regiões urbanas, onde a densidade de UC por área é maior, são atendidas por redes mais confiáveis e possuem tempo médio de atendimento menor. Entretanto a característica de um conjunto ser mais ou menos denso em termos de UC não é uniforme, pois uma subestação pode atender áreas urbanas e rurais simultaneamente.

Observa-se, nos histogramas da Figura 7, um aumento nos limites objetivos de DEC para os conjuntos da CEEE-D.

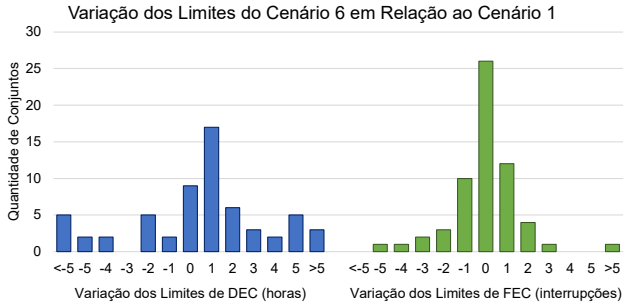

Figura 7. Histograma de variação dos limites objetivos do Cenário 6.

5.7 Cenário 7

No sétimo e último cenário, realiza-se a variação dos parâmetros do método dinâmico e mantém-se os atributos do cenário base. Foram escolhidos os seguintes parâmetros: número desejável de conjuntos semelhantes igual a 2610; número mínimo de conjuntos semelhantes igual a 10 e heterogeneidade percentual máxima igual a 10%. Em outras palavras, a adoção do número desejável de conjuntos semelhantes igual a 2610 é equivalente a não se definir uma quantidade máxima de conjuntos comparáveis. Ou seja, permite-se que sejam incluídos no *cluster* tantos conjuntos quanto forem possíveis antes que se atinja o limite de heterogeneidade.

Reduziu-se ainda, a quantidade mínima de conjuntos semelhantes, de maneira que fosse minimizada a quantidade de conjuntos heterogêneos. A redução na heterogeneidade de 20% para 10% e a diminuição do número mínimo de conjuntos comparáveis de 50 para 10 significam um maior rigor aplicado na metodologia de análise comparativa. Dessa forma, os conjuntos são comparados apenas com outros que possuam grande semelhança.

A Figura 8 mostra os histogramas de variação dos limites objetivos em relação ao cenário base.

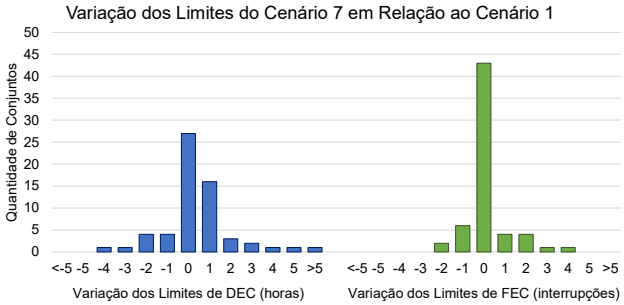

Figura 8. Histograma de variação dos limites objetivos do Cenário 7.

5.8 Comparação dos Resultados

Da análise dos histogramas, verifica-se que os parâmetros dos Cenários 4 e 6 foram os que provocam as maiores alterações dos limites por conjunto de UC dentre os cenários apresentados. Nesses casos, os histogramas apresentam caudas maiores, ou seja, existem mais conjuntos com maiores variações de limites. Tal fato indica que os Cenários 4 e 6 são os que mais destoam do modelo utilizado pela ANEEL.

O Cenário 7, em contrapartida, foi aquele cujos resultados mais se assemelharam aos do cenário base. Ao se observar os histogramas, percebe-se que há uma grande quantidade de conjuntos concentrados em pequenas variações dos limites. Conclui-se, desse modo, que há uma menor sensibilidade da metodologia frente à variação dos parâmetros do método dinâmico, quando comparada às mudanças dos atributos selecionados ou do método de agrupamento utilizado.

Dessa forma, afirma-se que, de modo geral, a metodologia de análise comparativa de desempenho utilizada pela ANEEL tem maior sensibilidade a variações dos atributos descritores dos indicadores. Uma sensibilidade intermediária foi observada na variação do método de *clusterização* e uma pequena sensibilidade, na mudança dos parâmetros do método dinâmico.

Para cada cenário, foram calculados os limites objetivos globais de DEC e FEC, os quais são mostrados na Figura 9. Observa-se que, para o DEC, o Cenário 1 é o que apresentou o menor limite global, de 7,80 horas. Nos demais cenários, o limite variou entre 8,10 e 8,79 horas. A maior variação do limite global de DEC ocorreu no Cenário 3, em que se verificou aumento de 12,7% em relação ao limite do Cenário 1.

Do ponto de vista da distribuidora CEEE-D, os possíveis cenários que mais a favoreceriam são os Cenários 2 e 3, nos quais foram empregados os métodos *k-means* e Ward respectivamente. Nesses cenários foram observados os dois maiores valores de DEC limite objetivo global. A violação dos indicadores de duração da interrupção (DIC e DMIC) costuma representar a maior causa das compensações totais pagas aos clientes, e, assim, faz sentido analisar em quais cenários houve o maior aumento de DEC limite global.

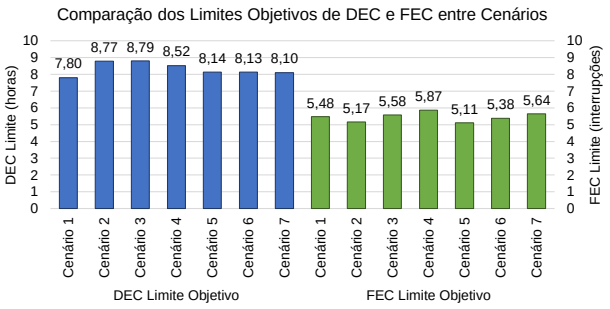

Figura 9. Comparação dos limites objetivos globais.

Cabe ressaltar que os estudos de caso propostos não findam a discussão acerca da definição dos limites. A metodologia deste trabalho possibilita a criação de inúmeros outros cenários, utilizando-se dados de quaisquer distribuidoras brasileiras. A avaliação de outros cenários contribuiria para a obtenção de resultados mais assertivos.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho explorou-se a metodologia de definição de limites de continuidade de energia elétrica, um importante mecanismo de regulação dos serviços prestados pelas distribuidoras de energia, por parte da ANEEL. Tais limites visam estimular investimentos na manutenção e modernização das redes elétricas que corroborem para um padrão ótimo da qualidade do serviço. Objetiva-se, assim, criar um ambiente competitivo entre as empresas.

A metodologia de análise comparativa de desempenho tem como premissa a de que conjuntos semelhantes devem apresentar desempenho equivalente. A semelhança entre conjuntos é definida por suas características físico-elétricas, expressas por atributos. Conjuntos cujos atributos sejam semelhantes entre si são comparados de tal modo que seus indicadores de continuidade sejam equivalentes. Para isso, estabelece-se uma referência, a qual determinará o objetivo a ser alcançado por cada conjunto em um intervalo de tempo definido.

Foram analisados três métodos de agrupamento de conjuntos de unidades consumidoras aplicados na definição de limites dos indicadores de continuidade. Avaliou-se o uso dos métodos dinâmico, *k-means* e Ward em estudos de caso considerando os 61 conjuntos da CEEE-D. Foram calculados os limites objetivos de DEC e de FEC dos conjuntos para sete diferentes cenários, em que foram variados, além do método de clusterização, os atributos selecionados e os parâmetros do método dinâmico.

Dentre os resultados observados, foi percebida uma maior dependência do modelo da ANEEL aos atributos selecionados, o que reforça o argumento de que a escolha de atributos é fundamental para a metodologia de definição dos limites. A escolha de um método de *clusterização* também tem impacto sobre os limites calculados. Em relação aos parâmetros do método dinâmico, foi observada uma menor sensibilidade do modelo.

A discussão sobre a metodologia de análise comparativa de desempenho pode ser aprofundada ao se expandir a análise dos limites para as demais distribuidoras brasileiras, de forma a identificar em quais condições determinadas empresas possam ser privilegiadas ou prejudicadas pela metodologia da ANEEL. Como outra sugestão de trabalho futuro, propõe-se estimar, para cada cenário proposto, as compensações a serem pagas aos consumidores e avaliar a relevância das variações dos parâmetros na metodologia.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de P&D regulado pela ANEEL e executado pela Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) via chamada nº 01/2018.

REFERÊNCIAS

ANEEL (2009). Anexo da nota técnica n° 0064, de 23 de junho de 2009. URL `https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/detalhes_consulta.cfm?IdConsultaPublica=162`. Acesso em 15 mai. 2021.

ANEEL (2014). Nota técnica n° 0102, de 3 de dezembro de 2014. URL `http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/dspListaResultado.cfm?attAnoAud=2014&attIdeAud=898&attAnoFasAud=2014&id_area=13`. Acesso em 06 ago. 2020.

ANEEL (2016). Nota técnica n° 0121, de 24 de agosto de 2016. URL `https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2016/056/documento/nota_tecnica_0121_ceee-d.pdf`. Acesso em 15 mai. 2021.

ANEEL (2021). Procedimentos de distribuição - PRODIST - módulo 8. URL `https://www.aneel.gov.br/modulo-8`. Acesso em 26 jan. 2021.

Brasil (1997). Decreto n° 2.335, de 6 de outubro de 1997. *Diário Oficial da União*. URL `http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2335.htm`. Acesso em 18 jan. 2020.

Fávero, L.P. and Belfiore, P. (2017). *Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®*. Elsevier, Rio de Janeiro.

Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., and Tatham, R.L. (2009). *Análise multivariada de dados*. Bookman, Porto Alegre.

Santos, J.R. (2021). Análise estatística para seleção dos atributos que caracterizam os indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica. Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, 2021.

Tanure, J.E.P.S. (2000). *Análise Comparativa de Empresas de Distribuição para o Estabelecimento de Metas de Desempenho para Indicadores de Continuidade do Serviço de Distribuição*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.

Tanure, J.E.P.S. (2004). *Proposta de procedimentos e metodologia para estabelecimento de metas de qualidade (DEC e FEC) para concessionárias de distribuição de energia elétrica através da análise comparativa*. Doutorado em engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo. URL `https://repositorio.usp.br/item/001415412`. Acesso em 19 jan. 2021.